



# 3D & 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗ ΜΟΔΑ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΠΜΣ “Αρχιτεκτονική Εσωτερικού Χώρου:  
Αειφορικός και Κοινωνικός Σχεδιασμός”

Σπουδάστρια: Πετροπούλου Χρύσα  
Επιβλέπων : Κουρνιατής Νικόλαος

UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ





Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής  
Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Πολιτισμού  
Τμήμα Εσωτερικής Αρχιτεκτονικής  
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα:  
Αρχιτεκτονική Εσωτερικών Χώρων, Αειφορικός και Κοινωνικός Σχεδιασμός

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

## **3D και 4D Εκτύπωση στη μόδα**

**Πετροπούλου Χρύσα**

**Επιβλέπων Καθηγητής:**  
**Κουρνιατής Νικόλαος**

**Αθήνα 2024**



University of West Attica  
School of Applied Arts and Culture  
Department of Interior Architecture  
Title of Post Graduate Program:  
MSc in Interior Architecture: Sustainable and Social Design

Diploma Thesis

## **3D and 4D Printing in fashion**

**Petropoulou Chrysa**

**Supervisor:**  
**Kourniatis Nikolaos**

**Athens 2024**



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής  
Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Πολιτισμού  
Τμήμα Εσωτερικής Αρχιτεκτονικής  
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα:  
Αρχιτεκτονική Εσωτερικών Χώρων, Αειφορικός και Κοινωνικός Σχεδιασμός

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

### 3D και 4D Εκτύπωση στη μόδα

Μέλη εξεταστικής επιτροπής συμπεριλαμβανόμενου και του Εισηγητή

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι  
Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Δρ. Κουρνιατής Νικόλαος	Αναπληρωτής Καθηγητής	
2	Δρ. Γιαννούδης Σωκράτης	Αναπληρωτής Καθηγητής	
3	Σιτορέγκο Ανδρέας	Αναπληρωτής Καθηγητής	

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΥΣΑ του ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗ, με αριθμό μητρώου ssd19014 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ, ΑΕΙΦΟΡΙΚΟΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ του Τμήματος ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ της Σχολής ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα  
ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΥΣΑ

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κουρνιατή, την οικογένειά μου και τους ανθρώπους εκείνους που με στηρίζουν καθόλη την εκπαιδευτική μου πορεία. Ακόμα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ανδρέα και σε όλη την ομάδα του thes3d, καθώς και στους Αναστάση και Άγγελο από το Prelab για τη συνεργασία, το ενδιαφέρον και τη βοήθειά τους κατά την υλοποίηση των τρισδιάστατων εκτυπώσεων που αφορούν το πρακτικό μέρος της εργασίας μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία της κλωστοϋφαντουργίας βρίσκεται στο επίκεντρο του παγκόσμιου ενδιαφέροντος λόγω των επιπτώσεων που έχει προκαλέσει και προκαλεί στο περιβάλλον. Ο κλάδος της κλωστοϋφαντουργίας είναι ένας από τους μεγαλύτερους ρυπαντές, καθώς καταναλώνει υψηλές ποσότητες καυσίμων, χημικών και πόσιμου νερού. Οι έντονοι ρυθμοί μαζικής παραγωγής, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος των προϊόντων, έχουν οδηγήσει σε μεγάλη αύξηση της ποσότητας των παραγόμενων και απορριπτόμενων ενδυμάτων, επηρεάζοντας δυσμενώς όλες τις μορφές ζωής. Τα ρούχα, τα υποδήματα και τα είδη υφαντουργίας έχουν μεγάλο μερίδιο ευθύνης για τη ρύπανση των υδάτων, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την υγειονομική ταφή, ενώ σε παγκόσμιο επίπεδο λιγότερο από το 1% των ρούχων ανακυκλώνονται ως ενδύματα. Οι αυξανόμενες ανησυχίες για το περιβάλλον και την υγεία έχουν οδηγήσει τόσο το αγοραστικό κοινό, όσο και τις επιχειρήσεις να αναζητούν με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό νέα, εναλλακτικά μοντέλα παραγωγής που βασίζονται στη βιωσιμότητα.

Αυτή η πραγματικότητα, σε συνδυασμό με την συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας, οδήγησε πολλούς σχεδιαστές να στραφούν προς μία ανατρεπτική σχεδιαστική διαδικασία: τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης (additive manufacturing/ 3D printing). Μπορεί να φαίνεται παράδοξο, αλλά η τρισδιάστατη εκτύπωση αναμένεται να είναι η τελευταία τάση βιώσιμης παραγωγής στη μόδα, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία μοναδικών, εξατομικευμένων, βιώσιμων προϊόντων, που μπορούν να παραχθούν κατόπιν ζήτησης. Η μέθοδος αυτή θεωρείται πράσινη τεχνολογία λόγω της χαμηλής και ενίοτε μηδενικής παραγωγής αποβλήτων και παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής. Σε αυτά, συμπεριλαμβάνονται η επιταχυνόμενη διαδικασία σχεδιασμού πολύπλοκων γεωμετριών, ο μειωμένος χρόνος παραγωγής και το χαμηλότερο κόστος που σχετίζεται με το απόθεμα, την αποθήκευση, τη συσκευασία και τη μεταφορά. Καθώς οι προηγμένες τεχνολογίες συνεχίζουν να εξελίσσονται και να ξεπερνούν τις παραδοσιακές μεθόδους κλωστοϋφαντουργίας, οι ευκαιρίες και οι δυνατότητες που δημιουργούνται είναι τεράστιες.

Πρόσφατα εμφανίστηκε ένας νέος όρος που αποτελεί μία επέκταση της τρισδιάστατης (3D) εκτύπωσης, η εκτύπωση τεσσάρων διαστάσεων (4D), η οποία επιτρέπει στην εκτυπωμένη δομή να αλλάζει δυναμικά το σχήμα της, ανταποκρινόμενη σε συγκεκριμένο ερέθισμα (θερμοκρασία, νερό, υγρασία, στρες, pH, ηλεκτρισμός, πίεση, ιοντική ισχύς, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μαγνητικό πεδίο, ρεύμα, τάση, διαλυτής). Επιπλέον, η εμφάνιση έξυπνων υλικών που ανταποκρίνονται σε ορισμένα ερεθίσματα, έχει συμβάλει στην ανάπτυξη της 4D εκτύπωσης καθώς δεν απαιτείται χρήση πρόσθετου εξοπλισμού. Αντί για τις παραδοσιακές ίνες, οι έξυπνες ίνες που είναι προικισμένες με πολυλειτουργικότητα είναι πολλά υποσχόμενος κλάδος, λόγω της ικανότητας αλληλεπίδρασης με το εξωτερικό περιβάλλον.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει τις βασικές μεθόδους παραγωγής

και την τεχνολογική ανάπτυξη από την 3D στη 4D εκτύπωση, στον τομέα της μόδας και της κλωστοϋφαντουργίας. Προσδιορίζονται οι βασικές έννοιες, αναλύονται τα υλικά, οι μέθοδοι σχεδιασμού και εκτύπωσης και παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εφαρμογές της 3D και της 4D εκτύπωσης στη μόδα. Τέλος, με βάση την ανάλυση των περιπτώσεων και των διαδικασιών, καταγράφονται τα πλεονεκτήματα, οι προκλήσεις και οι μελλοντικές προοπτικές αυτών των τεχνολογιών.

**Λέξεις κλειδιά:** προσθετική κατασκευή, τρισδιάστατη εκτύπωση, ψηφιακή κατασκευή, μόδα, βιωσιμότητα, οικολογική μόδα, 4D εκτύπωση, έξυπνα υφάσματα.



Η μόδα είναι ένας αδηφάγος καταναλωτής φυσικών πόρων.  
Αεροφωτογραφία των ρούχων που έχουν απορριφθεί στην έρημο Ατακάμα στη βόρεια Χιλή.  
(Getty images)  
Πηγή: <https://idsb.tmgrup.com.tr/ly/uploads/images/2022/01/17/175315.jpg>

In recent years, the textile industry has garnered significant global attention owing to the profound environmental ramifications it has caused and continues to ensue. Undeniably, the textile industry stands as one of the foremost contributors to pollution, characterized by its excessive consumption of fuel, chemicals, and potable water. The relentless pursuit of mass production, coupled with the pervasive prevalence of low-cost garment production, has propelled an exponential surge in clothing manufacturing and subsequent disposal, exerting a detrimental impact on biodiversity at large. Regrettably, the production, use, and disposal of clothing, footwear, and textiles engender grievous implications encompassing water pollution, greenhouse gas emissions, and landfills. To exacerbate the issue further, global clothing recycling rates remain meager, barely eking out a mere 1% of the total clothing produced. This stark reality has instilled growing concerns regarding ecological well-being and public health, leading consumers and businesses alike to progressively seek novel and sustainable approaches to textile production.

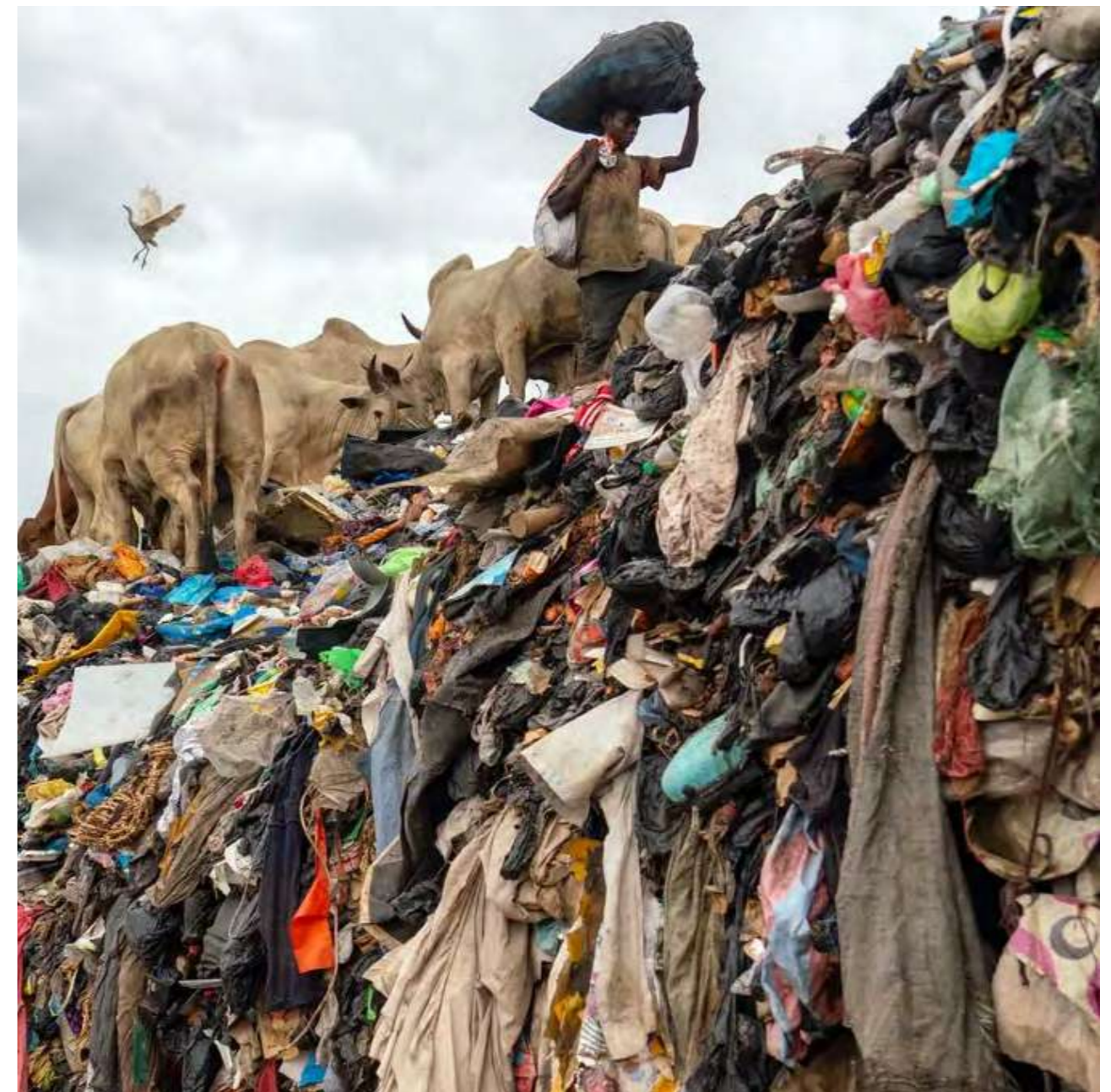
The current reality, accompanied by the ongoing advancements in technology, has prompted numerous designers to embrace a disruptive design process – 3D printing. Paradoxical as it may seem, 3D printing is anticipated to be at the forefront of sustainable fashion trends, as it facilitates the creation of bespoke, personalized, and sustainable products that can be manufactured on demand. This method is celebrated as a green technology due to its low to zero waste production capabilities and offers a plethora of advantages in contrast to conventional production processes. These advantages encompass an expedited design process for intricate geometries, reduced production time, and decreased costs associated with inventory, storage, packaging, and transportation. As cutting-edge technologies continuously evolve and surpass traditional textile methods, the potential and possibilities they engender are boundless.

Recently, there has been a notable development known as 4D printing, which represents an evolutionary step from 3D printing. This advancement enables the printed structure to undergo dynamic shape changes in response to specific stimuli, including temperature, water, humidity, stress, pH, electricity, pressure, ionic strength, electromagnetic radiation, magnetic field, current, voltage, and solvent. The emergence of smart materials that possess the ability to respond to these stimuli has played a pivotal role in the progress of 4D printing, as it obviates the necessity for supplementary equipment. Rather than relying on conventional fibers, the focus has shifted towards smart fibers that exhibit multifunctionality, thereby facilitating interaction with the external environment. This field exhibits considerable promise in terms of its potential applications.

The objective of this paper is to investigate the fundamental production methods and technological advancements in the transition from 3D to 4D printing within the fashion and textile industry. Key concepts will be clearly defined, printing methods will be thoroughly analyzed based on the input material, smart fibers will be classified according to their response to external

stimuli, and the significant applications of 3D and 4D printing in the realm of fashion will be presented. Lastly, drawing upon case studies and process analysis, the advantages, challenges, and prospects of these technologies will be documented.

**Key words:** additive manufacturing, 3D printing, digital fabrication, fashion, sustainability, eco-fashion, 4D printing, smart textiles.



Με την άνοδο του fast fashion στη Δύση, η ποιότητα μειώνεται ενώ τα ρούχα που απορρίπτονται αυξάνονται. Οι καταναλωτές έχουν αυξήσει τις αγορές ενδυμάτων κατά 60% ενώ έχουν μειώσει το χρόνο χρήσης τους στο μισό σε σχέση με το 2000, με αποτέλεσμα 53 εκατομμύρια τόνοι ρούχων να καίγονται ή να πετιούνται σε χωματερές ετησίως.

Φωτογραφία: Muntaka Chasant/Rex

Πηγή: <https://www.theguardian.com/global-development/2023/may/31/stop-dumping-your-cast-offs-on-us-ghanaian-clothes-traders-tell-eu>

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ



## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ- ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## ΕΝΟΤΗΤΑ Α

## 0.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ 19

ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ 20

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ 21

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ 25

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΕΙΣΟΔΟΥ 28

ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ ΣΕ ΚΟΚΚΟΥΣ 28

ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ ΣΕ ΦΥΛΛΑ 37

ΡΕΥΣΤΗ ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ 40

ΣΤΕΡΕΑ ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ 50

Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ: ΑΠΟ ΤΟ ΣΧΕΔΙΟ ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ 56

ΨΗΦΙΑΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ 56

ΥΛΙΚΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ: ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ 59

## 0.2 ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΛΩΣΤΟΨΦΑΝΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ 63

ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ 64

Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ 67

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΠΑΝΩ ΣΕ ΥΦΑΣΜΑ: ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ 73

ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ 73

ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ 73

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΡΟΣΦΥΣΗ 74

## 0.3 Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΤΗΣ ΜΟΔΑΣ 81

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΜΟΔΑ 82

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ 83

ΜΟΔΑΣ 83

ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ 83

ΨΗΦΙΑΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΔΑ 84

Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗ ΜΟΔΑ 88

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ  
ΕΝΔΥΜΑΤΩΝ 92

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ 94

1. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΛΕΞΗ 94

2. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΪΝΟΠΟΙΗΣΗ 96

3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΨΕΚΑΣΜΟ 97

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ 100

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΞΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΡΟΥΧΩΝ 101

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ 111

Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΣΜΗΜΑΤΩΝ 119

Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΔΗΜΑΤΩΝ 125

## 0.4 Ο ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ 131

## 0.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ 139

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ 140

ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ 141

## 0.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ 145

## 0.7 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗ 151

ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ 152

ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (3DP) ΣΤΗΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ  
ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (4DP) 155

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ 156

-ΜΕΘΟΔΟΙ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ 157

-ΤΥΠΟΙ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗ 159

ΤΥΠΟΙ ΕΡΕΘΙΣΜΑΤΩΝ 165

ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΝΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΡΕΘΙΣΜΑΤΑ 166

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ 4D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ 170

ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	172
Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΛΩΣΤΟΨΦΑΝΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΜΟΔΑ	174
Η ΥΠΕΡΒΑΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΩΣΤΟΨΦΑΝΤΟΥΡΓΙΑ	174
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	175
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	178

## ΕΝΟΤΗΤΑ Β

0.1 ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	185
ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	186
ΑΡΧΙΚΗ ΙΔΕΑ-ΒΙΟΜΙΜΗΣΗ	186
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΩΔΙΚΑ	188
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ “ΚΑΝΟΝΑ”	190
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΟΔΑΣ	192
ΚΟΣΜΗΜΑΤΑ	192
ΕΝΔΥΜΑ	194
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΤΡΟΝ	194
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	196
ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ- ΤΕΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	197
ΑΠΟ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ	198
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	198
ΟΙ ΕΚΤΥΠΩΤΕΣ	199
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	211
ΑΝΤΙ ΕΠΙΛΟΓΟΥ	214

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Η παρούσα ερευνητική εργασία αφορά μία βιβλιογραφική και μία πρακτική έρευνα σχετικά με την 3D εκτύπωση και την εισχώρησή της στη μόδα. Όσον αφορά τη βιβλιογραφία, έχουν μελετηθεί διεθνή άρθρα, βιβλία, ηλεκτρονικές πηγές και ερευνητικές εργασίες, η πλειοψηφία των οποίων είναι δημοσιευμένα στα αγγλικά. Η προσέγγιση του θέματος έγινε με κατανόηση και ανάλυση βασικών εννοιών και τεχνολογιών της 3D εκτύπωσης αλλά και μέσω της μελέτης συγκεκριμένων περιπτώσεων εφαρμογής στη μόδα. Τα παραδείγματα επιλέχθηκαν λόγω της πρωτοτυπίας τους και της συμβολής που παρείχαν ή αναμένεται να έχουν μελλοντικά.

Εν γένει, η έρευνα αυτή επιχειρεί να απαντήσει στα εξής ερωτήματα: Τι είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση και ποια η διαφορά της από τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής; Πώς μπορεί η τεχνολογία αυτή να εφαρμοστεί στον τομέα της μόδας και ποια αναμένεται να είναι τα οφέλη; Ποιες μέθοδοι εκτύπωσης και ποια από τα εκτυπώσιμα διαθέσιμα φυσικά, συνθετικά ή σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην παραγωγή ειδών μόδας; Και τέλος, θα μπορέσει η προηγούμενη εμπειρία να αποτελέσει αρωγό για μελλοντικές προσπάθειες εφαρμογής εξασφαλίζοντας μία θέση της τεχνολογίας αυτής στη μόδα;

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την δομή, η ερευνητική εργασία χωρίζεται σε δύο ενότητες. Όσον αφορά την πρώτη ενότητα, το 1ο κεφάλαιο του παρόντος συγγράμματος επικεντρώνεται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Αρχικά αναπτύσσεται ένα θεωρητικό πλαίσιο το οποίο προσεγγίζει τον όρο, ενώ ακολουθεί μία σύντομη ιστορική αναδρομή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, από την εφεύρεσή της έως τις μέρες μας. Στη συνέχεια, η έρευνα εστιάζει στη διαδικασία κατασκευής προϊόντων με μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης από τον σχεδιασμό έως την υλοποίηση. Γίνεται κατηγοριοποίηση των βασικών μεθόδων προσθετικής κατασκευής με βάση το υλικό εισόδου, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων, εξετάζεται η καταλληλότητά τους για εφαρμογή στην κλωστοϋφαντουργία και τη μόδα και περιγράφεται το πως οι διάφορες παράμετροι προγραμματισμού και λειτουργίας του εξοπλισμού μπορούν να επηρεάσουν άμεσα το τελικό προϊόν.

Στο 2ο κεφάλαιο αναλύονται οι διάφοροι τύποι υφασμάτων που χρησιμοποιούνται στη μόδα, ενώ παράλληλα εξετάζεται και το πώς η τρισδιάστατη εκτύπωση βασίστηκε σε αυτή την παραδοσιακή διαδικασία παραγωγής για τη δημιουργία υφασμάτων. Ακολούθως, αναφέρονται τα υλικά και οι τεχνολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία τρισδιάστατων ενδυμάτων και αναλύεται η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης σε συμβατικά υφάσματα.

Στο 3ο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση της εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα της μόδας, από το στάδιο σχεδιασμού έως την υλοποίηση. Επιπλέον παρουσιάζονται επιλεγμένα παραδείγματα εφαρμογής που αφορούν εξολοκλήρου τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα μόδας και προϊόντα που συνδυάζουν την τρισδιάστατη εκτύπωση με τα παραδοσιακά

υλικά.

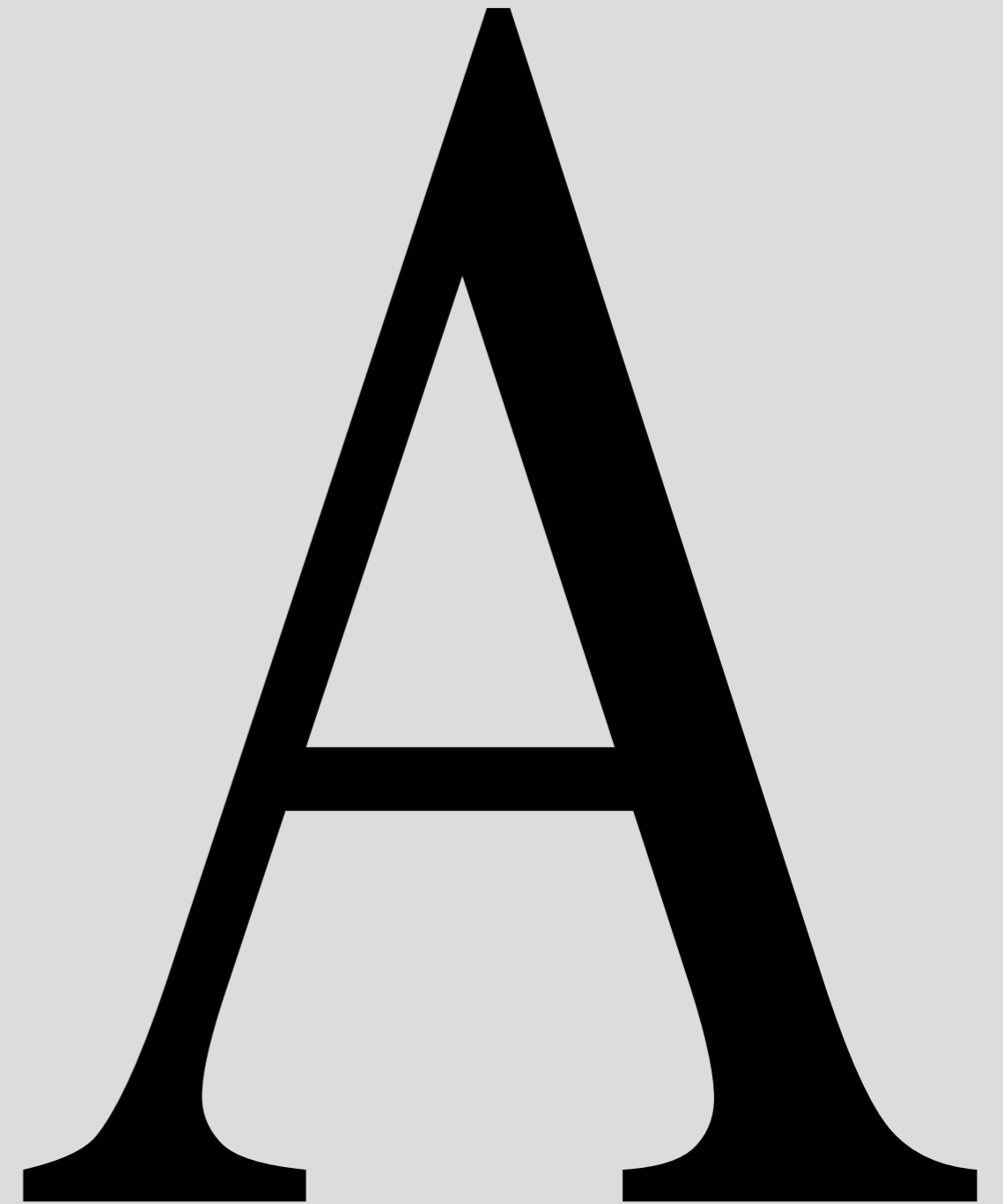
Το 4ο κεφάλαιο αφορμάται από την επίδραση που έχει η βιομηχανία της μόδας στο περιβάλλον και αναφέρεται στον αντίκτυπο της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε αυτό.

Το 5ο και το 6ο κεφάλαιο αφορούν σε μία συνολική επισκόπηση της υφιστάμενης κατάστασης, καθώς και μια πιο λεπτομερή διερεύνηση των προκλήσεων, των πλεονεκτημάτων και των μελλοντικών προοπτικών της 3D τεχνολογίας στην μόδα.

Το 7ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην 4D εκτύπωση. Αρχικά αποσαφηνίζονται τα έξυπνα υλικά και προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, αποδίδεται η έννοια της 4D εκτύπωσης και η σχέση που έχει με την 3D εκτύπωση. Ακόμα, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την 4D εκτύπωση και ερευνώνται τα υλικά, οι μέθοδοι εκτύπωσης και οι μέθοδοι σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται στην 4D εκτύπωση. Τέλος, η μελέτη επικεντρώνεται στην εφαρμογή της 4D εκτύπωσης στον τομέα της μόδας.

Η δεύτερη ενότητα παρουσιάζει τη μελέτη της πρακτικής εφαρμογής από την αρχική ιδέα έως την υλοποίηση. Προϊόντα μόδας σχεδιάζονται με τη χρήση ψηφιακών και παραμετρικών εργαλείων και εκτυπώνονται τρισδιάστατα, με στόχο μία πιο βιωματική και εις βάθος διερεύνηση του ζητήματος που απασχόλησε την παρούσα ερευνητική εργασία. Η πορεία που ακολουθείται βασίζεται στην γνώση που αποκτήθηκε από την βιβλιογραφική έρευνα και ανάλυση και υλοποιείται με βάση τα διαθέσιμα μέσα.

Η πρώτη ενότητα αναλύει την τρισδιάστατη εκτύπωση, από την εφεύρεσή της, έως σήμερα. Αφού προσδιοριστούν και διευκρινιστούν τα χαρακτηριστικά που την απαρτίζουν, η μελέτη επικεντρώνεται στην εφαρμογή της στον τομέα της μόδας.

A large, bold, black serif capital letter 'A' is centered on a light gray background. The letter has a classic, slightly flared design with a horizontal bar across the middle.

ΕΝΟΤΗΤΑ

---

## Τρισδιάστατη Εκτύπωση

---

“Με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούμε να εκτυπώσουμε πολύπλοκες δομές που είναι δύσκολο ή αδύνατον να δημιουργηθούν με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.” (Lisa Harouni)

Το παρόν κεφάλαιο επιχειρεί να προσεγγίσει την τρισδιάστατη τεχνολογία. Ξεκινώντας, γίνεται μια σύντομη εννοιολογική και ιστορική επισκόπηση. Στη συνέχεια, η έρευνα επικεντρώνεται στις διάφορες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, αξιολογώντας και επισημαίνοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες της κάθε μεθόδου. Τέλος, παρουσιάζονται τα εργαλεία σχεδιασμού, τα λογισμικά και τα διαθέσιμα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης.

## ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

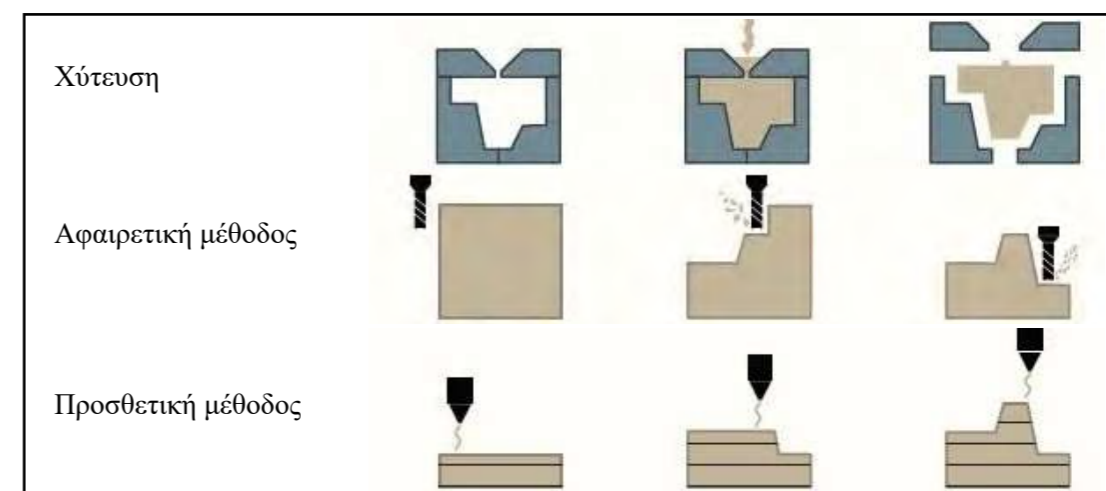
Στα τέλη του 20ού αιώνα, αναδύθηκε μια νέα οικογένεια κατασκευαστικών τεχνολογιών, αυτή της Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing- AM). Ο όρος “κατασκευή προσθέτων” είναι ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα σύνολο τεχνολογιών για την κατασκευή φυσικών αντικειμένων από ένα τρισδιάστατο ψηφιακό σχέδιο (Computer Aided design-CAD.) Το προϊόν που δημιουργείται είναι αποτέλεσμα της διαδοχικής εναπόθεσης επάλληλων λεπτών στρώσεων υλικού (Wohlers Associates Inc., 2013). Η Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM International) όρισε την Προσθετική Κατασκευή ως τη “διαδικασία ένωσης υλικών για τη δημιουργία αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων, στρώμα-στρώμα” (ASTM, 2015).

Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλοί διαφορετικοί όροι και ορισμοί για αυτή την τεχνολογία. Στους ιστορικούς όρους συμπεριλαμβάνονται η κατασκευή πρόσθετων (additive fabrication), οι διεργασίες πρόσθετων (additive processes), οι τεχνικές πρόσθετων (additive techniques), η στρωματική κατασκευή προσθέτων (additive layer manufacturing- ALM), η κατασκευή στρωμάτων (layer manufacturing), η κατασκευή στερεών ελεύθερης μορφής (solid freeform fabrication) και η κατασκευή ελεύθερης μορφής (freeform fabrication) (ASTM, 2021). Άλλοι όροι που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι η ηλεκτρονική κατασκευή (e- manufacturing), η ελεύθερη παραγωγή (freedom fabrication, solid- freedom technology- SFT, solid- freedom fabrication processes), η γρήγορη κατασκευή (rapid manufacturing), η εποικοδομητική κατασκευή (constructive manufacturing), η άμεση ψηφιακή κατασκευή (direct digital manufacture) και η προσθετική παραγωγή (additive fabrication) (Στουραϊτής, 2021)

Ο όρος “προσθετική κατασκευή” είναι ο επίσημος όρος της βιομηχανίας, ενώ ο όρος “τρειςδιάστατη εκτύπωση” (3D Printing- 3DP) αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενο συνώνυμο (Τράντζας, 2017). Ο όρος “ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων” (Rapid Prototyping- RP) περιέγραφε αρχικά την τεχνολογία, όμως καθώς η τεχνολογία άρχισε να χρησιμοποιείται και σε διαφορετικούς τομείς από την πρωτοτυποποίηση, από τη δεκαετία του 1990 άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως ο όρος τρισδιάστατη εκτύπωση (3DP), ο οποίος και επικράτησε. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ο όρος “τρειςδιάστατη εκτύπωση”, καθώς είναι ο όρος που αναφέρεται στον τομέα της μόδας.

Η τεχνολογία αυτή διαφέρει από τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, όπου το τελικό προϊόν αφαιρείται από μεγαλύτερο κομμάτι υλικού (αφαιρετική μέθοδος) ή δημιουργείται με χύτευση υλικών. Πρόκειται για μία διαδικασία που πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση καλουπιών, ενώ το τελικό προϊόν μπορεί να διαμορφωθεί χωρίς καμία συμπληρωματική

συσκευή ή ανεπιθύμητη σπατάλη υλικού (Sitotaw et al., 2020). Ως αποτέλεσμα η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει μικρότερη φύρα και γι’ αυτό χρησιμοποιείται εκτενώς τόσο για την παραγωγή πρωτοτύπων όσο και για την παραγωγή προσθέτων σε διάφορους τομείς κατασκευής (Paul SC et al., 2008). Ακόμα, αυτή η τεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί για τη μετατροπή απορριμμάτων και παραπροϊόντων σε νέα υλικά (Ford et al., 2016). Συνεπώς, οι διαδικασίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι εγγενώς “πράσινες” και βιώσιμες (Campbell et al., 2021).



Διαφορετικές μέθοδοι κατασκευής προϊόντων

Πηγή: <https://www.linkedin.com/pulse/formative-vs-subtractive-additive-farzin-saleh-abadi/>

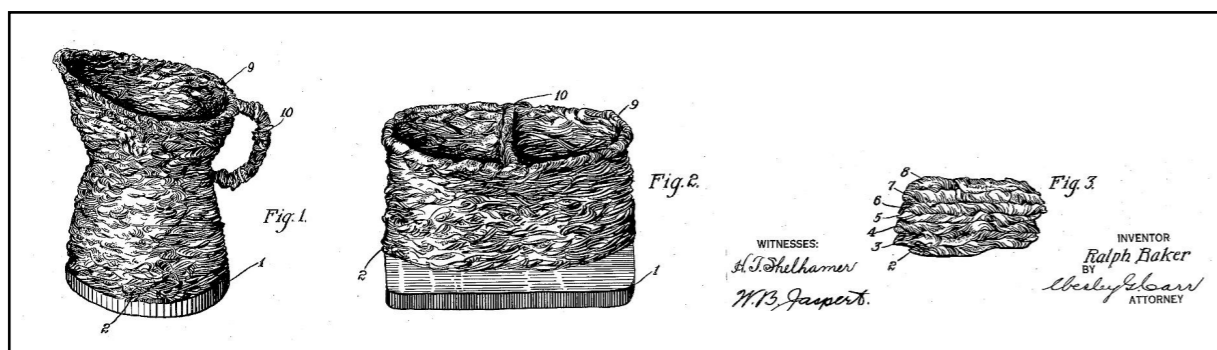
## ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα πρώιμα πειράματα τρισδιάστατης εκτύπωσης χρονολογούνται τη δεκαετία του 1970 (LEF, 2012), αλλά μόνο κατά την δεκαετία που εμφανίστηκαν οι σχετικές τεχνολογίες (λογισμικό σχεδίασης με υπολογιστή, λέιζερ, κ.ά.) (Gibson et al., 2010), φάνηκε ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να διατεθεί στο εμπόριο.

Πριν από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, χρησιμοποιούταν κυρίως η αφαιρετική μέθοδος (Reeves, 2011). Από τότε που η προσθετική τεχνολογία πρωτοκυκλοφόρησε στο εμπόριο στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αναπτύχθηκε με εκθετικό ρυθμό και η δυναμική της άρχισε να αυξάνεται στα μέσα της ίδιας δεκαετίας. Κατά τις δεκαετίες του 1980 και του 1990 (Gebler et al., 2014) χρησιμοποιούταν κυρίως για την δημιουργία πρωτοτύπων, ώστε να εξετάζεται η καταλληλότητα των προϊόντων πριν αρχίσει η παραγωγή τους.

Η πρώτη δημοσίευση σχετικά με την τρισδιάστατη τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ότι έγινε το 1981 από τον Ιάπωνα εφευρέτη Dr. Hideo Kodama και το Ινστιτούτο Βιομηχανικών Ερευνών της Ναγκόγια στην Ιαπωνία, ο οποίος ανέφερε τις δυνατότητες ενός συστήματος

ταχείας πρωτοτυποποίησης (RP) που θα χρησιμοποιούσε φωτοπολυμερή με υπεριώδες φως (Sprahiu et al, 2020). Βασιζόμενος στο έργο του Ralf Baker για την κατασκευή διακοσμητικών ειδών κατά τη δεκαετία του 1920 (πατέντα US423647A), επιχείρησε να οικοδομήσει ένα αντικείμενο, εκτυπωμένο σε στρώματα, καθένα από τα οποία θα αντιστοιχούσε σε μία διατομή ενός μοντέλου. Η εφεύρεσή του επεκτάθηκε τις επόμενες τρεις δεκαετίες.



Διακοσμητικά είδη- Ralf Baker

Πηγή: [https://www.flam3d.be/wp-content/uploads/2019/10/PPT-Flam3D-Medical\\_inleiding.pdf](https://www.flam3d.be/wp-content/uploads/2019/10/PPT-Flam3D-Medical_inleiding.pdf)

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι η πρώτη από τις τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν αρχικά στη Γαλλία (CNRS- Ιούλιος 84. Γαλλικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας No 84 11 241) και στις ΗΠΑ (UVP- C. HULL Aug, 84. Αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας N°45 75 330) (Jacobs, 1992), για τον σχεδιασμό και την ταχύτερη κατασκευή και συναρμολόγηση αντικειμένου. Ο όρος “στερεολιθογραφία” χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1986 από τον μηχανικό σχεδιασμού του Central High School στο Κολοράντο, Chuck Hull. Βασιζόμενος στο έργο του Kodama επινόησε την τεχνική της στερεολιθογραφίας για την εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας. Η διαδικασία επιτρέπει στους σχεδιαστές τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα (Matias & Rao, 2015). Το πρώτο σύστημα στερεολιθογραφίας αναπτύχθηκε από την 3D Systems INK (Rockhill SC USA) και παρουσιάστηκε το Νοέμβριο του 1987 στην έκθεση AUTOFACT. Αντίστοιχα η πρώτη εμπορευματοποιημένη συσκευή στερεολιθογραφίας SLA-1 κυκλοφόρησε στο εμπόριο το 1988 (Sprahiu et al., 2020) ενώ ο Hull δημοσίευσε έναν αριθμό διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σχετικά με την έννοια της τρισδιάστατης εκτύπωσης, πολλά από τα οποία χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα από την 3D Systems.



Συσκευή εκτύπωσης SLA-1

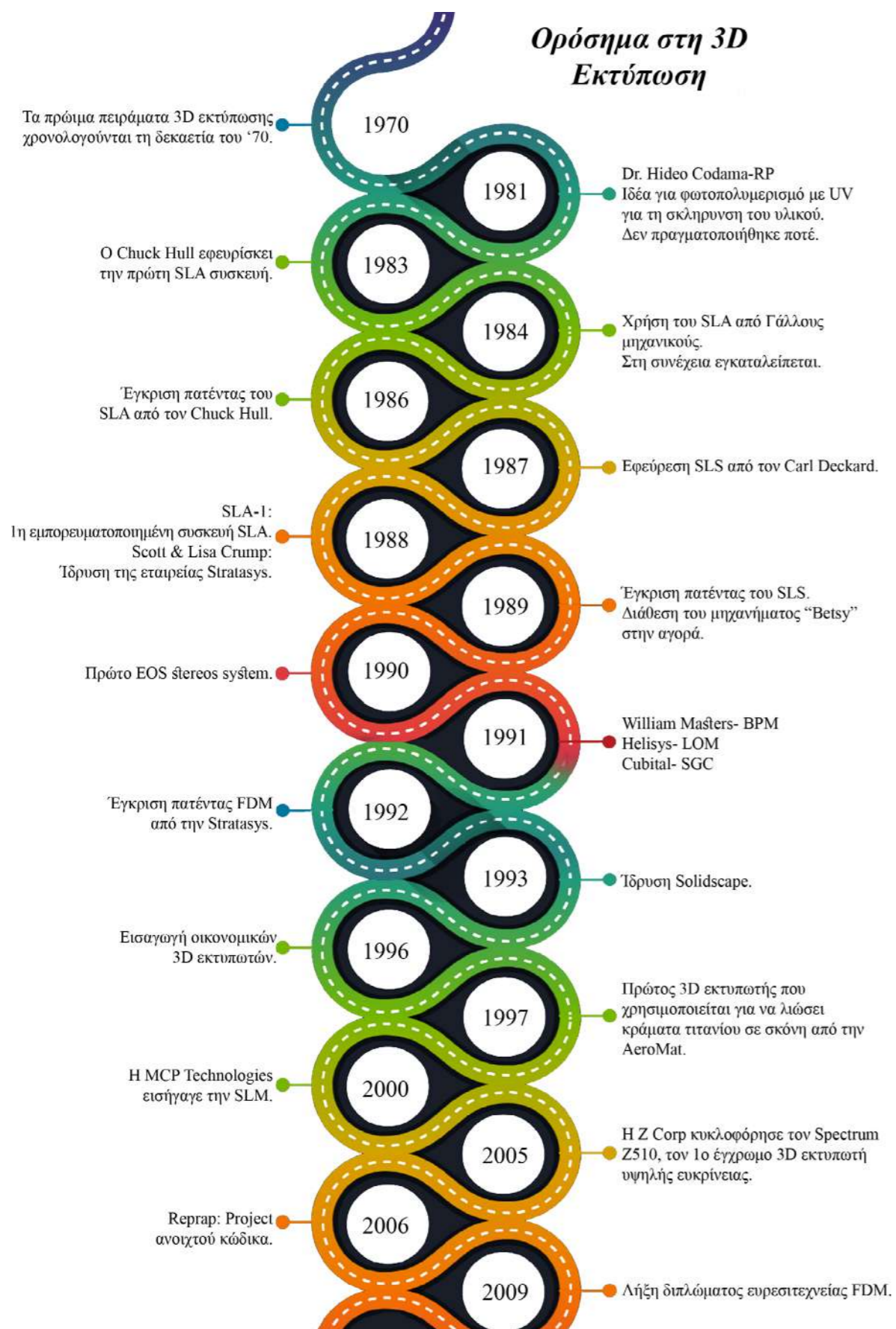
Πηγή: <https://www.sculpteo.com/wp-content/uploads/2019/11/History-3DP-blog-min.jpg>

Ο Carl Deckard, ο οποίος εργαζόταν στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, δημοσίευσε το 1987 μία πατέντα ευρεσιτεχνίας τρισδιάστατης εκτύπωσης σε επάλληλα στρώματα. Πρόκειται για την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση λέιζερ (Selective Laser Sintering- SLS), η οποία εκδόθηκε το 1989, την ίδια χρονιά με ένα εμπορικό μηχάνημα που διατίθεται στο εμπόριο ως “Betsy”.

Ο Scott Crump εφηύρε μία άλλη τρισδιάστατη μέθοδο εκτύπωσης που λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της διαδοχικής στρωματικής κατασκευής, τη μοντελοποίηση εναπόθεσης τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling- FDM), η οποία αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1980 και διατέθηκε στο εμπόριο από την εταιρεία Stratasys που ίδρυσε μαζί με τη σύζυγό του Lisa Crump, το 1988 (Νικολαΐδης, 2018). Η πατέντα εκδόθηκε το 1992. Η ανάπτυξη άλλων τεχνολογιών την ίδια εποχή, όπως οι διαδικασίες που βασίζονται σε λέιζερ και η κεφαλή inkjet τρισδιάστατης εκτύπωσης, οδήγησαν σε περαιτέρω εμπορευματοποίηση στη δεκαετία του 1990 (Gibson et al., 2010).

Η εταιρεία EOS χρησιμοποιώντας ως μέθοδο εκτύπωσης τη σύντηξη με λέιζερ (LS) πούλησε το πρώτο σύστημα (stereos) το 1990. Άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης με διπλώματα ευρεσιτεχνίας όπως η βαλλιστική κατασκευή σωματιδίων (BPM) από τον William Masters, η συγκόλληση λεπτών φύλλων για την δημιουργία πολυστρωματικών αντικειμένων (LOM) από την Helisys και η σκλήρυνση σε στερεό έδαφος (SGC) από την Cubital, έγιναν διαθέσιμες το 1991 (Vanderploeg et al., 2017) Το SGC εγκαταλείφθηκε το 1999 λόγω του υψηλού κόστους του που σχετίζεται με την πολύπλοκη παραγωγική λειτουργία (Levy et. al., 2003).

Το ιστορικό χρονοδιάγραμμα της πρώιμης ανάπτυξης στην τρισδιάστατη εκτύπωση φαίνεται παρακάτω.



Καθώς περνούσε ο καιρός, εφευρέθηκαν νέες μέθοδοι εκτύπωσης και οι υπάρχουσες έγιναν πιο εκλεπτυσμένες. Επιπλέον εισήχθησαν νέα υλικά, όπως κεραμικά και μέταλλα<sup>1</sup> και η τεχνολογία εξελίχθηκε σε ένα επίπεδο, όπου η ποιότητα των εκτυπωμένων προϊόντων ήταν αρκετά υψηλή για την παραγωγή τελικών προϊόντων.

Η φθίνουσα τιμή των τρισδιάστατων εκτυπωτών χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας και της κατάρτησης πολλών διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, καθώς και η μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση τους αποτέλεσαν ισχυρό κίνητρο τόσο για τους επαγγελματίες (σχεδιαστές και μηχανικούς) όσο και για τους ερασιτέχνες. Σήμερα, υπάρχει μεγάλη ποικιλία τρισδιάστατων εκτυπωτών που είναι εμπορικά διαθέσιμοι· από μικρούς και οικονομικούς επιτραπέζιους εκτυπωτές, έως βιομηχανικής κλίμακας, ικανούς να παράγουν σε μεγάλη κλίμακα με ευρύτερο φάσμα υλικών. Ανάλογα με το προς εκτύπωση αντικείμενο και τις προδιαγραφές του εκτυπωτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί τεχνικών και υλικών. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές αποτελούν σήμερα ένα βιομηχανικό- ακαδημαϊκό ερευνητικό εργαλείο, αλλά και ένα εμπορικό προϊόν διαθέσιμο για οικιακή χρήση.

### ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Εξ' ορισμού ως μια συσκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης ονομάζεται μια συσκευή εξόδου ενός υπολογιστικού συστήματος, η οποία έχει ως σκοπό την μόνιμη εκτύπωση πληροφοριών που έχουν δημιουργηθεί με χρήση κατάλληλου λογισμικού (CAD) (Rouse, 2023). Έτσι λοιπόν όπως ένας εκτυπωτής γραφείου μεταφέρει πληροφορίες από το λογισμικό στο χαρτί, αντίστοιχα και ο τρισδιάστατος εκτυπωτής μεταφέρει τις πληροφορίες που λαμβάνει από το λογισμικό σχεδίασης στην πλατφόρμα κατασκευής. Κάθε τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει τους δικούς της περιορισμούς σχεδιασμού και κατασκευής που σχετίζονται με τη μέθοδο εκτύπωσης, το επιλεγμένο υλικό και το προσδοκώμενο αποτέλεσμα (αισθητική, μηχανική συμπεριφορά, χρήση).

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να ταξινομηθούν οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι πιο δημοφιλείς προσεγγίσεις τις ταξινομούν είτε σύμφωνα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν (λείζερ, ψεκασμό (inkjet), εξώθηση κ.ά.), είτε με τη μορφή της πρώτης ύλης. Η πρώτη ύλη εντάσσεται σε μία από τις

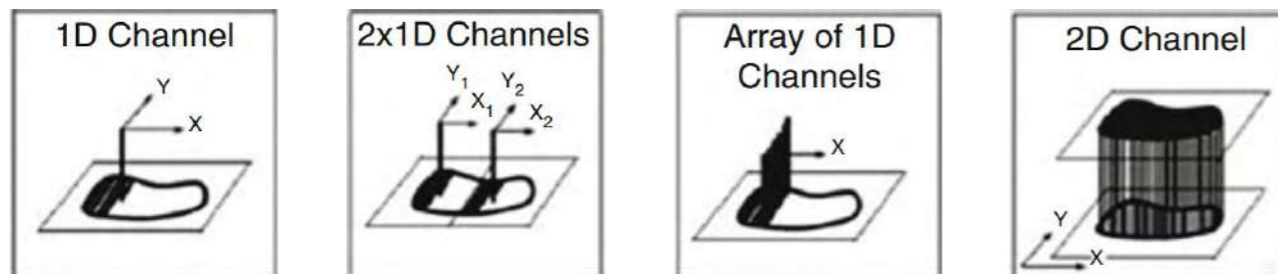
<sup>1</sup> Η εταιρεία i.materialise γίνεται η πρώτη υπηρεσία τρισδιάστατης εκτύπωσης σε όλο τον κόσμο που προσφέρει χρυσό 14 καρατιών και ασήμι ως υλικά, ανοίγοντας έτσι μια νέα και λιγότερο δαπανηρή επιλογή κατασκευής για τους σχεδιαστές κοσμημάτων.



τέσσερις βασικές κατηγορίες: ρευστή (liquid), κονιοποιημένη- σε σκόνη (powder), στερεά (solid), ή σε φύλλα (sheet).

Παρατηρείται ακόμα ότι ένα στρώμα υλικού μπορεί να δημιουργηθεί είτε τμηματικά με τη χρήση ενός ή και περισσότερων μηχανισμών προσθήκης είτε ενιαία, χρησιμοποιώντας τεχνικές πλήρους αποτύπωσης. Επιπλέον, όσον αφορά τη μέθοδο σχηματισμού του στρώματος εντοπίζονται τρεις κατηγορίες, που αφορούν κυρίως στον αριθμό των πηγών που επεξεργάζονται ή προσθέτουν υλικό. Ένα στρώμα υλικού μπορεί να δημιουργηθεί από μια πηγή που σαρώνει την επιφάνεια του στρώματος (1D), από συστοιχία πηγών σε ευθεία που σαρώνουν την επιφάνεια του στρώματος (Array of 1D), ή από δισδιάστατη πηγή (2D), όπου κάθε στρώμα μορφοποιείται στο σχήμα της αντίστοιχης διατομής, χωρίς σάρωση, κοπή ή εναπόθεση (στην παρούσα φάση, χρησιμοποιούνται κυρίως προβολείς DLP (Digital Light Processing) για τη στερεοποίηση μιας στρώσης φωτοπολυμερούς). Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι πηγές έχουν την τάση να αυξάνουν, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ταχύτητα κατασκευής. Με βάση τα παραπάνω παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης για την καλύτερη κατανόηση των εναλλακτικών τρόπων κατασκευής ενός αντικειμένου (Γιαννατσής κ.ά., 2016).

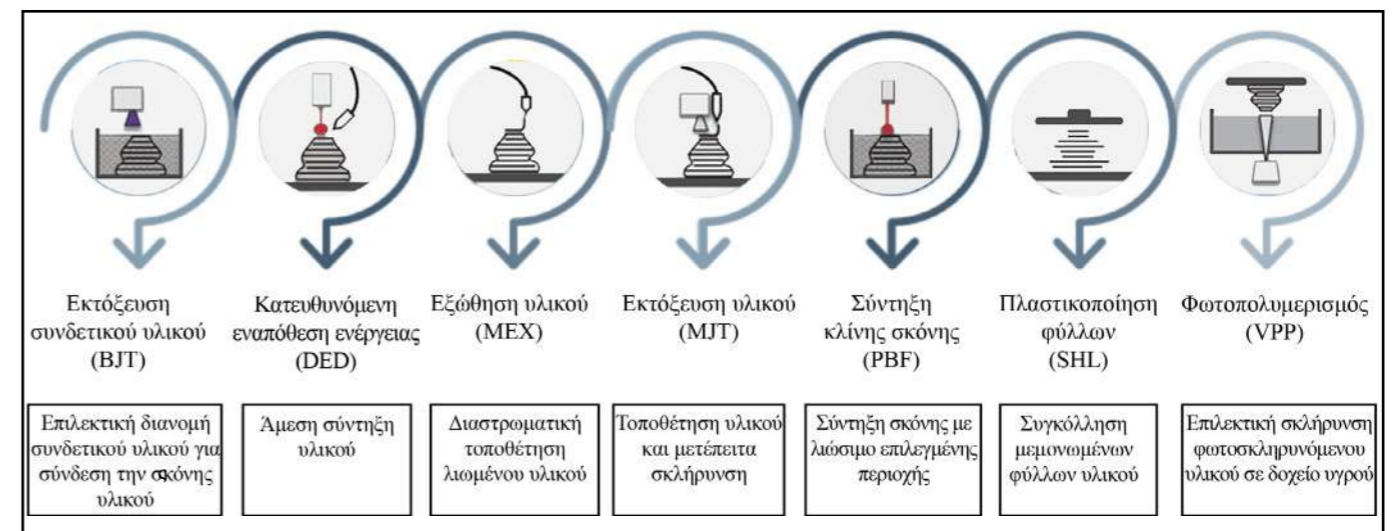
Μορφή πρώτης ύλης	Από μία κινούμενη ακτίνα/ κεφαλή	Τεχνική επεξεργασίας υλικού Συστοιχία ακτίνων/κεφαλών	Επεξεργασία ολόκληρης διατομής
<b>Ρευστή/Πάστα Πούδρα/Κόκκοι</b>	Stereolithography Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Laser Powder Forming	Polyjet 3D Printing 3D Printing, Binder Jetting	DLP Printing
<b>Στερεά/Νήμα</b>	Fused Deposition Modeling, Fused Filament Fabrication	Multi Jet Modeling	
<b>Φύλλα</b>	Laminated Object Manufacturing, Paper Lamination Technology, Selective Deposition Lamination		



Ταξινόμηση των τεχνολογιών 3DP με βάση τη μορφή της πρώτης ύλης και την τεχνική επεξεργασίας υλικού  
 Πηγή: <https://kgut.ac.ir/useruploads/1523430527968ggi.pdf>

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900, οι διαδικασίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν κατηγοριοποιηθεί σε 7 κύριες κατηγορίες, στις οποίες εμπίπτουν όλες οι μορφές τρισδιάστατης εκτύπωσης (ISO/ASTM, 2015, ISO/ASTM FDIS 52900 2019):

- Εκτόξευση συνδετικού υλικού (Binder Jetting- BJT),
- Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition- DED),
- Εξώθηση υλικού (Material Extrusion- MEX),
- Εκτόξευση υλικού (Material Jetting- MJT),
- Σύντηξη κλίνης σκόνης (Powder Bed Fusion- PBF),
- Πλαστικοποίηση φύλλων (Sheet Lamination- SHL) και
- Φωτοπολυμερισμός (VAT Polymerization- VPP).



7 βασικές κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM F2792.

Μερικά από τα δημοφιλή εμπορικά παράγωγά τους είναι τα SLA, SLS, SLM, FDM, DLP, Polyjet, DMLS και EBM (Ahart, 2019).

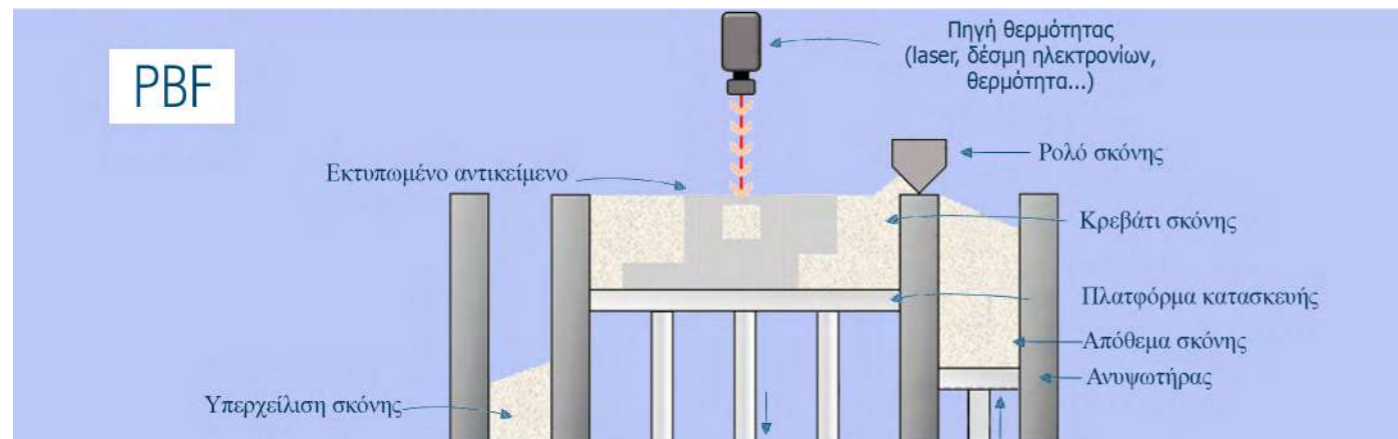
## ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΕΙΣΟΔΟΥ

### ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ ΣΕ ΚΟΚΚΟΥΣ



- Διεργασίες σύντηξης πούδρας υλικού σε κλίνη  
**Powder Bed Fusion- PBF**

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία συστημάτων προσθετικής κατασκευής που επεξεργάζονται υλικά σε μορφή κόκκων. Πρόκειται για μία διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιείται θερμική ενέργεια για την επιλεκτική σύντηξη σκόνης υλικού (Ventola, 2014, Gebhardt et al., 2019). Οι δύο κυρίαρχοι τύποι είναι η σύντηξη με δέσμη λέιζερ (PBF-LB) και η σύντηξη με δέσμη ηλεκτρονίων (PBF-EB). Περιλαμβάνει τις τεχνικές DMLS- Direct metal laser sintering, EBM- Electron beam melting, SLS- Selective laser sintering, SHS- Selective heat sintering, SLM- Selective laser melting (Tiwari et al., 2015) ενώ καλύπτει και τις διαδικασίες πυροσυσσωμάτωσης και τήξης.



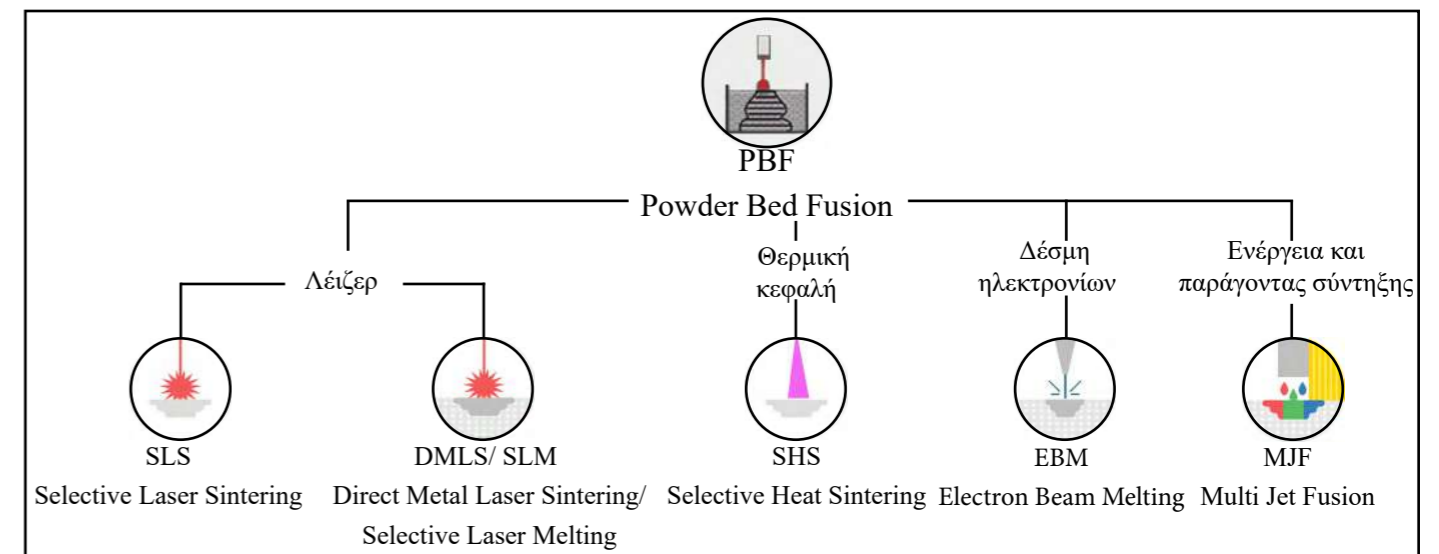
Τα μέρη ενός εκτυπωτή σύντηξης πούδρας υλικού

Πηγή: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/powder-bed-fusion-3d-printing/>

Όλες οι τεχνικές έχουν παρόμοια μέθοδο λειτουργίας: μία λεπίδα ή ένας κύλινδρος εναποθέτουν ένα λεπτό στρώμα σκόνης στην πλατφόρμα κατασκευής, ενώ μία χοάνη ή δεξαμενή κάτω από την πλατφόρμα, παρέχει νέο υλικό για την προσθήκη νέων στρωμάτων. Στη συνέχεια, η πηγή θερμότητας σαρώνει την επιφάνεια σκόνης θερμαίνοντας επιλεκτικά τα σωματίδια τα οποία συγχωνεύονται μεταξύ τους. Μόλις σαρωθεί ένα στρώμα ή μια διατομή από την πηγή θερμότητας, η πλατφόρμα μετακινείται προς τα κάτω και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για να δημιουργηθεί το επόμενο στρώμα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας όγκος που περιέχει ένα ή περισσότερα συντηγμένα μέρη που περιβάλλονται από σκόνη. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή, το κρεβάτι ανυψώνεται πλήρως, η περίσσεια σκόνη και πιθανές δομές στήριξης αφαιρούνται και

αν απαιτείται ακολουθεί περαιτέρω επεξεργασία (Gibson et al., 2010).

Μέσω της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης λέιζερ (SLS), όπου χρησιμοποιείται μια δέσμη λέιζερ για τη μερική τήξη των σωματιδίων και τη σύντηξη μεταξύ τους, μπορούν να εκτυπωθούν αντικείμενα από σκόνη πλαστικού, κεραμικών, άμμου, κεριού και μετάλλου. Οι τεχνολογίες άμεσης πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ μετάλλων (DMLS), επιλεκτικής τήξης με λέιζερ (SLM) και τήξης δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) χρησιμοποιούν μόνο μεταλλικές σκόνες οι οποίες λιώνουν πλήρως. Οι τεχνολογίες που βασίζονται σε πολυμερή προσφέρουν μεγάλη σχεδιαστική ελευθερία, καθώς λόγω του ότι δεν υπάρχει ανάγκη υποστήριξης, επιτρέπουν την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών.



Τόσο τα μεταλλικά όσο και τα πλαστικά μέρη έχουν συνήθως πολύ υψηλή αντοχή και ακαμψία, ενώ οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι συγκρίσιμες (ή και ακόμη καλύτερες) με το αρχικό υλικό. Η υψηλή ανάλυση και ποιότητα εκτύπωσης είναι τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου, που την καθιστούν κατάλληλη για δημιουργία σύνθετων κατασκευών. Ακόμα, το στρώμα πούδρας χρησιμοποιείται ως στήριγμα, γεγονός που ξεπερνά τις δυσκολίες στην αφαίρεση του υλικού στήριξης.

Οι περιορισμοί της μεθόδου συχνά επικεντρώνονται στην αργή παραγωγή, το υψηλό κόστος και το υψηλό πορώδες όταν η σκόνη συντήκεται με ένα συνδετικό υλικό (Casini, 2022). Ακόμα, μπορεί να παρατηρηθεί συρρίκνωση ή παραμόρφωση κατά την επεξεργασία και προκλήσεις που σχετίζονται με το χειρισμό της σκόνης. Υπάρχει μια μεγάλη γκάμα διαθέσιμων μεθόδων μετα-επεξεργασίας, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να επιτευχθεί ένα πολύ λείο φινιρίσμα στα τελικά προϊόντα διορθώνοντας την τραχύτητα της επιφάνειας.



• **Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ**  
**Selective Laser Sintering- SLS**

Η διαδικασία εκτυλίσσεται σε μία πλατφόρμα κατασκευής που βρίσκεται σε θάλαμο CO<sub>2</sub> ελεγχόμενης θερμοκρασίας, με θερμοκρασία μερικούς βαθμούς κάτω από το σημείο τήξης του υλικού. Κάθε στρώση αντιπροσωπεύει μια οριζόντια τομή του αντικειμένου σύμφωνα με το ψηφιακό αρχείο (Das, 2003). Το αντικείμενο δημιουργείται μέσω της επαναληπτικής απόθεσης λεπτών στρώσεων υλικού σε κόκκους και της θέρμανσής τους με λείζερ ισχύος 30-200W, αναλόγως το υλικό, στα επιθυμητά σημεία. Ορισμένα μηχανήματα παρακολουθούν τη θερμοκρασία σε κάθε στρώμα και προσαρμόζουν την ισχύ του λείζερ για να βελτιώσουν την ποιότητα του αντικειμένου. Κατά την διαδικασία, η σκόνη θερμαίνεται σε σημείο που μπορεί να συγχωνευθεί σε μοριακό επίπεδο (Νικολαΐδης, 2018). Αφού εκτυπωθεί το αντικείμενο, είναι απαραίτητο να κρυώσει επαρκώς για να διασφαλιστούν οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες και να αποφευχθεί η παραμόρφωση. Ο χρόνος ψύξης είναι ανάλογος του χρόνου κατασκευής.

Αυτή η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα επιλογής από μια ευρεία γκάμα πρώτων υλών. Συνήθως πυροσυσσωματώνει κονιοποιημένα πολυμερή υλικά όπως νάιλον και πολυαιθερκετονεκετόνη (PEKK). Το πιο συνηθισμένο υλικό που χρησιμοποιείται είναι το νάιλον (PA6, PA12), συνθετικό θερμοπλαστικό πολυμερές που ανήκει στην οικογένεια των πολυαμιδίων. Το νάιλον μπορεί να αναμιχθεί με αλουμίνιο, γυαλί ή ανθρακονήματα, για καλύτερη αντοχή, ακαμψία ή ευκαμψία.<sup>2</sup> Επίσης, οι προεξοχές που ενδέχεται να έχει ένα σχέδιο δεν χρειάζονται υποστηρικτικό υλικό, διότι στηρίζονται στα προηγούμενα στρώματα ανεπεξέργαστων κόκκων που περιβάλλουν το αντικείμενο. Ακόμα, με τη μέθοδο SLS, είναι δυνατό να εκτυπωθούν πολλά αντικείμενα ανά εκτύπωση, μειώνοντας έτσι το συνολικό χρόνο εκτύπωσης.

<sup>2</sup> Στην πιο διαδεδομένη παραλλαγή της μεθόδου η πρώτη ύλη αποτελείται από κόκκους μετάλλου (τιτάνιο, χάλυβας, κράματα μετάλλων) οι οποίοι διαθέτουν επικάλυψη θερμοπλαστικού υλικού. Για την κατασκευή του αντικειμένου χρησιμοποιείται μία διαδικασία έμμεσης (πυρο)συσσωμάτωσης δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο η δέσμη λείζερ παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια προκειμένου το συνθετικό υλικό να λιώσει και να επιτευχθεί μια σχετικά χαλαρή σύνδεση μεταξύ των κόκκων μετάλλου, το οποίο ονομάζεται και “πράσινο κομμάτι” (green part). Στη δεύτερη φάση κατεργασίας, το “πράσινο κομμάτι” υφίσταται επεξεργασία σε κατάλληλο κλίβανο, όπου το συνδετικό υλικό καίγεται και μεταξύ των μεταλλικών κόκκων διαμορφώνεται ένας ισχυρότερος συνεκτικός δεσμός που ονομάζεται “καφέ κομμάτι” (brown part). Καθώς είναι αρκετά πορώδες, προστίθεται ένα δεύτερο υλικό, ο μεταλλικός διηθητής (infiltrator) ο οποίος υγροποιείται υπό την υψηλή θερμοκρασία του φούρνου παρέχοντας σχετικά υψηλή μηχανική αντοχή.

Η τεχνολογία SLS επιλέγεται για εφαρμογές που απαιτούν πολύπλοκη γεωμετρία, λεπτομέρεια και ανθεκτικότητα. Τα παραγόμενα μέρη έχουν υψηλή πυκνότητα, αντοχή και ιστροπικές μηχανικές ιδιότητες. Ανάλογα με το υλικό, μπορεί να επιτευχθεί πυκνότητα έως και 100% με ιδιότητες υλικού συγκρίσιμες με εκείνες των συμβατικών μεθόδων κατασκευής (Shaw, 2016). Η ποιότητα της επιφάνειας είναι αξιοπρεπής, αλλά επιδέχεται μετέπειτα επεξεργασία γυαλίσματος και επικάλυψης με βερνίκι (πάχους 0,1-0,3 mm) (Kruth et al., 2003) λόγω της κοκκοειδούς και τραχιάς επιφάνειας. Επομένως, απαιτείται η ύπαρξη ξεχωριστού εξοπλισμού για μεταεπεξεργασίες υλικών (Kim et al., 2019).

Η μέθοδος αυτή επιλέγεται, επειδή μπορεί να εκφράσει διάφορες υφές υλικών και να δημιουργήσει περίπλοκα σχήματα χωρίς υποστήριξη. Επιπρόσθετα, παρέχει υψηλή παραγωγικότητα και απόδοση και χαμηλό κόστος ανά εξάρτημα. Ωστόσο, χρησιμοποιείται περισσότερο για βιομηχανικούς σκοπούς λόγω της υψηλής τιμής και του μεγέθους του εκτυπωτή.

Στον τομέα της μόδας, το SLS έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σκληρών υφασμάτων που προορίζονται για την δημιουργία κοστούμιών όπερας (Saunders, 2021), αλλά και ορισμένων εύκαμπτων υφασμάτων από νάιλον (Digits2Widgets, 2021). Η Continuum σε συνεργασία με την Shapeways κατασκεύασε με SLS τυπωμένα μαγιό χρησιμοποιώντας Nylon 12 σύμφωνα με τις μετρήσεις του εκάστοτε πελάτη. Το προϊόν είχε αίσθηση υφάσματος με αδιάβροχες ιδιότητες (Hennessey, 2021). Επιπλέον, η Nike χρησιμοποίησε την τεχνική αυτή για να κατασκευάσει μέρη από τα παπούτσια ποδοσφαίρου Vapor Laser Talon και Vapor High Agility cleat (Fitzgerald, 2021, Dip, T. M et al., 2021).



• **Επιλεκτική Θερμοσυσσωμάτωση**  
**Selective Heat Sintering- SHS**

Η διαδικασία επιλεκτικής θερμοσυσσωμάτωσης (SHS) αναπτύχθηκε από τη δανέζικη εταιρεία Blueprinter και κυκλοφόρησε το 2011 ως μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική του SLS. Από το 2016, η Blueprinter κήρυξε πτώχευση, επομένως είναι εμπορικά μη διαθέσιμη επί του παρόντος. Παρόλα αυτά αξίζει να γίνει μία αναφορά και στην συγκεκριμένη τεχνολογία.

Η SHS χρησιμοποιεί μια θερμική κεφαλή εκτύπωσης για τη σύντηξη θερμοπλαστικής σκόνης, σε αντίθεση με το SLS που χρησιμοποιεί λείζερ. Ο εκτυπωτής του SHS μπορεί να είναι πολύ μικρότερος αλλά παρόμοιος σε μέγεθος με μεγαλύτερους τρισδιάστατους επιτραπέζιους εκτυπωτές και πολύ φθηνότερος, επειδή οι κεφαλές θερμικής εκτύπωσης είναι αρκετά πιο οικονομικές από τα λείζερ. Πρόκειται για μία πιο οικονομική λύση με πάχος στρώσης περίπου

0,1mm.

Χρησιμοποιεί μόνο θερμοπλαστική σκόνη, δημιουργώντας αντικείμενα ενός χρώματος (Cavallo, n.d.). Κατά την εκτύπωση το υλικό θερμαίνεται ακριβώς κάτω από το σημείο τήξης και τα σωματίδια σκόνης προσκολλώνται μεταξύ τους με πυροσυσσωμάτωση, μειώνοντας τα επίπεδα θερμότητας και ισχύος (“Powder Bed Fusion”, n.d.). Η διαδικασία δεν προτιμάται για δομικά στοιχεία.



- **Πυροσυσσωμάτωση μετάλλων**  
**Metal Sintering**

Η διαδικασία κατασκευής που χρησιμοποιεί λέιζερ υψηλής ισχύος για την τήξη της μεταλλικής σκόνης είναι στην πραγματικότητα γνωστή με πολλά ονόματα. Ορισμένοι κατασκευαστές τρισδιάστατων εκτυπωτών που ειδικεύονται σε αυτή την τεχνολογία την αποκαλούν “άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων” (DMLS), ενώ άλλοι την αποκαλούν “επιλεκτική τήξη με λέιζερ” (SLM). Μπορεί, επίσης, να αναφέρεται ως “άμεση τήξη με λέιζερ μετάλλων” (DMLM), ή “σύντηξη κρεβατιού με σκόνη λέιζερ” (LPBF).

- **Επιλεκτική Τήξη με Λείζερ**  
**Selective Laser Melting- SLM**

Πρόκειται για μία διαδικασία, κατά την οποία τα μεταλλικά σωματίδια θερμαίνονται μέχρι να λιώσουν πλήρως από μία δέσμη λέιζερ υψηλής ισχύος, χωρίς να χρειάζεται συνδετικό πολυμερές υλικό (Thymianidis et al., 2012). Αυτό εξασφαλίζει υψηλότερη ανάλυση, πυκνότητα και ταχύτητα κατασκευής σε σχέση με το SLS, αλλά με υψηλότερο ενεργειακό κόστος και χαμηλή ενεργειακή απόδοση (Gibson et al., 2010).

Το μέγεθος των προϊόντων περιορίζεται από τον όγκο του συστήματος που χρησιμοποιείται για εκτύπωση, ενώ όταν εκτυπώνονται πολύπλοκες γεωμετρίες χρειάζονται δομές στήριξης και συνεπώς περισσότερο υλικό και μεταεπεξεργασία. Πλέον υπάρχουν μηχανήματα με ισχυρή τεχνολογία διπλού ή πολλαπλών λέιζερ με στρώματα πάχους 0.03- 0.05 mm. Στη διαδικασία SLM μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως ο χάλυβας, κράματα χάλυβα, ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο και τα κράματά του, μπρούντζος, κοβάλτιο χρώμιο, τιτάνιο και τα κράματά του

(Νικολαΐδης, 2018), υπερκράματα με βάση το νικέλιο, χαλκός, βολφράμιο, πολύτιμα μέταλλα.

- **Άμεση (Πυρο)Συσσωμάτωση Κόκκων Μετάλλου με Λείζερ**  
**Direct Metal Laser Sintering- DMLS**

Αναπτύχθηκε περί το 1994 από τις εταιρείες Rapid Prototyping Innovations (RPI) και EOS GmbH. Πρόκειται για την πρώτη εμπορική μέθοδο παραγωγής αντικειμένων χωρίς την απαραίτητη χρήση συνδετικών υλικών ή διηθητών. Κατά την εκτύπωση, ένα λέιζερ υψηλής ισχύος σαρώνει την επιθυμητή διατομή και συσσωματώνει απευθείας τους κόκκους μετάλλου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να διατηρεί σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες της πρώτης ύλης.

Το επίπεδο λεπτομέρειας του τελικού προϊόντος εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει υψηλό κόστος και κατανάλωση ενέργειας και είναι σχετικά αργή. Ακόμα, το μέγεθος της εκτύπωσης περιορίζεται από τον εκτυπωτή, ενώ ενίοτε χρειάζονται δομές στήριξης. Παρόλα αυτά, υπάρχει μία ευρεία γκάμα υλικών όπως κράματα μετάλλων ή καθαρά μέταλλα: χάλυβας και τα κράματά του, ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο, τιτάνιο, κράματα νικελίου, κοβάλτιο- χρώμιο και πολύτιμα μέταλλα. Επιτυχώς μπορούν να εκτυπωθούν και μείγματα σκόνης όπως αλουμίνιο και νάιλον.

Τα μεταλλικά κράματα καθιστούν το DMLS αποτελεσματικό στην παραγωγή λειτουργικών εξαρτημάτων που είναι ταυτόχρονα ισχυρά και ανθεκτικά. Ωστόσο, τα εκτυπωμένα μέρη είναι πορώδη, γεγονός που μπορεί να ελεγχθεί αλλά όχι να εξαλειφθεί κατά τη διαδικασία ή κατά τη μετα-επεξεργασία.

Σε μία παραλλαγή της μεθόδου η τροφοδοσία της πρώτης ύλης γίνεται μέσω της κινούμενης κεφαλής, τεχνική η οποία προσφέρει θεωρητικά τη δυνατότητα χρήσης περισσότερων του ενός υλικών (Γιαννατσής κ.ά., 2016).

Συγκρίνοντας την άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων (DMLS) με την επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM), παρουσιάζονται πολλές ομοιότητες. Τόσο η διαδικασία DMLS όσο και η SLM παράγουν εξαρτήματα με εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες, συχνά ισχυρότερα από το ίδιο το συμβατικό μέταλλο, και καλά φινιρίσματα επιφανειών. Πρόκειται για διαδικασίες με υψηλό κόστος και περιορισμένο μέγεθος εκτύπωσης, που μπορούν όμως να εκτυπώσουν υλικά που είναι δύσκολο να επεξεργαστούν με άλλα μέσα. Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν δομές στήριξης λόγω των υψηλών εισροών θερμότητας που απαιτούνται από τη διαδικασία. Αυτές

οι δομές στήριξης αφαιρούνται στη συνέχεια στον αιθέρα μετά την επεξεργασία χειροκίνητα ή μέσω κατεργασίας CNC. Τέλος, τα μέρη μπορούν να υποβληθούν σε θερμική επεξεργασία για την απομάκρυνση των υπολειμματικών τάσεων.

Παρόλα αυτά, παρουσιάζουν και ορισμένες διαφορές. Ενώ το SLM λιώνει πλήρως τα μεταλλικά σωματίδια, το DMLS τα θερμαίνει μόνο μέχρι το σημείο της σύντηξης, όπου ενώνονται σε μοριακό επίπεδο. Καθώς το SLM πρόκειται να λιώσει και να στερεοποιήσει τελείως το υλικό στρώμα-στρώμα, μπορεί να δημιουργήσει μέρη που πλησιάζουν σε πλήρη πυκνότητα. Ακόμα, ενώ το SLM χρησιμοποιεί μία σκόνη μετάλλου κατά την εκτύπωση, η DMLS μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν συνδυασμό μεταλλικών σκονών για να εξασφαλίσει τις μηχανικές ιδιότητες του μεταλλικού εξαρτήματος. Τέλος, το SLM δημιουργεί αντικείμενα με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και πιο ομαλό φινίρισμα στην επιφάνειά τους.



### • Τήξη Δέσμης Ηλεκτρονίων Electron Beam Melting- EBM

Το 1993 ο Arcam σε συνεργασία με το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Chalmers στο Gothenburg κατέθεσε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σχετικά με τις αρχές του EBM. Το 1997 ιδρύθηκε η Arcam AB και η διαδικασία σταδιακά εμπορευματοποιήθηκε το 2002 (“What Is Electron Beam Melting (EBM)?”, n.d.).

Η διαδικασία χρησιμοποιεί μία δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας για να λιώσουν οι μεταλλικές σκόρες. Καθώς η διαδικασία βασίζεται στην αρχή των ηλεκτρικών φορτίων, τα υλικά που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι αγωγία. Οι σκόρες, επομένως, πρέπει να προέρχονται από μέταλλα: κράματα τιτανίου και χρωμίου- κοβαλτίου, ανοξειδωτο ατσάλι, αλουμίνιο και χαλκό (V, 2019). Τα προϊόντα που δημιουργούνται έχουν πολύ καλές ιδιότητες αντοχής και καλό φινίρισμα λόγω της ομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας κατά τη σύντηξη (Chua et al., 2010), καθιστώντας τη διαδικασία κατάλληλη για την κατασκευή εξαρτημάτων υψηλών προδιαγραφών. Αν και παράγει λιγότερο ακριβή εξαρτήματα από το SLS και το SLM, είναι ταχύτερο στην παραγωγή μεγαλύτερων αντικειμένων (“What Is Electron Beam Melting (EBM)?”, n.d.).

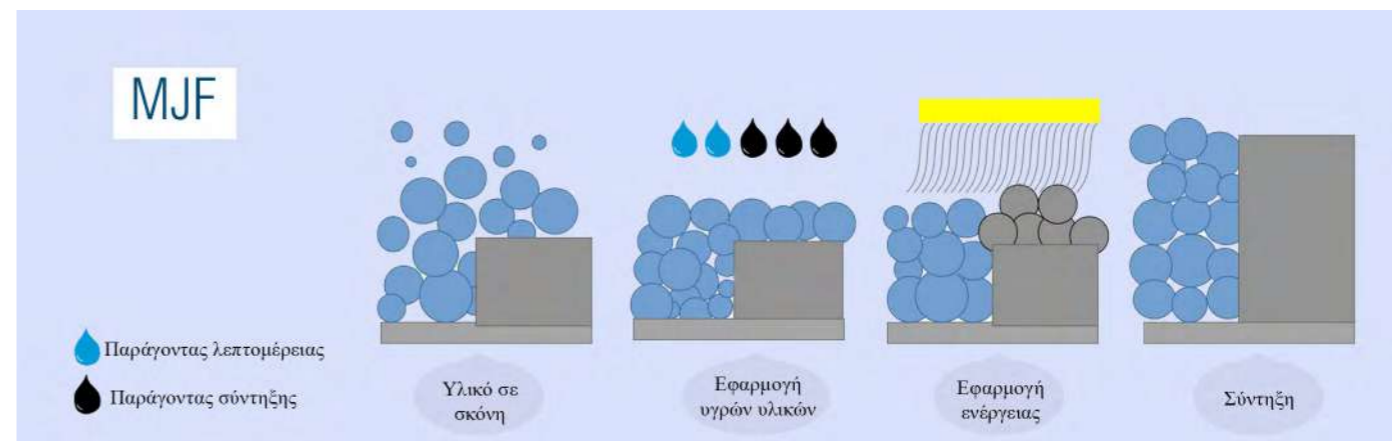
Συμπερασματικά, η άμεση πυροσυσσώματωση με λέιζερ μετάλλων (DMLS), η επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM) και οι διεργασίες σύντηξης πούδρας υλικού σε κλίνη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) είναι παρόμοιες με το SLS, με τη διαφορά ότι αυτές οι διαδικασίες δημιουργούν μέρη από μέταλλο, χρησιμοποιώντας ένα λέιζερ για τη συγκόλληση σωματιδίων σκόνης μεταξύ τους.



### • Multi Jet Fusion- MJF

Το Multi Jet Fusion αποτελεί έναν ξεχωριστό τύπο τρισδιάστατης εκτύπωσης, ο οποίος μπορεί να ενταχθεί στην κατηγορία PBF. Πρόκειται για μία τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που περιλαμβάνει ένα στρώμα από υλικό σε σκόνη, ένα υγρό υλικό σύντηξης και ένα υγρό υλικό λεπτομέρειας. Ο λόγος που δεν εντάσσεται στην τεχνολογία binder jetting είναι η προσθήκη θερμότητας στη διαδικασία, η οποία δημιουργεί μέρη με πολύ μεγαλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα, ενώ το υγρό δεν είναι ακριβώς συνδετικό. Η διαδικασία πήρε το όνομά της από τις πολλαπλές κεφαλές inkjet που πραγματοποιούν τη διαδικασία εκτύπωσης.

Στη διαδικασία εκτύπωσης MJF, ο εκτυπωτής απλώνει ένα στρώμα σκόνης υλικού, συνήθως νάιλον, στο κρεβάτι εκτύπωσης. Μετά από αυτό, μια κεφαλή inkjet διατρέχει τη σκόνη και εναποθέτει πάνω της τόσο έναν παράγοντα σύντηξης όσο και έναν παράγοντα λεπτομέρειας. Στη συνέχεια, μια μονάδα υπέρυθρης θέρμανσης μετακινείται κατά μήκος της εκτύπωσης. Στα σημεία που έχει προστεθεί ο παράγοντας σύντηξης, το υποκείμενο στρώμα σκόνης λιώνει μαζί, ενώ στις περιοχές με τον παράγοντα λεπτομέρειας η σκόνη παραμένει ως έχει. Το στρώμα σκόνης στηρίζει την κατασκευή κατά την εκτύπωση. Μετά το πέρας της διαδικασίας ολόκληρη η πλατφόρμα εκτύπωσης μεταφέρεται σε ξεχωριστό σταθμό επεξεργασίας όπου η σκόνη απορροφάται με ηλεκτρική σκούπα, επιτρέποντάς της να επαναχρησιμοποιηθεί.



Multi Jet Fusion- MJF  
(Εικόνα ιδιόχειρης επεξεργασίας)

Το Multi Jet Fusion αποτελεί μία αρκετά γρήγορη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης που παράγει προϊόντα από νάilon, με πάχος στρώσης 0.08mm. Πρόκειται για μία μέθοδο που μοιάζει αρκετά με το SLS. Η βασική διαφορά τους είναι στην τεχνολογία που χρησιμοποιούν. Ενώ το SLS χρησιμοποιεί λέιζερ, το MJF χρησιμοποιεί μια συστοιχία inkjet για την επιλεκτική εφαρμογή παραγόντων σύντηξης.

Και οι δύο μέθοδοι παράγουν αντικείμενα με ομοιόμορφες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση. Μολονότι οι δομές που εκτυπώνονται με SLS τείνουν να είναι ισχυρότερες και πιο ανθεκτικές λόγω της διαφορετικής διαδικασίας σύντηξης, αυτές που εκτυπώνονται με MJF παρουσιάζουν ποιοτικότερο φινίρισμα.

Το SLS προσφέρει μια ευρύτερη γκάμα υλικών, ενώ τα εκτυπωμένα μέρη μπορούν να βαφτούν σε διάφορα χρώματα. Αντίθετα, το MJF παράγει αντικείμενα μόνο από νάilon τα οποία μετά την εκτύπωση έχουν γκρι χρώμα και μπορούν να βαφτούν μαύρα για βελτιωμένη εμφάνιση. Τέλος, το μέγεθος εκτύπωσης είναι μεγαλύτερο με τους εκτυπωτές SLS.



Εκτύπωση με MJF και SLS αντίστοιχα.

Πηγή: <https://www.protolabs.com/resources/blog/comparing-multi-jet-fusion-to-selective-laser-sintering/>

## ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ ΣΕ ΦΥΛΛΑ



- **Στρωματοποίηση φύλλων**  
**Sheet lamination- SHL**

Πρόκειται για ακόμα μία διαστρωματική προσέγγιση, κατά την οποία φύλλα υλικού συγκολλούνται για να σχηματίσουν ένα μέρος (ISO/ASTM, 2021). Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί μια ποικιλία υλικών, όπως μέταλλο, χαρτί, πολυμερή ή σύνθετα υλικά. Το SHL περιλαμβάνει ένα στρώμα υλικού που προσκολλάται σε ένα άλλο χρησιμοποιώντας μια διαδικασία κόλλησης ή συγκόλλησης. Αν και παράγει εξαρτήματα με μικρή ανάλυση, το χαμηλό κόστος και ο ταχύτερος χρόνος κατασκευής επιτρέπουν την κατασκευή πρωτοτύπων από υλικά χαμηλού κόστους.

Η πλαστικοποίηση φύλλων μπορεί να υποδιαιρεθεί σε ομάδες με βάση το δομικό υλικό που χρησιμοποιείται (χαρτί, πλαστικό, πολυμερές, κεραμικό, μέταλλο, σύνθετα υλικά από υφαντές ίνες) ή με βάση τις μεθόδους διαμόρφωσης (CNC, κοπή με λέιζερ ή υδροβολή). Μπορούν, επίσης, να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω με βάση την τεχνική που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση των φύλλων μεταξύ τους, όπως η χρήση κόλλας, η θερμική συγκόλληση και η συγκόλληση με υπερήχους. Επιπλέον, υπάρχουν παραλλαγές στη διαδικασία κατασκευής. Στη διαδικασία “Form then Bond” το φύλλο υλικού κόβεται στο επιθυμητό σχήμα και στη συνέχεια συγκολλείται στη βάση ή στο προηγούμενο στρώμα για να δημιουργηθεί η τρισδιάστατη γεωμετρία. Αντίστοιχα στη διαδικασία “Bond then Form”, τα στρώματα του φύλλου πρώτα συγκολλούνται μεταξύ τους και στη συνέχεια γίνεται η κοπή.

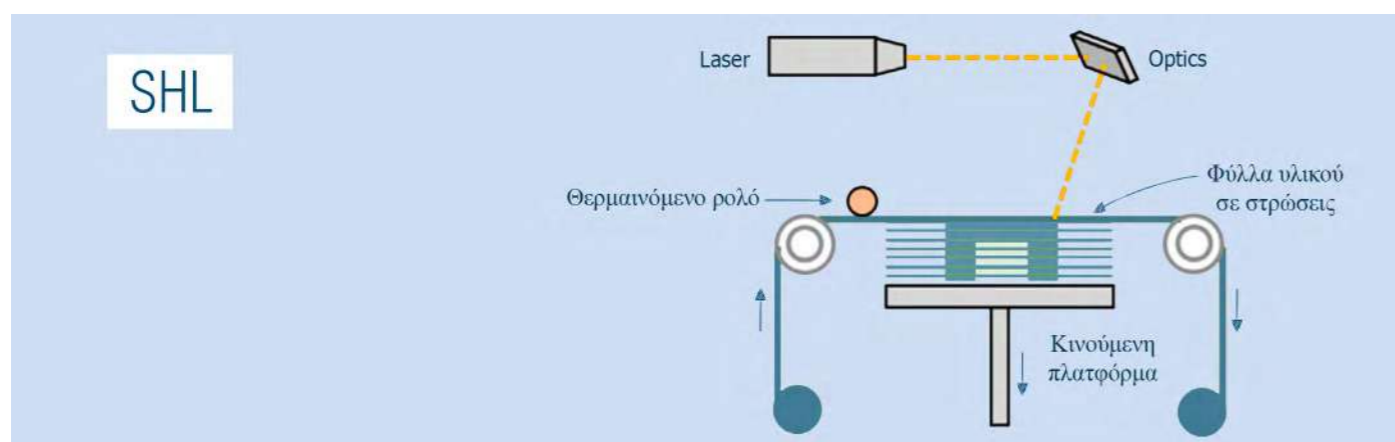
Η στρωματοποίηση φύλλων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στους ακόλουθους τύπους:

- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Selective Lamination Composite Object Manufacturing (SLCOM)
- Plastic Sheet Lamination (PSL)
- Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials (CAM-LEM)
- Selective Deposition Lamination (SDL)
- Composite Based Additive Manufacturing (CBAM)
- Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)

Κατά την κατασκευή, ένα λεπτό φύλλο υλικού τροφοδοτείται από τον κύλινδρο ή τοποθετείται στην πλατφόρμα κατασκευής. Το SDL και το UAM συνδέουν τα στρώματα μεταξύ τους και κόβουν το τρισδιάστατο σχήμα στο τέλος, ενώ το CAM-LEM κόβει τα στρώματα στο επιθυμητό σχήμα και στη συνέχεια τα συνδέει μεταξύ τους. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι στρώσεις για να επιτευχθεί το πλήρες ύψος. Στη συνέχεια αφαιρούνται όλα τα ανεπιθύμητα τμήματα και αποκαλύπτεται το τρισδιάστατο αντικείμενο.

Το πιο κοινό υλικό είναι το χαρτί με προ-εφαρμοσμένη κόλλα, η οποία ενεργοποιείται με θερμότητα και πίεση. Τα πολυμερή φύλλα χρησιμοποιούν θερμότητα και πίεση χωρίς κόλλα, τα μεταλλικά συνδέονται με συγκόλληση με υπερήχους, ενώ υλικά με βάση ίνες και κεραμικά υλικά χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια με τη μορφή ψησίματος.

Για έγχρωμες εκτυπώσεις χρησιμοποιούνται τεχνικές που βασίζονται σε χαρτί, όπως η LOM και η SDL.



Διαδικασία στρωματοποίησης φύλλων- SHL

Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13\\_W640.jpg](https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13_W640.jpg)

Η διαδικασία είναι ταχύτερη και οικονομικότερη, ενώ το εύρος κατασκευής μεγαλύτερο σε σχέση με άλλες μεθόδους κατασκευής. Δεν χρειάζονται δομές στήριξης, αλλά χρειάζεται μετα-επεξεργασία ενώ η αφαίρεση της περίσσειας υλικού μπορεί να είναι δύσκολη. Ο εγκιβωτισμός του τελικού αντικειμένου δημιουργεί προβλήματα μετέπειτα κατά τη διαδικασία καθαρισμού, η οποία εκτελείται χειρωνακτικά και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για να μην τραυματιστούν κάποιες εύθραυστες περιοχές του εξαρτήματος. Το αντικείμενο που προκύπτει μπορεί κατόπιν να επικαλυφθεί με ένα στεγανωτικό υλικό, ώστε να προφυλαχθεί από την υγρασία (Γιαννατσής κ.ά, 2016).

Τα απορρίμματα που δημιουργούνται είναι πολλά σε σύγκριση με άλλες μεθόδους και μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να ανακυκλωθούν. Το κόστος αυτού του άχρηστου υπολείμματος μπορεί να είναι σημαντικό, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται υλικά πιο ακριβά από το χαρτί. Ακόμα, το ύψος του στρώματος δεν μπορεί να αλλάξει χωρίς αλλαγή του πάχους του φύλλου. Επομένως η ανάλυση του τμήματος συνδέεται με το πάχος του φύλλου κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα κατασκευής. Τέλος, ορισμένες γεωμετρίες, όπως κοίλα μορφολογικά χαρακτηριστικά με κλειστούς όγκους, είναι δύσκολο να δημιουργηθούν, καθώς το ανεπιθύμητο υλικό παγιδεύεται στο εσωτερικό των κοιλοτήτων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η συγκόλληση δεν έχει αντοχή στον χρόνο (“What Is Sheet Lamination?,” n.d.). Επομένως, η μέθοδος δεν είναι τόσο αποτελεσματική στη δημιουργία σύνθετων προϊόντων σε σύγκριση με άλλες διαθέσιμες τεχνικές (Vanderploeg et al., 2017).

Οι κύριες παράμετροι ελέγχου αυτής της μεθόδου είναι η θερμοκρασία ρολού, η ταχύτητα πλαστικοποίησης, η ταχύτητα και η ισχύς του λέιζερ, η διάσταση του στρώματος και η γωνία προσανατολισμού (Carneiro et al., 2015).

Διαδικασία	Επιλογές υλικού
LOM	Χαρτί, πολυμερή, κεραμικά, μέταλλα και σύνθετα υλικά
PSL	Πολυμερή
SLCOM	θερμοπλαστικά ως βασικό υλικό και σύνθετα υλικά υφαντών ινών . Ίνα άνθρακα, Fiberglass, Aramid Fiber (δηλαδή Kevlar), PBO (δηλαδή Zylon), μαζί με μεταλλικές ίνες όπως χάλυβας, αλουμίνιο ή τιτάνιο
CAM-LEM	Κεραμικά: Αλουμίνα(ή οξειδίο του αργιλίου), ζirkόνιο, αλουμίνα σκληρυμένη με ζirkόνιο (ZTA), πυρίτιο και μια ποικιλία από οξειδία και μη οξειδία κεραμικών.
SDL	Χαρτί
CBAM	Υφάσματα από μακριές ίνες συγκολλημένα με θερμοπλαστικά. Ανθρακονήματα σε συνδυασμό είτε με Nylon12, PEEK και ίνες γυαλιού με Nylon 12 και PEEK
UAM	Μέταλλα που συγκολλούνται με υπερήχους. κράματα αλουμινίου, κράματα νικελίου, ορείχαλκος και χάλυβες κ.λπ.
VLM	φωτοευαίσθητες ρητίνες υψηλού ιξώδους με δυνατότητα συνδυασμού διαφορετικών ρητινών για εξαρτήματα πολλαπλών υλικών.

Μέθοδοι που χρησιμοποιούν φύλλα υλικού για την δημιουργία 3D αντικειμένων.

**ΡΕΥΣΤΗ ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ**



**• ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ  
Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΡΗΤΙΝΗΣ**

**VAT Photopolymerization- VPP**

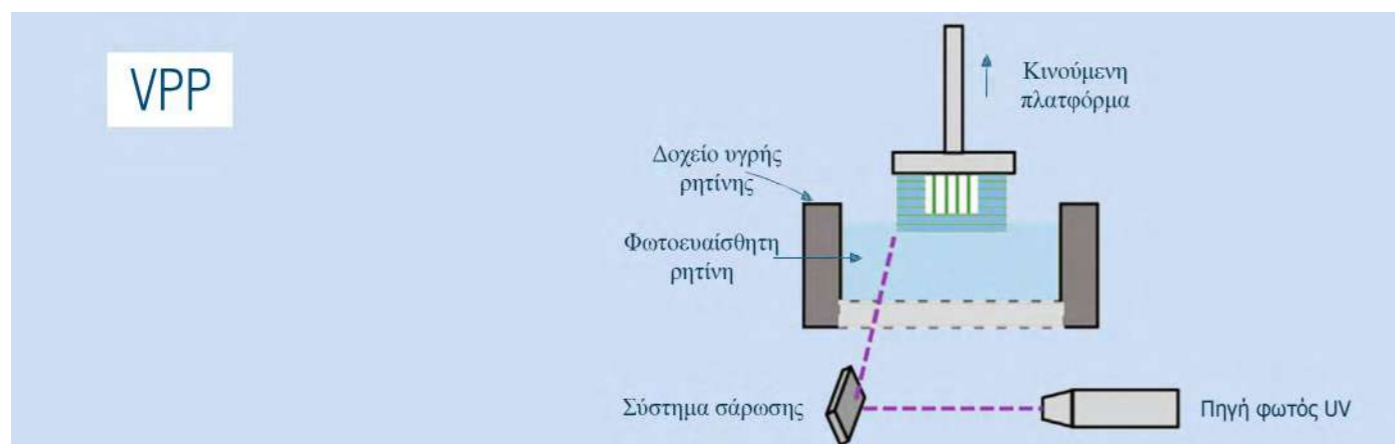
Διεργασία κατά την οποία υγρό φωτοπολυμερές σε μια δεξαμενή σκληρύνεται επιλεκτικά με πολυμερισμό ενεργοποιούμενο από το φως.

Πρόκειται για τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούν ρευστή πρώτη ύλη για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Για την κατασκευή χρησιμοποιείται μία δεξαμενή υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης (φωτοπολυμερές) ή κεραμική σκόνη αναμειγμένη με φωτοπολυμερή ρητίνη (Low et al., 2017), που έχει την ιδιότητα να στερεοποιείται με την έκθεση σε ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος (λείζερ, ορατό ή υπεριώδες φως). Καθώς η διαδικασία χρησιμοποιεί υγρό για να σχηματίσει αντικείμενα, δεν υπάρχει δομική υποστήριξη από το υλικό κατά την κατασκευή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται συχνά πρόσθετες δομές στήριξης (“VAT Photopolymerisation”, n.d.), ώστε να αποφευχθεί η παραμόρφωση ή η καταστροφή του αντικειμένου από τα κινούμενα μέρη της μηχανής.

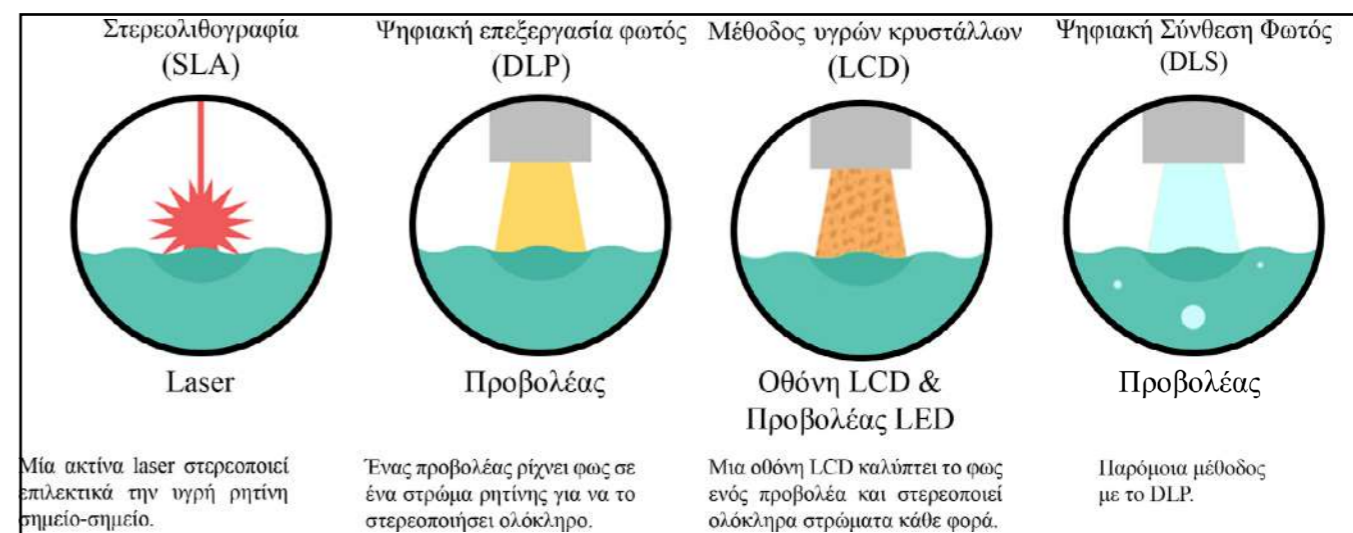
Ο φωτοπολυμερισμός περιλαμβάνει την στερεολιθογραφία (SLA) και την ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP), την ψηφιακή σύνθεση φωτός (DLS), ενώ υπάρχει και η μέθοδος των υγρών κρυστάλλων (LCD). Το SLA χρησιμοποιεί εστιασμένη ακτίνα λέιζερ ή πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας για τη διαδικασία σκλήρυνσης, ενώ το DLP χρησιμοποιεί έναν ψηφιακό προβολέα ως πηγή φωτός υπεριώδους ακτινοβολίας, ο οποίος αναβοσβήνει μια μεμονωμένη εικόνα στην επιφάνεια της δεξαμενής για τη σκλήρυνση ενός στρώματος ρητίνης. Αντίστοιχα, η μέθοδος LCD χρησιμοποιεί μια μονάδα οθόνης LCD για την προβολή συγκεκριμένων μοτίβων φωτός (“What Is SLA 3D Printing?”, n.d.).

Αυτές οι διεργασίες είναι σχετικά γρήγορες και μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες επιφάνειες με περίπλοκες λεπτομέρειες, λείο φινίρισμα και υψηλή ακρίβεια διαστάσεων, καθιστώντας τα τέλεια για την παραγωγή πρωτοτύπων. Ωστόσο, είναι μία σχετικά ακριβή διαδικασία, ενώ τα προϊόντα που δημιουργεί είναι εύθραυστα και επομένως λιγότερο κατάλληλα για λειτουργικά πρωτότυπα. Επίσης, δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε εξωτερικούς χώρους, καθώς το χρώμα και οι μηχανικές ιδιότητες μπορεί να αλλοιωθούν όταν εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία (UV).

Τέλος, τα αντικείμενα χρειάζονται μεταεπεξεργασία, η οποία είναι χρονοβόρα. Τα μέρη πρέπει να καθαριστούν από την περίσσεια ρητίνης μετά την εκτύπωση και στη συνέχεια να εκτεθούν σε πηγή φωτός για να βελτιωθεί η αντοχή τους. Οι απαιτούμενες δομές στήριξης μπορούν επίσης να αφήσουν ατέλειες που χρειάζονται μεταγενέστερη επεξεργασία για να αφαιρεθούν.



Διαδικασία φωτοπολυμερισμού δεξαμενής- VPP  
 Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13\\_W640.jpg](https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13_W640.jpg)



Διαφορετικές μέθοδοι φωτοπολυμερισμού δεξαμενής





## • ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ *Stereolithography- SLA*

Πρόκειται για μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία τρισδιάστατης κατασκευής αντικειμένων, που ενσωματώνει μια εστιασμένη ακτίνα λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας υψηλής ανάλυσης για τον πολυμερισμό και τη διαδοχική στερεοποίηση φωτοαντιδραστικών πολυμερών, όπως πολυακρυλικά, εποξειδικές και πολυεστερικές ρητίνες (Ding et al., 2019).

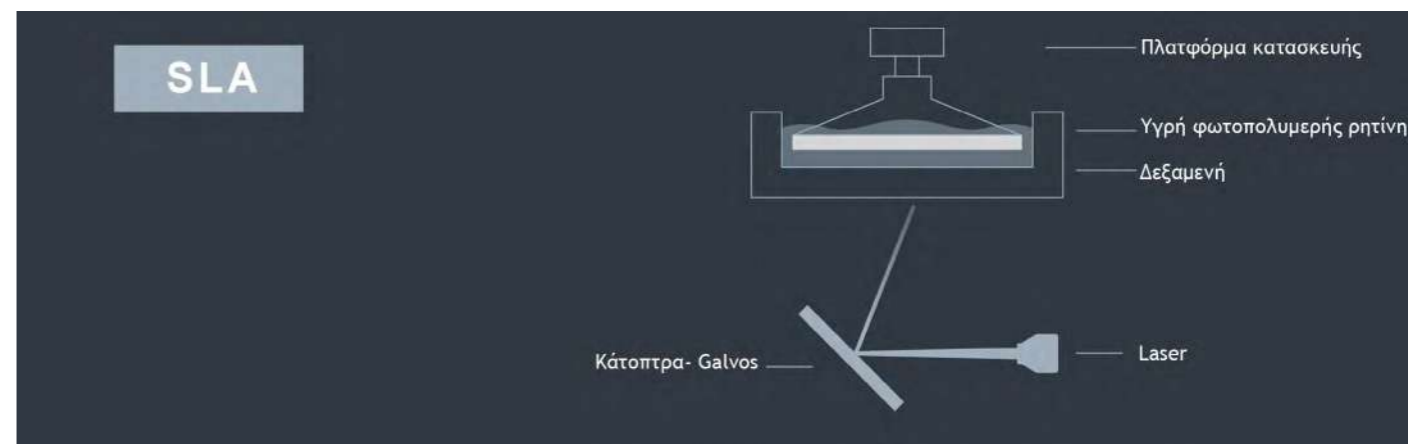
Η δέσμη λέιζερ εστιάζεται σε μια προκαθορισμένη διαδρομή χρησιμοποιώντας ένα σύνολο κατόπτρων, που ονομάζονται γαλβανόμετρα ή “galvos”. Ολόκληρη η περιοχή διατομής του μοντέλου σαρώνεται, ώστε το παραγόμενο τμήμα να είναι πλήρως συμπαγές. Μετά την εκτύπωση, το εξάρτημα δεν έχει ωριμάσει πλήρως. Απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία υπό υπεριώδη ακτινοβολία, εάν το ζητούμενο είναι πολύ υψηλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες.

Η διαδικασία φωτοπολυμερισμού είναι μη αναστρέψιμη και δεν υπάρχει τρόπος να μετατραπούν τα εξαρτήματα που έχουν παραχθεί με SLA στην υγρή τους μορφή. Η θέρμανση αυτών των εξαρτημάτων θα προκαλέσει καύση αντί για υγροποίηση. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υλικά που παράγονται με SLA είναι κατασκευασμένα από θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιεί η μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (FDM) (“What Is SLA 3D Printing?”, n.d.).

Το πάχος κάθε στρώσης κυμαίνεται σε 0.025-0.1mm, ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Όταν τελειώνει κάθε στρώση, η πλατφόρμα χαμηλώνει και όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία, η περίσσεια αποστραγγίζεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί (Noorani, 2006). Η υποστηρικτική δομή δημιουργείται αυτόματα κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας των τρισδιάστατων μοντέλων CAD και χρειάζεται μεγάλη προσοχή κατά την αφαίρεση από το ολοκληρωμένο προϊόν. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και το καλό φινιρίσμα των αντικειμένων που δύναται να παράγει (Γιαννατσής κ.ά, 2016).

Ακόμα, έχει αναπτυχθεί μια νεότερη έκδοση αυτής της διαδικασίας η οποία χρησιμοποιεί την διαδικασία φωτοπολυμερισμού έχοντας υψηλότερη ανάλυση. Η μικροστερεολιθογραφία (Micro - Stereo Lithography-  $\mu$ SLA) ή υπεριώδης σκλήρυνση (Halloran et al., 2011), όπως ονομάζεται, στερεοποιεί ένα λεπτό στρώμα πάχους 0.001-0.01 mm με μια δέσμη λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας, επιτρέποντας την ακριβή κατασκευή τρισδιάστατων πολύπλοκων μικροδομών (Zhang et al., 1999).

Η Ολλανδή σχεδιάστρια Van Herpen, ο Αυστριακός αρχιτέκτονας Koerner και η βελγική εταιρεία Materialize (Leuven, Βέλγιο) συνεργάστηκαν για την ανάπτυξη ενός ημιδιαφανούς φορέματος χρησιμοποιώντας στερεολιθογραφία (Materialise, 2021a). Η Materialize χρησιμοποιεί έναν εκτυπωτή SLA για την εκτύπωση φορεμάτων 3DP (Materialise, 2021b).



Στερεολιθογραφία- SLA

Πηγή: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0436/6965/1618/files/SLA\\_ae70faa8-c7e2-4baf-a2d7-4d8dcfad1e6c\\_1024x1024.jpg?v=1614666625](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0436/6965/1618/files/SLA_ae70faa8-c7e2-4baf-a2d7-4d8dcfad1e6c_1024x1024.jpg?v=1614666625)



## • ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΣ *Digital Light Processing- DLP*

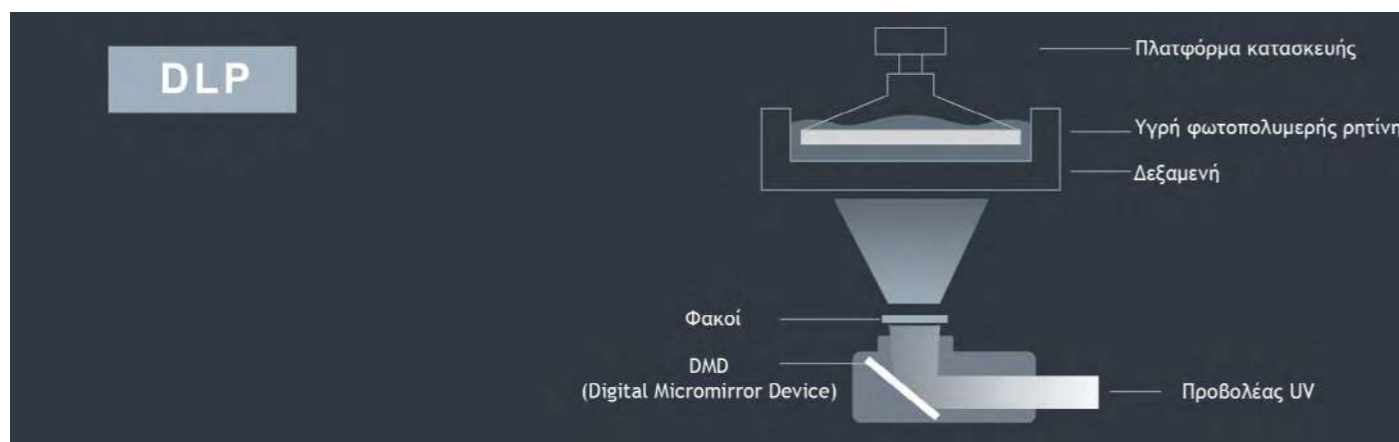
Προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος παράδοσης και να αυξηθεί η ταχύτητα κατασκευής προέκυψε ένα σύστημα φωτομάσκας για την παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων, το DLP που προτάθηκε από τον Pomerantz (Badiru et al., 2017). Η μέθοδος χρησιμοποιεί υλικά που φωτοπολυμερίζονται με υπεριώδη ακτινοβολία. Μία μεμβράνη επικαλύπτεται με υγρή ρητίνη, η οποία πολυμερίζεται μέσω ενός συστήματος ψηφιακού προβολέα, συμπεριλαμβανομένου ενός προβολέα φωτός και μίας ψηφιακής μικροσυσκευής (DMD) (Mu et al., 2017). Κατά τη λειτουργία του συστήματος τα μικροκάτοπτρα στο DMD μετακινούνται ανακλώντας επιλεκτικά το προσπίπτον φως, σύμφωνα με το ψηφιακό σχέδιο, πολυμερίζοντας το φωτοευαίσθητο υλικό (Xue et al., 2019).

Το υλικό σκληραίνει και ενώνεται με τις προηγούμενες στρώσεις υλικού (“DLP”, n.d.). Αν το μοντέλο έχει προεξοχές, χρειάζεται υποστηρικτικό υλικό. Καθώς προβάλλεται ολόκληρο το στρώμα στην πηγή φωτός μονομιάς και όχι σημειακά ή γραμμικά όπως στο λέιζερ, το τρισδιάστατο αντικείμενο σχηματίζεται ταχύτερα σε σχέση με άλλες μεθόδους. Με αυτή την τεχνολογία μπορούν να εκτυπωθούν προϊόντα υψηλής ακρίβειας από διάφορα υλικά, όπως

πλαστικά, κεραμικά, μέταλλα και νανοσύνθετα σε συνδυασμό με φωτοπολυμερή υλικά (Kow-sari et al., 2018). Η ένταση του φωτός και οι ιδιότητες απορρόφησης του φωτοπολυμερούς είναι παράμετροι ελέγχου (Tiller et al., 2019). Σε σχέση με το SLA, το αντικείμενο προσκολλάται πολύ πιο σταθερά στην πλατφόρμα κατασκευής για την αποφυγή τυχόν ζημιών (Dean et al., 2012).

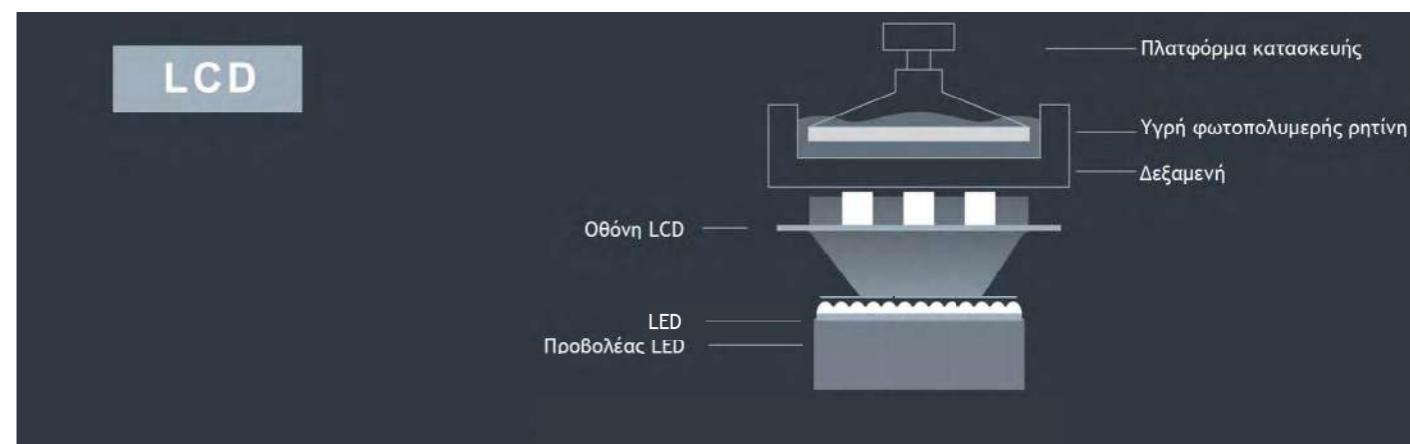
Ορισμένοι εκτυπωτές DLP 3D έχουν την πηγή φωτός τοποθετημένη στο επάνω μέρος του εκτυπωτή, η οποία φωτίζει προ τα κάτω στη δεξαμενή ρητίνης. Αυτή η μέθοδος ενδίδνυται για μεγαλύτερες εκτυπώσεις, καθώς η διαδικασία εκτύπωσης δεν λειτουργεί ενάντια στη βαρύτητα και ο κάδος ρητίνης υποστηρίζει την εκτύπωση, μειώνοντας την ανάγκη για δομές στήριξης.

Ένα ύφασμα αναπτύχθηκε με τη μέθοδο DLP χρησιμοποιώντας φωτοπολυμερές ακρυλικής πολυουρεθάνης ως υλικό εκτύπωσης (Kim et al., 2020).



Ψηφιακή επεξεργασία φωτός- DLP

Πηγή: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0436/6965/1618/files/DLP\\_46916001-f19a-4073-938d-72d183e03244\\_1024x1024.jpg?v=1614666594](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0436/6965/1618/files/DLP_46916001-f19a-4073-938d-72d183e03244_1024x1024.jpg?v=1614666594)



Φωτοπολυμερισμός υγρών κρυστάλλων- LCD

Πηγή: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0436/6965/1618/files/LCD\\_35481a3d-44db-4d69-9681-0a2bf58cbdf2\\_1024x1024.jpg?v=1614666565](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0436/6965/1618/files/LCD_35481a3d-44db-4d69-9681-0a2bf58cbdf2_1024x1024.jpg?v=1614666565)



### • ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΦΩΤΟΣ *Digital Light Synthesis- DLS*

Παρόμοια με τις μεθόδους στερεολιθογραφίας (SLA) και ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (DLP) είναι η ψηφιακή σύνθεση φωτός (DLS- digital light synthesis), παλαιότερα γνωστή ως CLIP (Continuous Liquid Interface Production). Η τεχνολογία DLS είναι μια παραλλαγή της DLP και χρησιμοποιεί υπεριώδες φως για να σκληρύνει μια φωτοευαίσθητη υγρή ρητίνη. Χρησιμοποιεί προβολέα για συνεχή φωτοπολυμερισμό και ένα παράθυρο διαπερατό από το οξυγόνο για τον έλεγχο των επιπέδων οξυγόνου. Αυτό είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία μιας λεπτής υγρής διεπαφής από μη σκληρυμένη ρητίνη με πάχος ίσο με το ένα τρίτο της ανθρώπινης τρίχας, που αποτρέπει την συγκόλληση του αντικειμένου στο παράθυρο. Μετά την εκτύπωση, το αντικείμενο περνά στο στάδιο της θερμικής σκλήρυνσης, ώστε να αποκτήσει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.

Η μέθοδος αυτή κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 2014 από την Carbon3D (πρώην Eipi Systems), γι' αυτό και ονομάζεται και Carbon DLS. Η τεχνολογία εμπίπτει στη γενική διαδικασία του πολυμερισμού δεξαμενής, αλλά είναι ταχύτερη (30 φορές πιο γρήγορη από τα SLS/ MJM και 100 φορές πιο γρήγορη από τα DLP/SLA), έχει καλύτερο φινιρίσμα, αυξημένη αντοχή και χρειάζεται λιγότερη μεταεπεξεργασία. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το κόστος, καθώς οι τιμές των μηχανημάτων και των πρώτων υλών είναι υψηλές.

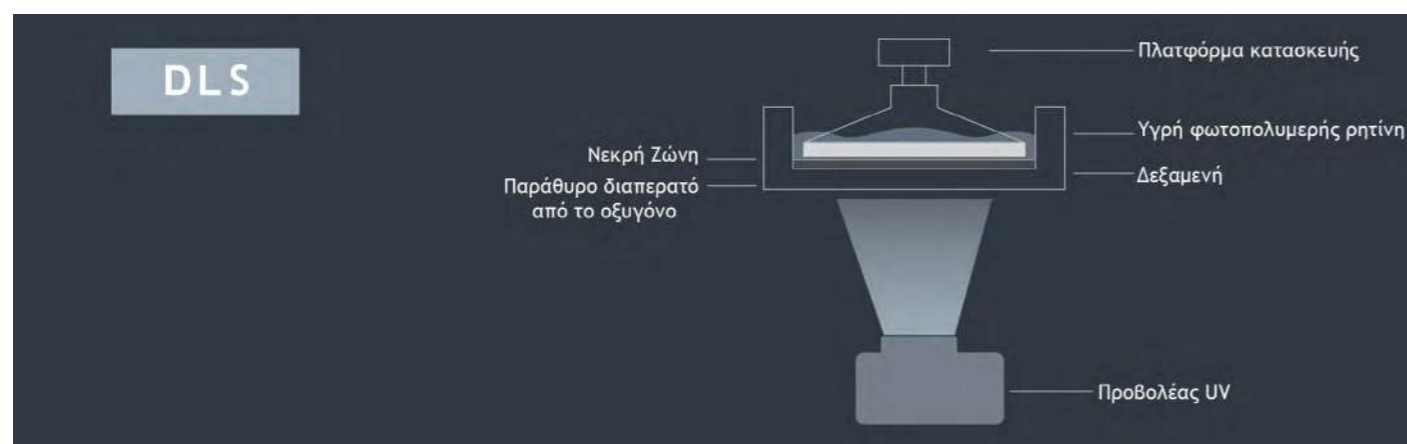
Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί σε υποδήματα και αθλητικό εξοπλισμό (Cavallo, n.d.).



### • ΟΘΟΝΗ ΥΓΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ *Liquid Crystal Display - LCD*

Η μέθοδος της οθόνης υγρών κρυστάλλων (LCD), που ονομάζεται επίσης μασκαρισμένη στερεολιθογραφία (MSLA), είναι παρόμοια με το DLP, αλλά αντί για μια ψηφιακή συσκευή μικροκαθρέφτη (DMD) χρησιμοποιεί μια οθόνη LCD. Μέσω της LCD μία σειρά από LED εκπέμπουν υπεριώδες φως (UV) παράγοντας μια συγκεκριμένη εικόνα.

Η οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) Οι εκτυπωτές LCD συνήθως επιτυγχάνουν υψηλότερη ανάλυση από τους DLP, αλλά λόγω τεχνικών περιορισμών έχουν χαμηλότερες ταχύτητες εκτύπωσης. Ωστόσο, οι LCD είναι πιο οικονομικοί από τους DLP και επομένως πιο δημοφιλείς.



Ψηφιακή σύνθεση φωτός- DLS  
(Εικόνα ιδιόχειρης επεξεργασίας)



### • ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ. Εκτύπωση Polyjet PJ ή Multijet MJJ Material Jetting- MJT

Το Material Jetting αναφέρεται στη διαδικασία επιλεκτικής εναπόθεσης σταγονιδίων πρώτης ύλης (ISO/ASTM, 2021). Αν και η διαδικασία εκτύπωσης είναι παρόμοια, το Multijet Printing (MJP) είναι μια αποκλειστική τεχνολογία από τη 3D Systems και το Polyjet (PJ) είναι μια αποκλειστική τεχνολογία της Stratasys.

Αυτή η μέθοδος εκτύπωσης είναι παρόμοια με την εκτύπωση εντύπων (inkjet), μόνο που αντί να εκτοξεύεται μελάνι σε ένα φύλλο χαρτιού, μία, δύο ή περισσότερες κεφαλές εκτύπωσης αποθέτουν υπό πίεση υγρά σταγονίδια υλικού φωτοπολυμερών στην πλατφόρμα κατασκευής σύμφωνα με το ψηφιακό σχέδιο. Τα φωτοπολυμερή εναποτίθενται στην επιφάνεια ακολουθώντας μία από τις ακόλουθες τεχνικές: συνεχής ψεκασμός (CIJ), drop-on-demand (DOD) inkjet και polyjet (Tamez & Taha, 2021). Η τεχνολογία συνεχούς ψεκασμού μελάνης (CIJ)<sup>3</sup> εκτοξεύει συνεχώς σταγονίδια από την κεφαλή εκτύπωσης, ενώ η τεχνολογία Drop On Demand (DOD) μόνο όταν απαιτείται. Στη συνέχεια, τα στρώματα στερεοποιούνται άμεσα με υπεριώδη ακτινοβολία (UV) με πηγές ενέργειας, όπως οι υπεριώδεις λαμπτήρες (Yap et al., 2017), πριν ξεκινήσει ξανά η διαδικασία για το επόμενο στρώμα.

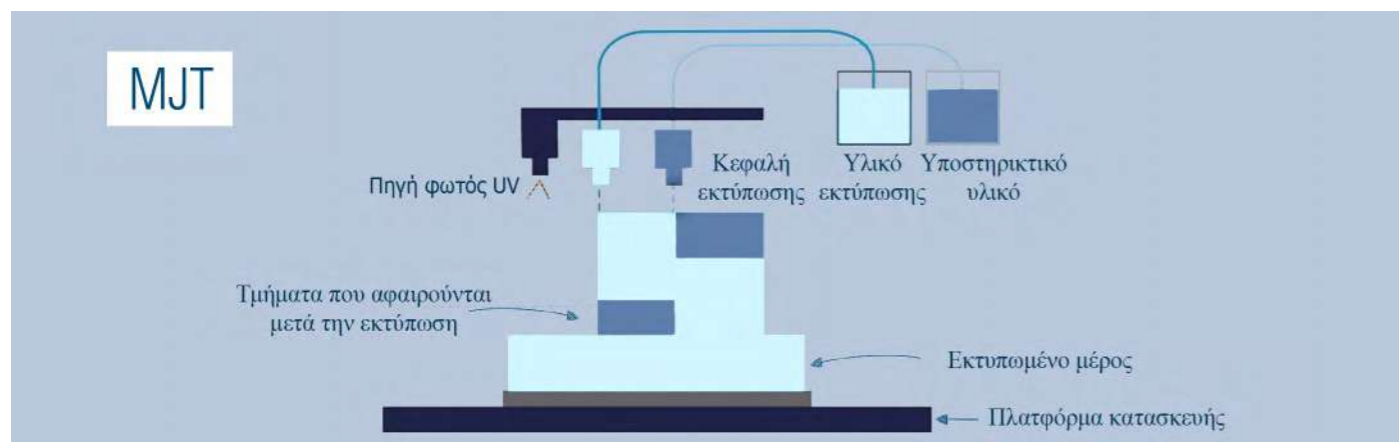
Καθώς το υλικό εναποτίθεται σε σταγόνες, ο αριθμός των διαθέσιμων υλικών είναι περιορισμένος. Κατάλληλα λόγω της παχύρευστης φύσης τους είναι διάφορα φωτοσκληρυνόμενα πολυμερή, σύνθετα υλικά και κεριά (Shahrubudin et al., 2019). Η εκτόξευση διπλού υλικού Polyjet επιτρέπει την κατασκευή περισσότερων από 100 σύνθετων υλικών (Connex500TM). Οι εταιρείες έχουν αναπτύξει υλικά με ιδιότητες που ταιριάζουν στις ανάγκες τους. Η εκτόξευση υλικού απαιτεί τη χρήση δομών στήριξης, οι οποίες κατασκευάζονται συνήθως από ένα υδατοδιαλυτό υλικό. Το υλικό στήριξης αποτίθεται από έναν άλλο πίδακα και δεν πολυμερίζεται με UV (Ibrahim et al., 2009), ενώ στη συνέχεια αφαιρείται με το χέρι ή με εκτόξευση νερού (Singh et al., 2010).

Η απόθεση υλικού από τις σειρές κεφαλών εκτύπωσης με γραμμικό τρόπο, παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής πολλών αντικειμένων χωρίς να επηρεάζεται η ταχύτητα κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο, παράγονται εξαρτήματα γρηγορότερα σε σχέση με άλλους τύπους τρισδιάστατων εκτυπωτών ρητίνης. Επιπρόσθετα, δεν απαιτείται μετα-πολυμερισμός, καθώς κάθε στρώμα σκληραίνει πλήρως με UV.

Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με αυτή τη μέθοδο έχουν υψηλή ανάλυση με πάχος στρώματος 0.016mm - 0.032 mm (Shaw, 2016). Αυτό έχει το μειονέκτημα ότι τα αντικείμενα είναι πιο αδύναμα σε σχέση με άλλες μεθόδους και φθείρονται με την πάροδο του χρόνου. Μειονέκτημα αποτελεί επίσης και το υψηλό κόστος της μεθόδου. Από την άλλη, είναι από τους μοναδικούς τύπους τεχνολογίας που παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής έγχρωμων εξαρτημάτων σε ποικιλία υλικών.

Η εταιρεία Materialise παρέχει δύο βασικά υλικά: το VeroWhite Plus και το TangoWhite Plus. Το VeroWhite Plus είναι μια ρητίνη γενικής χρήσης, διαθέσιμη σε λευκό χρώμα με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Το TangoWhite Plus είναι εύκαμπτο καουτσούκ σαν ρητίνη, το οποίο έχει εξαιρετική αντοχή στην επιμήκυνση. Η εταιρεία προσφέρει, επίσης, μια σειρά από σύνθετα υλικά. Η εταιρεία Stratasys προσφέρει και μια γκάμα υλικών με ποικίλες ιδιότητες και χρώματα, κατάλληλα για τρισδιάστατη εκτύπωση με Polyjet. Διαθέτει, επιπλέον, δύο συμπολυμερή Polyjet που προσομοιώνουν τη λειτουργικότητα και την εμφάνιση του Πολυπροπυλενίου (Shaw, 2016).

3 Η πρώτη εμπορική συσκευή CIJ παρουσιάστηκε το 1951 από τη Siemens (Μόναχο, Γερμανία) (OLED Printing Industry, 2021). Υλικά όπως μέταλλα, κεραμικά, βιοπολυμερή, θερμοπλαστικά πολυμερή, γραφένιο κ.λπ., μπορούν να εκτυπωθούν με το σύστημα CIJ (Pinargote et al., 2020).



Εκτόξευση υλικού- MJT

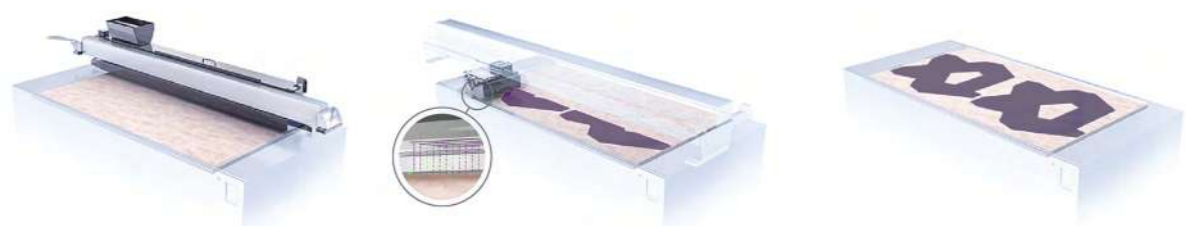
Πηγή: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/learning-center/3d-printing-process.html>



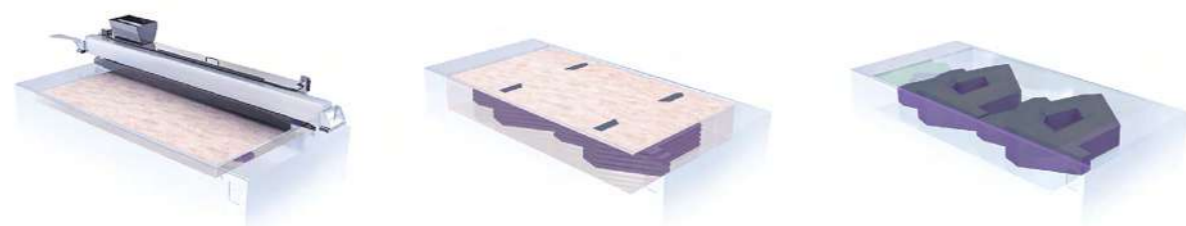
## • ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

### Binder Jetting- BJT/ Inkjet

Η μέθοδος χρησιμοποιεί δύο υλικά: το υλικό κατασκευής σε μορφή σκόνης και ένα υγρό συνδετικό υλικό που εκτοξεύεται και εναποτίθεται επιλεκτικά στην πλατφόρμα κατασκευής, δρώντας ως συγκολλητικό μεταξύ των στρωμάτων σκόνης (ISO/ASTM, 2021). Μια λεπίδα απλώνει ένα λεπτό στρώμα σκόνης πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής. Στη συνέχεια, μια κεφαλή εκτύπωσης με ακροφύσια κινείται οριζόντια στον άξονα xy και εναποθέτει συνδετικό υλικό, χωρίς να χρησιμοποιεί θερμότητα.



1. Επικάλυψη στρώματος σκόνης 2. Το Inkjet εφαρμόζει συνδετικό υλικό 3. Γρήγορη εκτύπωση κάθε στρώματος



4. Επικάλυψη με νέο στρώμα σκόνης 5. Επανάληψη της διαδικασίας 6. Ολοκλήρωση της εκτύπωσης

Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης με τη μέθοδο Binder Jetting

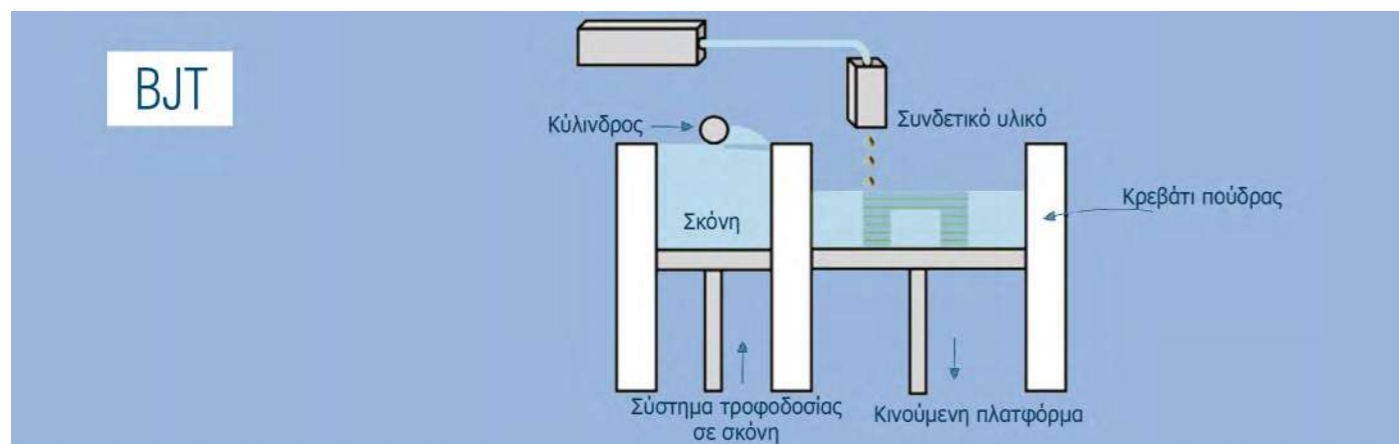
Πηγή: <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting>

Όταν ολοκληρωθεί η στρώση (πάχος 0.089-0.203 mm), η πλατφόρμα κατασκευής κινείται προς τα κάτω και διαδικασία επαναλαμβάνεται δημιουργώντας μία διαστρωματική τρισδιάστατη δομή (Low et al., 2017). Μετά την εκτύπωση, τα μέρη εγκλείονται σε αχρησιμοποίητη σκόνη και συχνά αφήνονται να σκληρυνθούν. Στη συνέχεια αφαιρούνται και η περίσσεια σκόνης συλλέγεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Αυτός ο τύπος τεχνολογίας έχει τις ιδιότητες τόσο της σύντηξης κρεβατιού πούδρας, καθώς χρησιμοποιεί ένα υλικό σε σκόνη, όσο και της εκτόξευσης υλικού, καθώς ένα πολυμερές δέσμευσης υγρού εναποτίθεται από ψεκασμούς μελάνης.

Η διαδικασία επιτρέπει την έγχρωμη εκτύπωση και χρησιμοποιεί μία ποικιλία υλικών όπως σύνθετα πολυμερή (ABS, PLA), κεραμικά, γυαλί, άμμο (Gardan, 2018), μέταλλα και κράματα μετάλλων, όπως τιτάνιο, ανοξείδωτο χάλυβα, χαλκό, ατσάλι. Επιπλέον, είναι ταχύτερη σε σχέση με άλλες μεθόδους κατασκευής, καθώς τα περισσότερα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται μπορούν να διαμορφωθούν σε θερμοκρασία δωματίου. Από την άλλη πλευρά, συχνά απαιτείται μεταεπεξεργασία, η οποία αυξάνει το χρόνο στη συνολική διαδικασία. Η μεταεπεξεργασία εξαρτάται από τον τύπο του υλικού, προκειμένου να αποκτήσει το αντικείμενο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες (Gibson et al., 2010) και φινίρισμα λόγω της σχετικά χαμηλής πυκνότητας και της τραχύτητας στην επιφάνεια του αντικειμένου (Mostafaei et al., 2021). Για παράδειγμα, τα μεταλλικά μέρη υφίστανται πυροσυσσωμάτωση ή διείσδυση με ένα μέταλλο χαμηλού σημείου τήξης, όπως ο μπρούντζος, για να εδραιωθεί η δομή αφού έχει διαμορφωθεί (Gokuldoss et al., 2017). Αυτό το βήμα οφείλεται στο ότι ορισμένα υλικά μετά την εκτύπωση βρίσκονται στην “πράσινη” κατάσταση, που σημαίνει ότι έχουν κακές μηχανικές ιδιότητες και μπορεί να είναι εύθραυστα και πολύ πορώδη. Τα εξαρτήματα χύτευσης με άμμο δεν χρειάζονται συνήθως μεταεπεξεργασία, αλλά χρησιμοποιείται ακρυλικό στα πλήρως έγχρωμα μέρη για να βελτιωθεί η ζωτικότητα των χρωμάτων (“What Is Binder Jetting?”, n.d.).

Συνολικά, πρόκειται για μία μέθοδο γρήγορη, με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής, ικανή να παράγει μεγάλους όγκους εξαρτημάτων πιο οικονομικά από άλλες μεθόδους. Η εκτόξευση μεταλλικού συνδετικού υλικού, που χρησιμοποιείται με ένα ευρύ φάσμα μετάλλων, μπορεί να παράγει προϊόντα τελικής χρήσης. Ωστόσο, η εκτόξευση πολυμερούς συνδετικού υλικού έχει περιορισμένες επιλογές υλικών και παράγει εξαρτήματα με χαμηλές δομικές ιδιότητες. Η αξία του έγκειται στην ικανότητά του να παράγει έγχρωμα πρωτότυπα και μοντέλα.



Εκτόξευση συνδετικού υλικού- BJT

Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13\\_W640.jpg](https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13_W640.jpg)

## ΣΤΕΡΕΑ ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ



### • ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### Directed Energy Deposition- DED

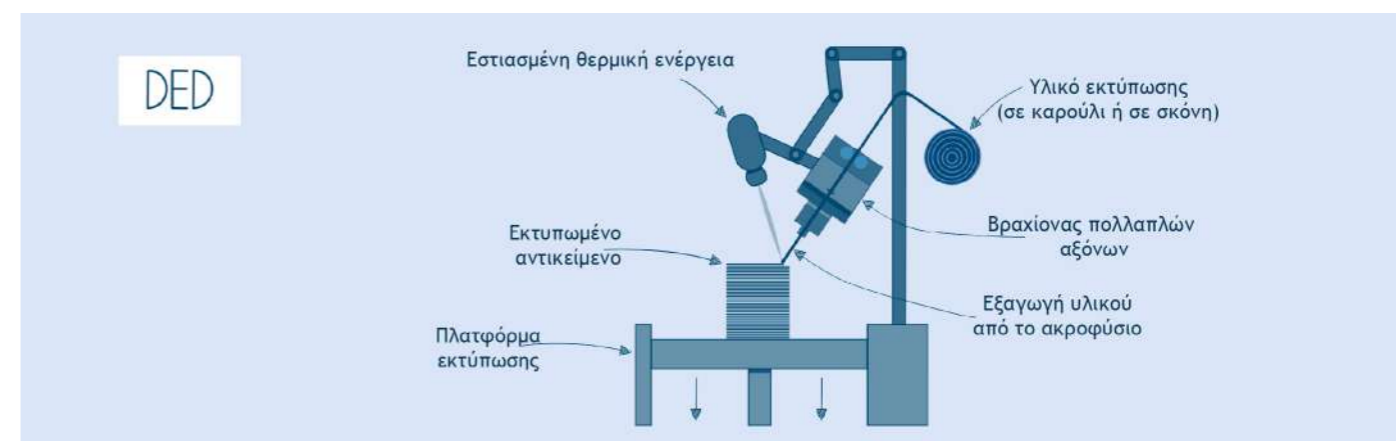
Καλύπτει μία σειρά ορολογιών όπως Laser Engineered Net Shaping (LENS), Laser Powder Forming (LPF), Ion Fusion Formation (IFF), Direct Metal Deposition (DMD), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM), Directed Light Fabrication, 3D Laser Cladding (Gardan, 2018). Είναι μία περίπλοκη διαδικασία εκτύπωσης που χρησιμοποιείται αρκετά στην επισκευή ή προσθήκη υλικού σε υπάρχοντα εξαρτήματα (Gibson et al., 2010). Πρόκειται για μία διαδικασία, κατά την οποία η εστιασμένη θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη σύντηξη υλικών με τήξη κατά την εναπόθεσή τους. Εστιασμένη θερμική ενέργεια σημαίνει ότι μια πηγή ενέργειας (για παράδειγμα λέιζερ, δέσμη ηλεκτρονίων ή τόξο πλάσματος) εστιάζεται για να λιώσει τα υλικά που εναποτίθενται (ISO/ASTM, 2021).

Αποτελείται από ένα ακροφύσιο τοποθετημένο σε βραχίονα πολλαπλών αξόνων, το οποίο εναποθέτει λιωμένο υλικό σε καθορισμένη επιφάνεια δημιουργώντας στρώσεις πάχους 0.089-0.203 mm η κάθε μία. Η διαφορά με την εξώθηση του υλικού είναι ότι το ακροφύσιο μπορεί να κινηθεί σε πολλές κατευθύνσεις και δεν είναι στερεωμένο σε έναν άξονα. Σε αυτή τη διαδικασία προτιμώνται κυρίως μέταλλα και υβρίδια με βάση το μέταλλο σε μορφή σκόνης ή σύρματος, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πολυμερή ή κεραμικά υλικά. Υπότυποι της μεθόδου είναι οι εξής: Powder Laser Energy Deposition, Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM),

Wire Electron Beam Energy Deposition και Cold Spray.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν τη δυνατότητα ελέγχου της δομής των κόκκων, η οποία επιτρέπει τη χρήση της διαδικασίας για την επισκευή λειτουργικών εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας. Αυτό απαιτεί μια ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και ταχύτητας, καθώς οι υψηλότερες ταχύτητες ισοδυναμούν με χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας και λιγότερο συνεπή μικροδομή. Σύμφωνα με την ASTM International, η μέθοδος αυτή έχει την ικανότητα να παράγει σχετικά μεγάλα εξαρτήματα (όγκος κατασκευής > 1000 mm<sup>3</sup>) με ελάχιστα εργαλεία και σχετικά μικρή μεταεπεξεργασία, ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται (ASTM, 2016).

Το κυρίαρχο πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας τεχνολογιών είναι ότι μπορούν να παράγουν αντικείμενα με καλές ιδιότητες σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ως πρώτη ύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ευρεία γκάμα υλικών με διαφορετικές συνθέσεις και κατά τη διάρκεια της παραγωγής η πρώτη ύλη μπορεί να εναλλάσσεται. Σε σχέση με την κλασική διαδικασία SLS, η μέθοδος έχει λιγότερους περιορισμούς, καθώς δεν απαιτεί δευτερεύουσα επεξεργασία ενίσχυσης. Η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην κατασκευή όσο και στην επιδιόρθωση αντικειμένων, όπως έχει αναφερθεί, λόγω της εγγενούς ευελιξίας που παρουσιάζει (Γιαννατσής κ.ά, 2016).



Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας- DED

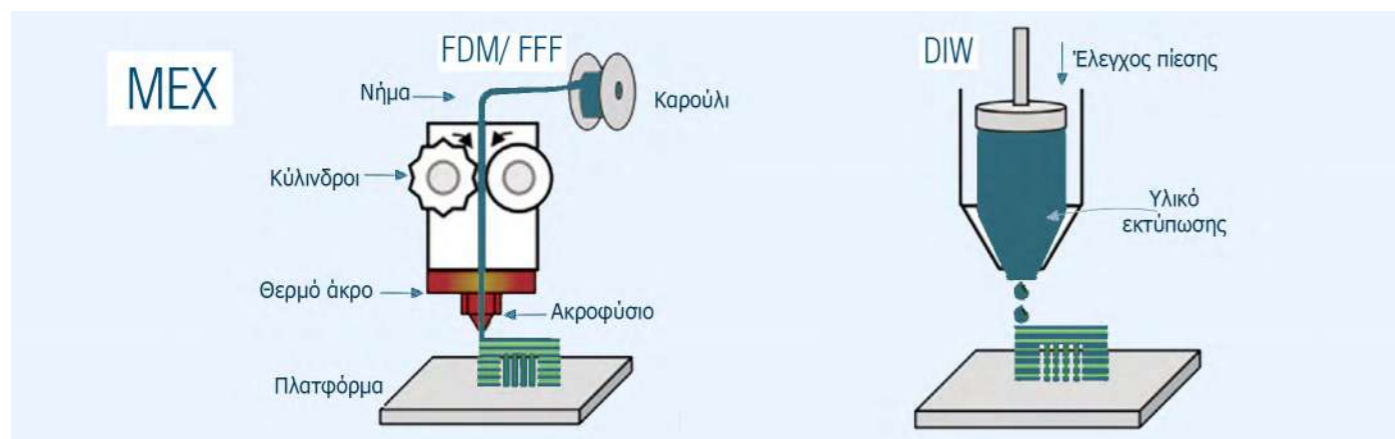
Πηγή: <https://pick3dprinter.com/ded-3d-printing/>

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν στερεά πρώτη ύλη χαρακτηρίζονται συνήθως από την θέρμανση της πρώτης ύλης μέχρι του σημείου τήξεως, έτσι ώστε αυτή να ρέει μέσα από ένα σύστημα εναπόθεσης. Η πιο γνωστή τεχνολογία αυτής της κατηγορίας είναι η μοντελοποίηση με εναπόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM), στην οποία η πρώτη ύλη εξωθείται μέσω ενός κινούμενου ακροφυσίου (κεφαλή) και εναποτίθεται με ελεγχόμενο τρόπο στην πλατφόρμα κατασκευής (Γιαννατσής κ.ά, 2016).



## • ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ Material extrusion- MEX

Σε αυτή την τεχνική, ένα θερμοπλαστικό ή σύνθετο νήμα διανέμεται επιλεκτικά μέσω ενός ακροφυσίου ή στομίου (ISO/ASTM, 2021) και τυπώνεται στρώμα- στρώμα σε μια επιφάνεια, για να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη δομή (Kaynak et al., 2018). Τα πλεονεκτήματά της εντοπίζονται στη μείωση του κόστους και του χρόνου, καθώς και στη δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων δομών (Braconnier et al., 2020). Το FDM, το Robocasting και το Multi-jet Modeling (MJM) είναι παραδείγματα μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζονται σε αυτήν την αρχή. Θερμοπλαστικά πολυμερή, σύνθετα υλικά, πολυμερή υψηλής πλήρωσης με μέταλλο ή κεραμική σκόνη μπορούν να εκτυπωθούν χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία (ISO/ASTM, 2015).



Εξώθηση υλικού- MEX

Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13\\_W640.jpg](https://www.researchgate.net/publication/373843699/figure/fig2/AS:11431281188069406@1694521173806/Schematic-representations-of-3D-printing-techniques13_W640.jpg)



## • Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης Fused Deposition Modeling- FDM

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί ένα καρούλι νήματος (filament), το οποίο τροφοδοτείται σε μία κεφαλή με ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο. Το υλικό εξωθείται σε υγρή κατάσταση με θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης του. Σύμφωνα με το ψηφιακό αρχείο κάθε στρώμα ξεκινά με το περίγραμμα και έπειτα με την πλήρωση της διατομής

του αντικειμένου. Η κεφαλή κινείται οριζόντια στους άξονες (x, y), για να εναποθέτει ελεγχόμενα το υλικό στην πλατφόρμα κατασκευής. Μέσω της συγκεκριμένης τεχνολογίας μπορούν να παραχθούν αντικείμενα που έχουν ως πρώτη ύλη το ABS ή άλλα θερμοπλαστικά πολυμερή γνωστά για την ανθεκτικότητά τους: τα πολυανθρακικά (PC), το PLA, το νάιλον, το TPU (Kim et al., 2019), το πολυαμίδιο, το πολυστυρένιο κ.ά. (Shaw, 2016). Ακόμα υπάρχουν μείγματα που περιέχουν ξύλο και πέτρα καθώς και νήματα με ελαστικά χαρακτηριστικά.

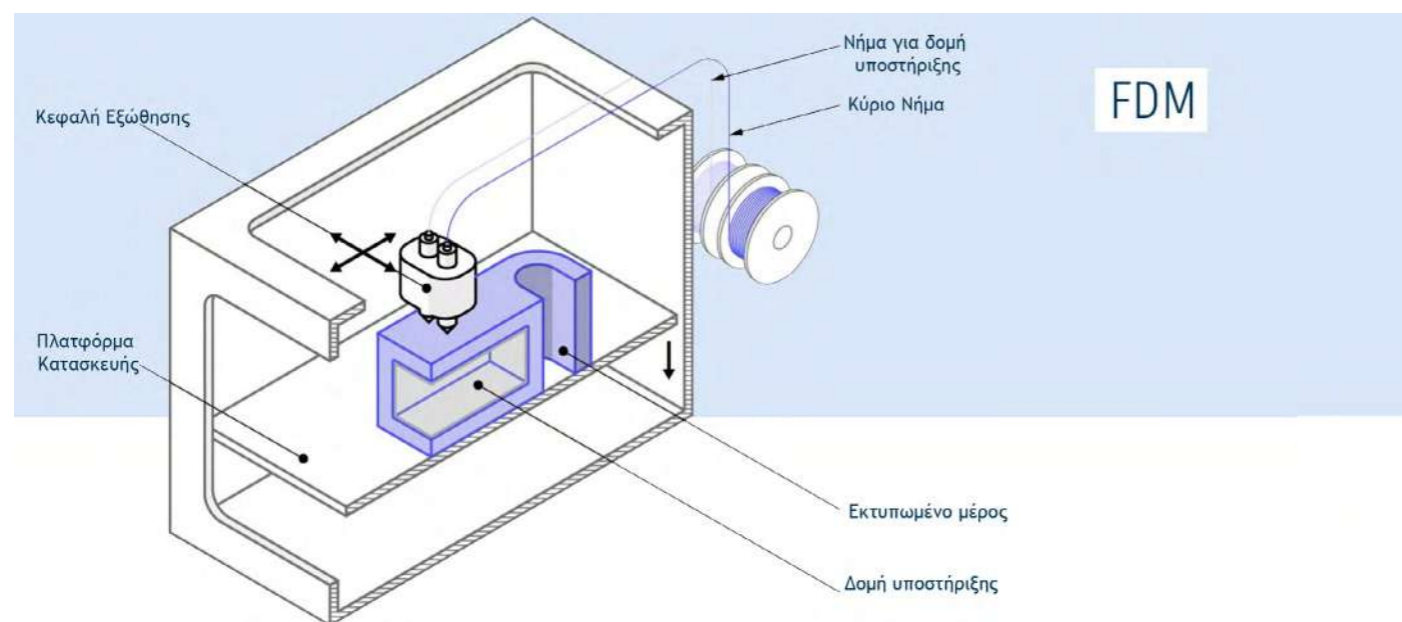
Συχνά χρησιμοποιούνται δύο κεφαλές εξώθησης, ώστε η δομή στήριξης να κατασκευάζεται από διαφορετικό υλικό αποσπώμενο ή διαλυτό<sup>4</sup> διευκολύνοντας την αφαίρεσή της και τον καθαρισμό του αντικειμένου. Εάν ο τρισδιάστατος εκτυπωτής διαβάζοντας το ψηφιακό αρχείο κρίνει ότι ένα αντικείμενο είναι ασταθές, τοποθετεί ένα οριζόντιο πλέγμα από νήμα κάτω από το αντικείμενο για την προσκόλληση στην πλάκα κατασκευής, μειώνοντας τη στρέβλωση. Εάν υπάρχουν απότομες προεξοχές, τα στηρίγματα εκτυπώνονται ταυτόχρονα με την εκτύπωση του αντικειμένου, αποτρέποντας την ανεπιθύμητη συστροφή ή άλλες παραμορφώσεις. Για τη δομή στήριξης έχουν δοκιμασθεί διάφορα υλικά όπως νάιλον, πολυμερή, κερί και υδατοδιαλυτά υλικά.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε πολλούς οικιακούς και οικονομικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές καθώς πρόκειται για μία οικονομικά αποδοτική και σχετικά γρήγορη μέθοδο κατασκευής. Ακόμα, επιλέγεται όταν η μηχανική αντοχή καθίσταται κρίσιμη για το κατασκευαζόμενο αντικείμενο. Από την άλλη πλευρά, αυτή η διαδικασία έχει έλλειψη ακρίβειας διαστάσεων, τραχιά επιφάνεια, κοκκώδες χρώμα (Petrovic et al., 2011) και συχνά απαιτείται μεταεπεξεργασία για ένα λείο φινίρισμα.

Η διαδικασία έχει πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος, όπως η διάμετρος του ακροφυσίου, το πάχος της στρώσης (Carneiro et al., 2015) που κυμαίνεται από 0.05- 0.4mm., η σταθερή πίεση, η συνεχής ροή, ο ρυθμός τροφοδοσίας του νήματος, η γραμμική ταχύτητα σχεδίασης (Gibson et al., 2010). Τα στρώματα υλικού μπορεί να συνδέονται με έλεγχο θερμοκρασίας ή με χρήση χημικών παραγόντων.

Η εκτύπωση διεξάγεται σε θερμαινόμενο θάλαμο με θερμοκρασία τέτοια, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή εναπόθεση του υλικού στα υπάρχοντα στρώματα και να μειώνονται τα φαινόμενα παραμόρφωσης λόγω ανομοιομορφης ψύξης του πολυμερούς. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μείωση της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας που διοχετεύεται στην κεφαλή για την τήξη της πρώτης ύλης και καθίσταται πιο αποδοτική και καλύτερα ελεγχόμενη η διαδικασία (Γιαννατσής κ.ά, 2016). Εκτυπωτές αυτής της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία της μόδας (MakerBot, 2021).

<sup>4</sup> Οι λύσεις χαμηλού κόστους χρησιμοποιούν την ίδια πρώτη ύλη.

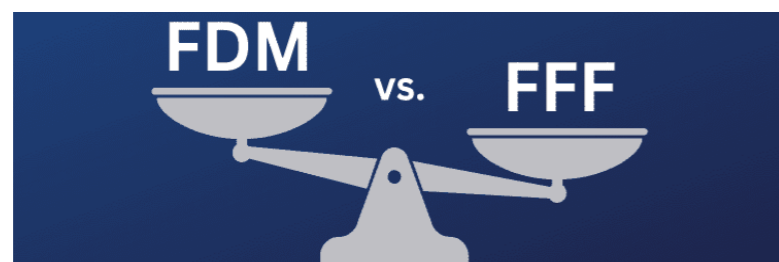


Μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης- FDM

Πηγή: <https://pick3dprinter.com/wp-content/uploads/2019/07/FDM-Technology.webp>

Η Stratasys Inc. κατέχει τα δικαιώματα εμπορικού σήματος για τον όρο Fused Deposition Modeling (FDM). Η ευρύτερη αγορά αναφέρεται σε αυτή τη βασική διαδικασία ως κατασκευή λωμένου νήματος Fused Filament Fabrication (FFF). Υπάρχουν, ωστόσο, ορισμένες διαφορές μεταξύ FDM και FFF. Το FDM παράγει υψηλότερης ποιότητας προϊόντα λιγότερο πορώδη και με πιο λείες επιφάνειες. Ακόμα, μπορούν να εκτυπωθούν προϊόντα μεγαλύτερων διαστάσεων, σε μικρότερο χρόνο και με ευρύτερο φάσμα υλικών. Βέβαια, ο εξοπλισμός και τα ανταλλακτικά είναι πιο ακριβά, αλλά έχουν καλύτερο αποτέλεσμα εκτύπωσης. Ωστόσο, οι εκτυπωτές FFF είναι μία καλή εναλλακτική επιλογή για οικιακή τρισδιάστατη εκτύπωση με οικονομικά και εύχρηστα μηχανήματα και χαμηλά λειτουργικά έξοδα.

Το FFF ξεκίνησε το 2009 όταν έληξε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας Stratasys. Η Rep-Rap ήταν η πρώτη εταιρεία που αξιοποίησε τη διαθεσιμότητα της τεχνολογίας και έκτοτε, η γκάμα των μηχανών FFF έχει επεκταθεί. Το FFF χρησιμοποιεί την ίδια διαδικασία με το FDM. Η κύρια διαφορά τους είναι η έλλειψη θερμαινόμενου περιβάλλοντος εκτύπωσης. Ο θερμαινόμενος θάλαμος του FDM βοηθά στον έλεγχο της θερμοκρασίας του εξαρτήματος και στη μείωση των υπολειπόμενων τάσεων στο τελικό προϊόν. Η ανεξέλεγκτη θερμοκρασία στις μηχανές FFF κάνει τα αποτελέσματά τους λιγότερο ακριβή και πιο επιρρεπή στην παραμόρφωση (Xometry, 2022).

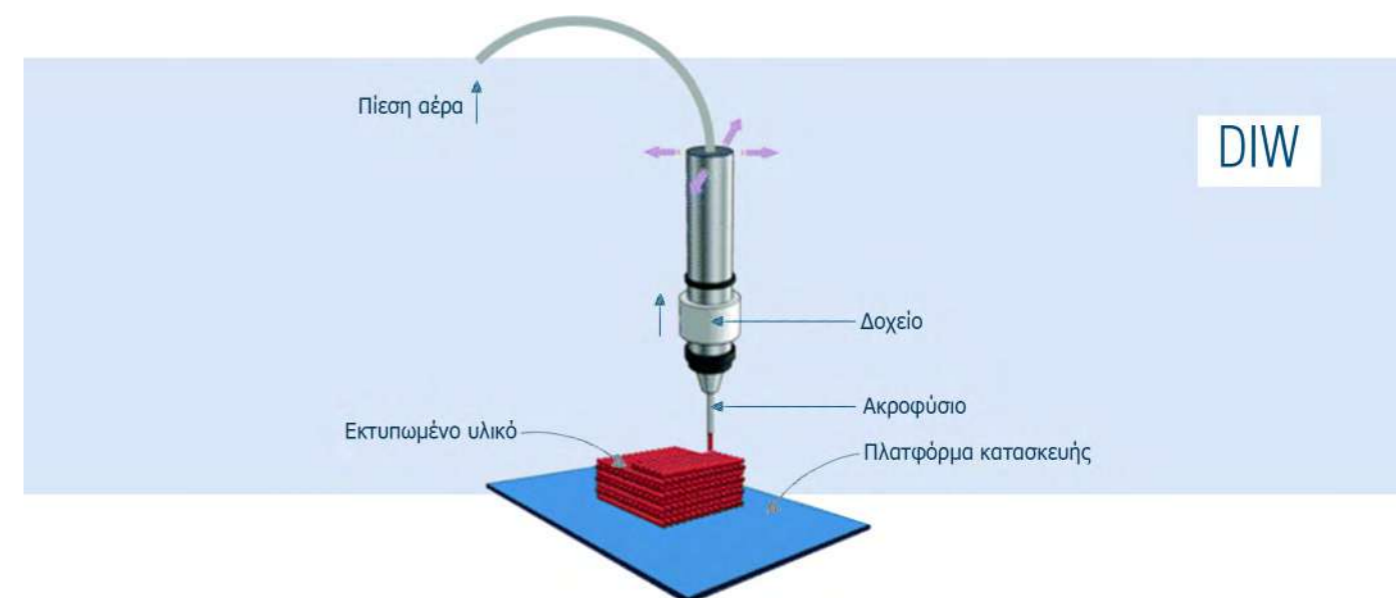


Τα φορέματα “Verlan” και “Bristle” αναπτύχθηκαν το 2013 με εκτυπωτές FDM της εταιρείας Makerbot που χρησιμοποιούν PLA και άλλα εύκαμπτα υλικά (MakerBot, 2021). Ακόμα, το διχτυωτό ύφασμα τυπωμένο με FDM από εύκαμπτα υλικά έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τσαντών και παπουτσιών (MaterialDistrict, 2021). Το Flyprint της Nike είναι ένα από τα πρώτα τρισδιάστατα υφάσματα στη βιομηχανία υποδημάτων που εκτυπώθηκαν με FDM.



### • Άμεση γραφή με μελάνη Direct Ink writing- DIW

Η DIW είναι μια μέθοδος εκτύπωσης που βασίζεται στην εξώθηση και χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε μεσο- και μικροκλίμακες. Στο DIW, το “μελάνι” υγρής φάσης διανέμεται από μικρά ακροφύσια υπό ελεγχόμενους ρυθμούς ροής και εναποτίθεται στρώμα- στρώμα σε πλατφόρμα, σχηματίζοντας σύνθετα τρισδιάστατα σχήματα. Σε αυτήν τη διαδικασία, το μελάνι σε υγρή μορφή μπορεί να εξωθηθεί υπό ακριβή ταχύτητα ροής μέσω της δύναμης ενός εμβόλου (π.χ. μιας σύριγγας), μίας βίδας αντλίας (Αρχιμήδεια βίδα), της πίεσης πεπιεσμένου αέρα ή της θέρμανσης. Είναι παρόμοια με την τεχνική εκτύπωσης FDM και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση μεγάλης ποικιλίας μεμονωμένων αλλά και πολλαπλών υλικών, όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλά ακροφύσια. Η ανάλυση της εκτύπωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διάμετρο του ακροφυσίου. Έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά όπως θερμοπλαστικά, νανοσύνθετα πολυμερή, υδρογέλες, κεραμικά, κράματα, μέταλλα (Wei et al., 2017, Ahmed et al., 2021, “Washington state university”,n.d.).



Άμεση γραφή με μελάνι- DIW

Πηγή: [https://www.researchgate.net/profile/Shiren-Wang/publication/346496050/figure/fig2/AS:963612239724588@1606754469434/a-Schematic-diagram-of-direct-ink-writing-DIW-b-DIW-of-carbon-fiber-loaded-bisphenol-F\\_W640.jpg](https://www.researchgate.net/profile/Shiren-Wang/publication/346496050/figure/fig2/AS:963612239724588@1606754469434/a-Schematic-diagram-of-direct-ink-writing-DIW-b-DIW-of-carbon-fiber-loaded-bisphenol-F_W640.jpg)

## Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ: ΑΠΟ ΤΟ ΣΧΕΔΙΟ ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

### ΨΗΦΙΑΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι τρισδιάστατης εκτύπωσης. Όμως, κοινό στοιχείο όλων των τεχνολογιών είναι η χρήση υπολογιστή και το τρισδιάστατο λογισμικό σχεδίασης. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι απαραίτητο να υλοποιηθούν ορισμένα βήματα. Αρχικά, χρειάζεται να δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο του προϊόντος που πρόκειται να εκτυπωθεί. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση λογισμικού σχεδίασης στερεών μοντέλων (CAD). Ο όρος CAD (computer-aided design) αναφέρεται στη σχεδίαση διαφόρων αντικειμένων εφαρμοσμένης μηχανικής, αρχιτεκτονικής και βιομηχανίας κάνοντας χρήση ενός υπολογιστή, αλλά και στο λογισμικό και το υλικό που χρησιμοποιείται για να δημιουργηθούν τα σχέδια των αντικειμένων. Παρεμφερείς είναι και οι όροι computer-aided drafting- CAD και computer-aided design and drafting- CADD (Duggal, 2000). Η σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) αφορά τη χρήση υπολογιστών για την δημιουργία, τροποποίηση, ανάλυση ή βελτιστοποίηση ενός σχεδίου πριν από την τελική παραγωγή του (Sarcar et al., 2008).

Το αρχείο μεταφέρει πληροφορίες, όπως υλικά, διαδικασίες, διαστάσεις και ανοχές, σύμφωνα με τις συγκεκριμένες συμβάσεις της εφαρμογής. Πλεονεκτήματα της χρήσης ψηφιακών σχεδίων είναι η την αποθήκευσή τους για μελλοντική χρήση (Pasricha & Greeninger, 2018), η κοινή χρήση τους και η ηλεκτρονική διανομή σε παγκόσμια κλίμακα. Επίσης, περιορίζεται το ανθρώπινο λάθος κατά την παραγωγή (Petrovic et al., 2011).

Το λογισμικό CAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δισδιάστατο (2D) ή τρισδιάστατο (3D) σχεδιασμό (Farin, et al., 2002). Διευκρινίζεται ότι για την εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων, απαιτείται ο σχεδιασμός τους σε κατάλληλο τρισδιάστατο λογισμικό σχεδίασης (Sun & Zhao, 2017), το οποίο αναπαριστά τα τρισδιάστατα αντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια, αποτελώντας το εικονικό πρωτότυπο σε πραγματικές μετρήσεις και αναφορές. Ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα υπάρχον αρχείο CAD ως έχει, να το επεξεργαστεί ή να σχεδιάσει ένα νέο αρχείο. Εναλλακτικά, το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να προκύψει από εξοπλισμό αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering equipment) όπως η τρισδιάστατη σάρωση (3D Scanning). Με τη μέθοδο αυτή, το αρχείο CAD δημιουργείται από την ψηφιακή σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου.

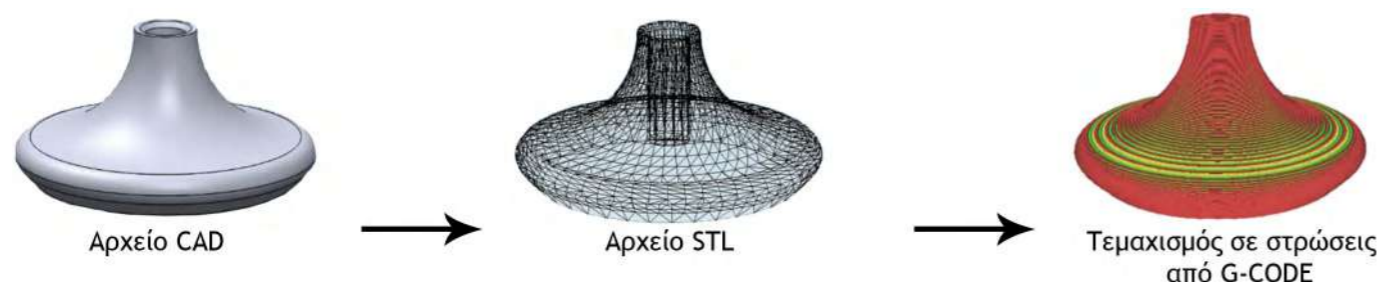
Πέρα από τη δημιουργία τρισδιάστατου σχεδίου με 3D Scanning ή την απόκτηση έτοιμων τρισδιάστατων σχεδίων μέσα από ηλεκτρονικές πλατφόρμες όπως το Thingiverse, υπάρχει μια ποικιλία εργαλείων τρισδιάστατης σχεδίασης και μοντελοποίησης. Μερικά λογισμικά CAD που χρησιμοποιούνται στον τομέα της μηχανικής, της αρχιτεκτονικής, του σχεδιασμού προϊόντων και του βιομηχανικού σχεδιασμού όπως το Tinkercad, OpenSCAD, Autodesk Fusion 360 και το Blender είναι διαθέσιμα δωρεάν, ενώ άλλα, όπως το Rhinoceros (Rhino 3D), το PTC Creo, το CATIA, το Autodesk 3ds Max (Taylor et al., 2003), το Autodesk Maya και το SolidWorks (Dassault Systèmes Solidworks Corp., Waltham MA, ΗΠΑ) διατίθενται επί πληρωμή. Διαφέρουν ως προς την καμπύλη εκμάθησης, τη φιλικότητα προς τον χρήστη, τη δυνατότητα εφαρμογής σε συγκεκριμένες εφαρμογές, τα χαρακτηριστικά, την ευελιξία και τις δυνατότητες κατά τον σχεδιασμό, το κόστος και τα ζητήματα πνευματικών δικαιωμάτων (Fabian, 2017).

Η μετατροπή του μοντέλου CAD σε κατάλληλο αρχείο εξαγωγής αποτελεί το δεύτερο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στο μεταβατικό αυτό στάδιο, το ψηφιακό μοντέλο αποθηκεύεται και εξάγεται σε κατάλληλο τύπο αρχείου. Ο τύπος .stl είναι ένας κοινά αποδεκτός τύπος που ανοίγει με την πλειονότητα των σχεδιαστικών λογισμικών. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της συμπαγούς γεωμετρίας για τρισδιάστατα εκτυπώσιμα μέρη μοντελοποιώντας τις επιφάνειες του αντικειμένου ως τρίγωνα, των οποίων οι ακμές και οι κορυφές ταυτίζονται με τα άλλα γειτονικά τρίγωνα. Η ανάλυση του αρχείου .stl επηρεάζει την ποιότητα εκτύπωσης· εάν η ανάλυση είναι πολύ υψηλή, τα τρίγωνα που δημιουργούνται μπορεί να επικαλύπτονται, ενώ εάν είναι πολύ χαμηλή, θα παρουσιάζουν κενά μεταξύ τους, καθιστώντας το μη εκτυπώσιμο. Άλλοι τύποι αρχείων λιγότερο δημοφιλείς αποτελούν τα .obj, amf, .ply, .wrl, .vrml, .obj (Rhinoceros, 2021), .dxf, .iges, .step κ.λπ. (Levy et al., 2003).

Ακολούθως, το αρχείο εισάγεται σε ένα λογισμικό slicer, το οποίο χωρίζει το προς εκτύπωση σχέδιο σε πολλά δισδιάστατα στρώματα καθορίζοντας περαιτέρω τον τρόπο εκτύπωσης κάθε στρώσης από τον 3D εκτυπωτή (Melnikova et al., 2014). Η πράξη μετατροπής ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε ένα σύνολο οδηγιών για τους τρισδιάστατους εκτυπωτές ονομάζεται Slicing. Το λογισμικό slicer μετατρέπει το αρχείο σε g-code που δίνει εντολές στον εκτυπωτή αποκρυπτογραφώντας τις συντεταγμένες και παρέχοντας εντολή κίνησης (Ahrendt & Karam, 2020). Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να εισάγει δομές στήριξης, αν και όπου χρειάζονται, οι οποίες αφαιρούνται μετά την εκτύπωση. Τα λογισμικά ανοιχτού κώδικα Ultimaker Cura LG-PLv3 και Simplify3D, είναι μερικά από τα δημοφιλή λογισμικά κοπής (Dip et al., 2020).

Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, ο εκτυπωτής διαβάζει τα δεδομένα από το αρχείο και προσθέτει διαδοχικά στρώματα υλικού για την κατασκευή του τρισδιάστατου αντικειμένου. Χρησιμοποιώντας την αρχή της διαστρωμάτωσης (layering), οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές



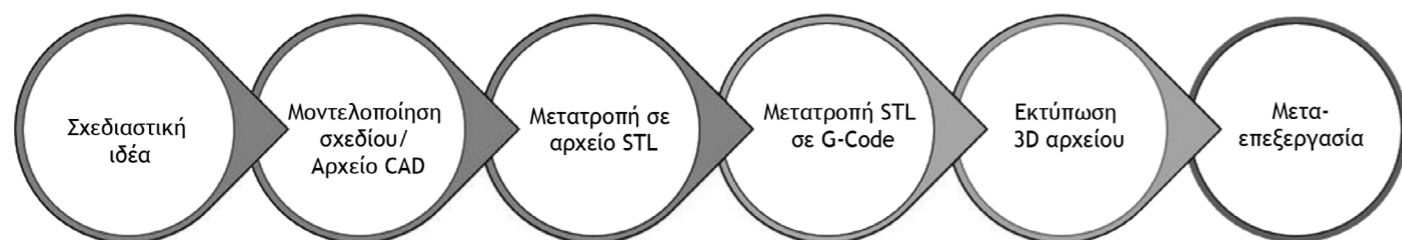


Στάδια ψηφιακού σχεδιασμού

Πηγή: <https://qph.cf2.quoracdn.net/main-qimg-8035d693de248dd38e98b9b0b1e1ce74>

μπορούν να δημιουργήσουν αντικείμενα από διάφορα υλικά σε γεωμετρίες που είναι αδύνατον να επιτευχθούν με άλλες τεχνικές κατασκευής. Επειδή ο σχεδιασμός είναι ψηφιακός, τα τελικά προϊόντα μπορούν να παραχθούν από οποιονδήποτε διαθέσιμο τρισδιάστατο εκτυπωτή.

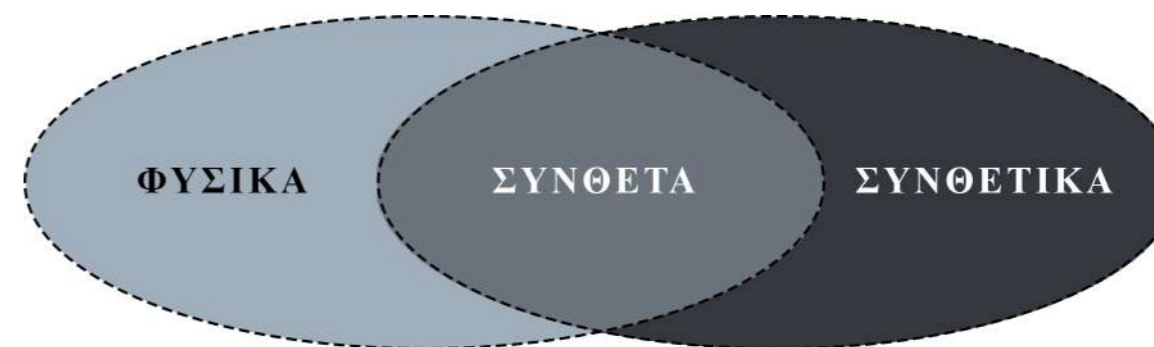
Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το εκτυπωμένο προϊόν παίρνει την τελική μορφή του με τις απαιτούμενες διαδικασίες φινιρίσματος. Ο απαιτούμενος χρόνος και η ανθρώπινη συμμετοχή στη διαδικασία ποικίλλουν ανάλογα με παράγοντες όπως το μέγεθος, το ύψος, η πολυπλοκότητα των προϊόντων, τα υλικά εκτύπωσης και η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης (Pereira et al., 2019).



Από την αρχική ιδέα μέχρι το τελικό προϊόν

## ΥΛΙΚΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ: ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ

Τα υλικά της τρισδιάστατης εκτύπωσης προέρχονται από διαφορετικές πολυμερικές προελεύσεις είτε συνθετικές είτε φυσικές είτε συνδυασμό των δύο. Ο συνδυασμός διαφόρων υλικών διαφορετικών μορφών μπορεί να εμφανίσει χαρακτηριστικά που είναι αδύνατο να επιτευχθούν από ένα μόνο υλικό. Τα επιμέρους υλικά μπορούν να παραμείνουν αμετάβλητα προσδίδοντας τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους στο τελικό προϊόν. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη εκτύπωση έχουν διάφορες μορφές, όπως στερεά νήματα, σκόνη ή υγρή μορφή, ενώ οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν τη δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών σκληρών και μαλακών υλικών (πλαστικά, ρητίνες, μέταλλα, πολυμερή, τρόφιμα και βιοϋλικά). Οι τρεις τύποι υλικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση – φυσικά, συνθετικά και σύνθετα υλικά και οι διάφορες μορφές τους – συζητούνται παρακάτω. Η μελέτη των υλικών δεν έγινε στο βάθος της επιστήμης των υλικών, καθώς πρόκειται για ένα άγνωστο και εξειδικευμένο πεδίο γνώσης.



### • Φυσικά υλικά

Τα φυσικά πολυμερή, γνωστά και ως βιοπολυμερή, προέρχονται από τα φυτά ή είναι προϊόντα άλλων ζωντανών οργανισμών (Gopi et al., 2019). Τα νήματα για την τρισδιάστατη εκτύπωση σπάνια χρησιμοποιούνται με τη μορφή που υπάρχουν στη φύση, καθώς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε FDM και χρειάζονται τροποποίηση (Wang et al., 2017). Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν, εάν παρασκευαστούν ως υδρογέλη (υδρόφιλο πολυμερές που δεν διαλύεται στο νερό) που χρησιμοποιεί κυτταρίνη και νερό και αυξάνει την ανάλυση εκτύπωσης μετά το στέγνωμα. Παρόλα αυτά, έχουν χρησιμοποιηθεί παρθένα φυσικά πολυμερή ως νήματα

και υπάρχουν περιπτώσεις όπου διαπιστώθηκε ότι τα νημάτια είναι πολύ αποτελεσματικά στην εφαρμογή τους (Tenhunen et al., 2018).

Η χρήση της κυτταρίνης σε διάφορες μορφές της χωρίς χρήση κόλλας ή άλλων πρόσθετων επιτρέπει την παραγωγή πιο βιώσιμων υφασμάτων (Huber et al., 2012), ενώ σε άλλες περιπτώσεις βελτιώνει τις μηχανικές και επιφανειακές ιδιότητες των τρισδιάστατων εκτυπώσιμων βιοπολυμερών (Palaganas et al., 2017). Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης υφασμάτων Co-syflex της εταιρείας κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων TamiCare (Μάντσεστερ, Ηνωμένο Βασίλειο) μπορεί να εκτυπώσει μέρη του ενδύματος απευθείας από κοντές φυσικές υφαντικές ίνες όπως το βαμβάκι, μαζί με ρεγίον βισκόζης και πολυαμίδιο αναμειγμένο με διάλυμα πολυμερούς με βάση το νερό, χρωστικές και πρόσθετα όπως φυσικό λατέξ, πυρίτιο, σιλκόνη, τεφλόν, πολυουρεθάνη. Ακόμα χρησιμοποιεί πρώτες ύλες από ανακυκλωμένα υλικά (Tamicare, 2021).

- **Συνθετικά υλικά (συνθετικές ύλες, ρητίνες, πλαστικά ή πολυμερή)**

Πριν από την εισαγωγή των σύνθετων νημάτων, τα συνθετικά νήματα χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Για την τρισδιάστατη εκτύπωση το υλικό είναι απαραίτητο να έχει καλή αντοχή εφελκυσμού, υψηλό ρυθμό τήξης και υψηλό όριο θραύσης (Kabir et al., 2021). Συνθετικά πολυμερή υλικά όπως το PLA έχουν πολλά υποσχόμενες δυνατότητες και εύρος εφαρμογής (Narula et al., 2018). Το PLA που χρησιμοποιείται και για την κατασκευή τρισδιάστατων εκτυπωμένων ενδυμάτων (Sprahiu et al., 2020) έχει μεγαλύτερη επιμήκυνση και μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό. Σύμφωνα με έρευνες διαπιστώθηκε ότι μπορούν να εκτυπωθούν με soft PLA ελαφριά αντικείμενα που μοιάζουν με δαντέλα (Melnikova et al., 2014). Το soft PLA, σε συνδυασμό με λιγότερο εύκαμπτα υλικά, όπως ένα από τα προϊόντα LayFilaments που αναπτύχθηκε από την Kai Parthy, το BendLay (CC-Products, Κολωνία, Γερμανία) μπορεί να είναι αποδοτικά στην δημιουργία ενδυμάτων (Melnikova et al., 2014). Η Materialize (Leuven, Βέλγιο) εισήγαγε ένα ελαφρύ υλικό, το TPU-92A-1, που έχει υψηλή ανθεκτικότητα και ελαστικότητα αλλά και απαλή αίσθηση για την εκτύπωση κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων (Hennessey, 2021). Ωστόσο, το σκληρό PLA και το νάιλον που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση SLS δεν ενδείκνυται για ρούχα.

Όσον αφορά το ABS εξετάστηκε η μηχανική συμπεριφορά του, συγκρίνοντας τις μεθόδους FDM και της χύτευσης με έγχυση. Προέκυψε ότι η μέθοδος της έγχυσης είχε καλύτερα αποτελέσματα, καθιστώντας το ιδανικό για δημιουργία στοιχείων σύνδεσης (Vanderploeg et al., 2017). Ωστόσο, το ABS συχνά διαπιστώνεται ότι είναι πολύ εύθραυστο για λεπτότερες δομές.

Αντιθέτως το PLA προτιμάται επειδή είναι βιοαποικοδομήσιμο, έχει χαμηλότερο σημείο τήξης και υψηλότερη σταθερότητα διαστάσεων σε σύγκριση με το ABS. Ωστόσο, είναι υδατοδιαλυτό και δεν έχει μεγάλη διάρκεια στο χρόνο (Pei et al., 2015). Η ανακύκλωση πολυεστερικών νημάτων με χρήση τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ένα παράδειγμα βιώσιμης παραγωγής. Χρειάζεται όμως περαιτέρω έρευνα στα συνθετικά νήματα, ώστε να έχουν ευρύτερη εφαρμογή.

- **Σύνθετα υλικά**

Τα σύνθετα υλικά είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών με διαφορετικές φυσικές ή χημικές ιδιότητες. Όταν συνδυάζονται, παράγουν ένα υλικό με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις αρχικές τους ιδιότητες. Τα δύο κύρια συστατικά σε ένα σύνθετο υλικό είναι η μήτρα- το βασικό υλικό- και η ίνα- το υλικό ενίσχυσης-, ενώ μπορεί να περιέχουν και άλλα υλικά για βελτιωμένη απόδοση.

Οι βελτιωμένες ιδιότητες των σύνθετων υλικών που βασίζονται σε παράγωγα κυτταρίνης τα καθιστούν δημοφιλή σε διαφορετικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων (Orpea & Voicu, 2020). Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες μπαμπού μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης στην τρισδιάστατη εκτύπωση (Long et al., 2019). Σύμφωνα με έρευνα, ο συνδυασμός νανοϊνιδίων κυτταρίνης (CNFs) με PLA παρέχει βελτιωμένη αντοχή εφελκυσμού σε σχέση με το κοινό PLA (Wang et al., 2020). Ακόμα, πειράματα έχουν δείξει ότι μείγμα πολυδροξυαλκανοϊκού (PHA) και PLA με ανακυκλωμένες ίνες ξύλου, που εκτυπώνεται με FDM, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την ανακυκλωσιμότητα, περιορίζοντας ταυτόχρονα την αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων κατά την εκτύπωση βιοσύνθετων υλικών (Duiyou et al., 2016).

Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα πολυμερή έχουν επίσης συνδυαστεί απευθείας με υφαντικές ίνες, νήματα και υφάσματα για τη δημιουργία σύνθετων υλικών και τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων (Dopke et al., 2017).

---

## Από την Κλωστοϋφαντουργία στην Τρισδιάστατη Εκτύπωση

---

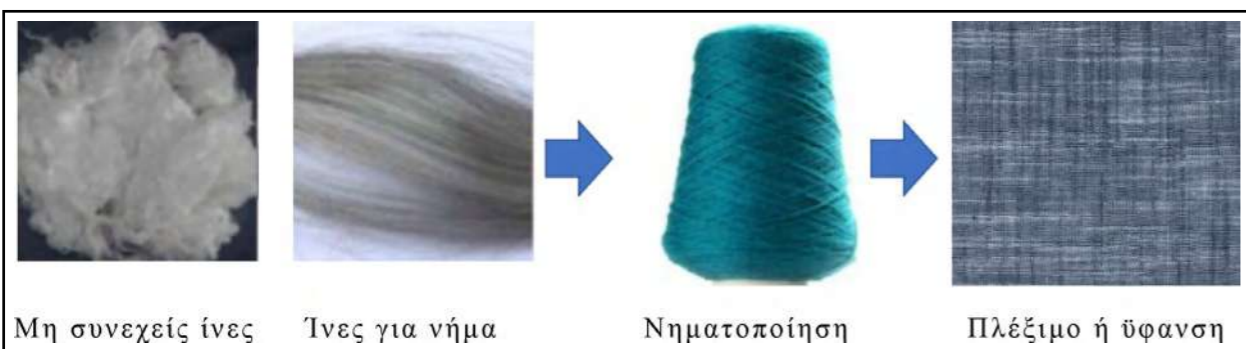
“Η ένδυση αντιμετωπίζεται, όχι μόνο ως το όριο του ατόμου ως βιολογική και ψυχολογική οντότητα αλλά και ως σύνορο του κοινωνικού του εαυτού.” (Turner, 2012).

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη δημιουργία υφασμάτων. Αρχικά, αναλύονται οι κατηγορίες των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα στην κατασκευή ενδυμάτων, ώστε να γίνουν κατανοητοί οι βασικοί τύποι υφασμάτων και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, ερευνάται η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη δημιουργία υφασμάτων αλλά και ο συνδυασμός τρισδιάστατης εκτύπωσης με κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Παρουσιάζονται συγκεκριμένες μελέτες εφαρμογής που επικεντρώθηκαν σε αυτές τις δύο κατευθύνσεις, αξιολογούνται τα αποτελέσματά τους και προκύπτουν συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές που θα αποτελέσουν αρωγό για περαιτέρω έρευνα.

## ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ

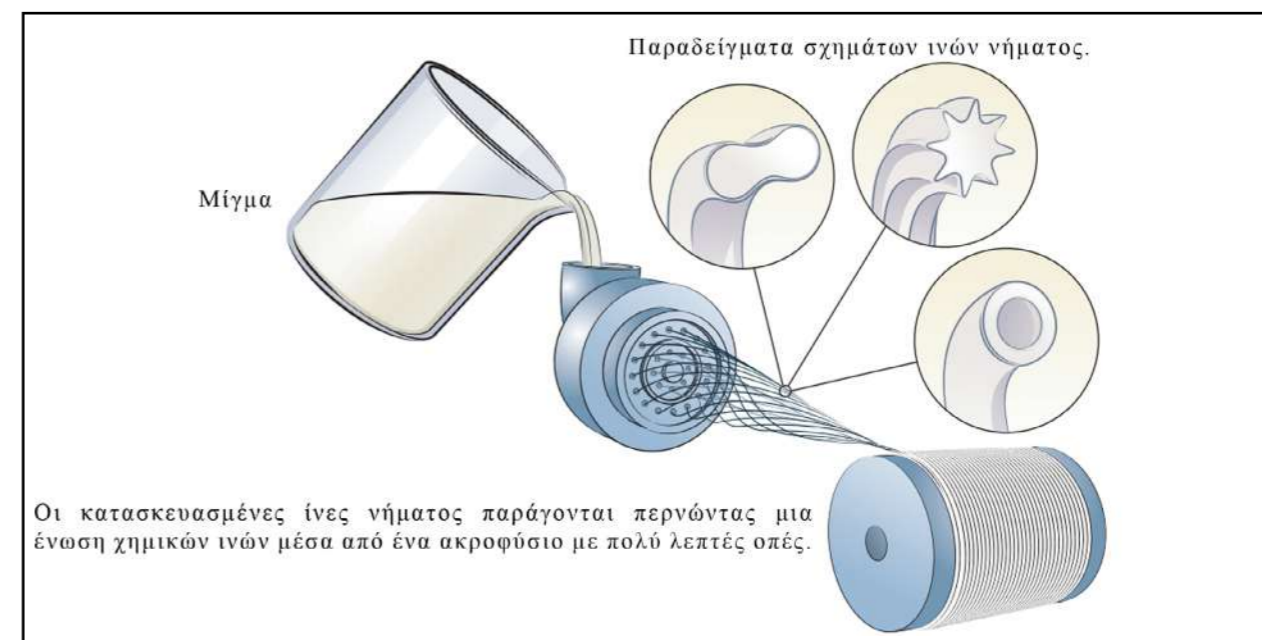
Τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα είναι κατασκευασμένα από μεγάλη ποικιλία συστατικών με τη μορφή ινών, νημάτων ή υφασμάτων (Brinks & Warmoeskerken, 2013). Οι ιδιότητες των υφασμάτων προκύπτουν τόσο από την προέλευση της ίνας (Φυσικές ή Τεχνητές/Χημικές/ Συνθετικές), όσο και από τον τρόπο κατασκευής (Υφαντά, Πλεκτά ή απευθείας από ιστούς ινών<sup>5</sup>) (Pohl, 2010).

Οι φυσικές ίνες μπορεί να είναι φυτικής, ζωικής ή ορυκτής προέλευσης. Έχουν ωραία αίσθηση στο σώμα, το αφήνουν να αναπνέει και δεν προκαλούν κακοσμία. Απαιτούν όμως υπερβολική χρήση νερού, ενέργειας και χημικών κατά την παραγωγή, ενώ δημιουργούν μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων.



Διαφορετικές μορφές κατά τη διαδικασία δημιουργίας υφάσματος  
(Εικόνα ιδιόχειρης επεξεργασίας)

Οι τεχνητές, χημικές ή συνθετικές ίνες παράγονται τεχνητά από ποικίλες πρώτες ύλες όπως για παράδειγμα το πετρέλαιο (πολυέστερ, νάιλον, κλπ.). Υπάρχουν όμως και υφάσματα με τεχνητές ίνες από φυτική πρώτη ύλη (πχ. βισκόζη) που έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλή. Οι ίνες αυτής της κατηγορίας είναι ανακυκλώσιμες και ανθεκτικές. Με τη διαρκή ανάπτυξη της τεχνολογίας, παράγονται ίνες με ιδιαίτερες ιδιότητες. Ακόμα, με τη βελτιστοποίηση των τρόπων παραγωγής ελαχιστοποιείται η χρήση νερού και η χημική μόλυνση, ενώ δημιουργούνται λιγότερα απορρίμματα. Από την άλλη πλευρά, αναλόγως την προέλευση των ινών, ενδέχεται να υπάρχουν αυξημένες χημικές εκπομπές και απόβλητα, ενώ ορισμένα υφάσματα δεν έχουν τόσο ωραία αίσθηση στο σώμα και προκαλούν κακοσμία λόγω ιδρώτα.



(Baugh, 2011)

Ως προς τον τρόπο κατασκευής τα υφάσματα χωρίζονται σε:

- 1. **Υφαντά** – (καπαρντίνα, ντενιμ, βελούδο, κοτλέ, κρεπ, μπουκλέ, τουιντ, σατέν, κρεπ σατέν, ρασμίρ, ταφτάς, σουά σοβάς, ποπλίνα, broderie anglaise, οργάντζα, μουσελίνα, ζορζέτα, βουάλ, ζακάρ)

Τα υφαντά υφάσματα παράγονται με εναλλαγή κάθετων και οριζόντιων νημάτων με τη χρήση αργαλειών. Κάθε κάθετο νήμα ονομάζεται *στημόνι* ενώ κάθε οριζόντιο *υφάδι*. Γενικά τα υφαντά υφάσματα δεν έχουν ελαστικότητα στο μήκος τους ενώ το πάχος του νήματος, η πυκνότητα και ο τρόπος ύφανσης καθορίζει το είδος και τις ιδιότητες του υφάσματος (Baugh, 2011).

- 2. **Πλεκτά** (ζέρσεϊ, interlock, πικέ, βελουτέ, λύκρα, φλις, σενίλ, πετσετέ, τούλι, δαντέλα, φούτερ)

Τα πλεκτά υφάσματα παράγονται από ένα ή περισσότερα νήματα με τη χρήση πλεκτικών μηχανών. Αποτελούνται από θηλιές που μπαίνουν η μία μέσα στην άλλη προσδίδοντας ελαστικότητα στο ύφασμα (Pei et al., 2015). Πρόκειται για μια γρήγορη παραγωγική διαδικασία που δημιουργεί ποικιλία υφών και σχεδίων. Τα πλεκτά υφάσματα δεν προστατεύουν από τον αέρα και μπορεί να χάσουν τη φόρμα τους με τον καιρό (Baugh, 2011).

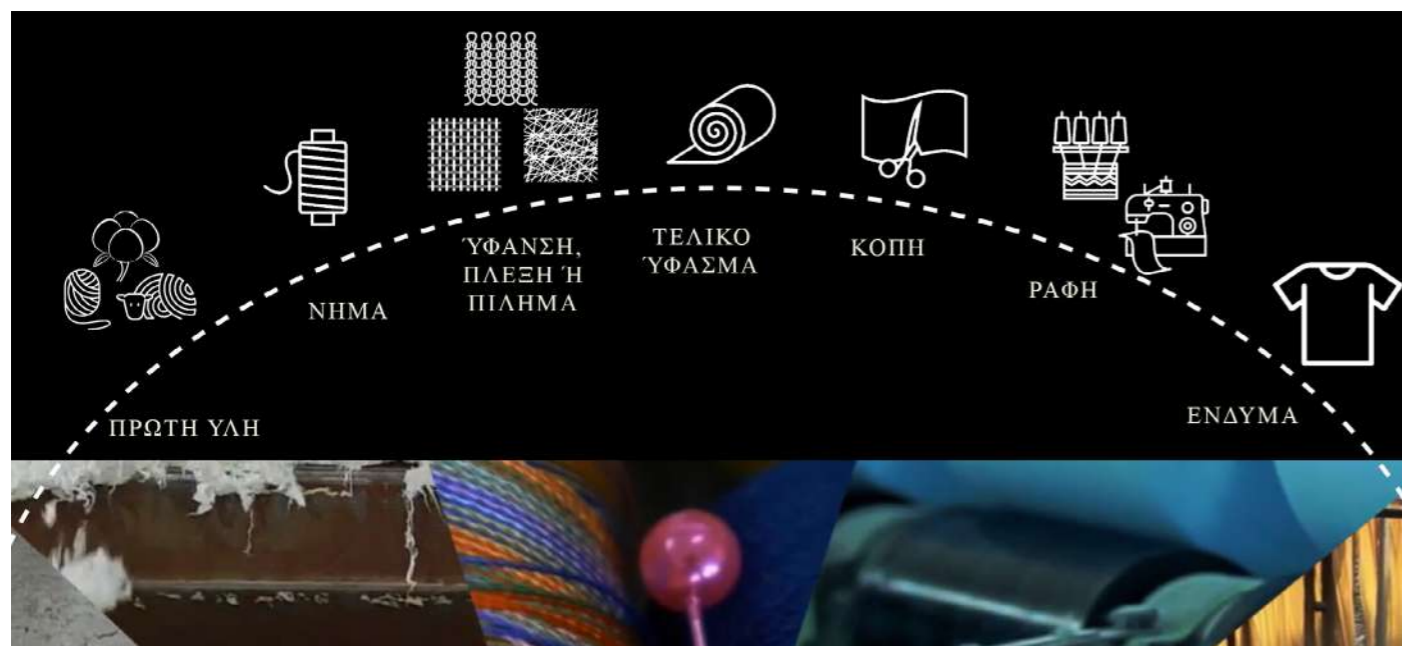
5 Οι ίνες είναι οι μικρότερες δομικές μονάδες του υφάσματος, από τις οποίες αποτελούνται τα νήματα.

• 3. «*Massed*» Ίνα σε ύφασμα (Τσόχα- Felt)

Με αυτόν τον τρόπο κατασκευής, τα υφάσματα παρασκευάζονται απευθείας από ίνες. Πρόκειται για μία οικολογική μέθοδο, καθώς μπορεί να χρησιμοποιήσει κατάλοιπα και ανακυκλώσιμα υλικά. Λόγω της κατασκευής του, όμως, το ύφασμα δεν είναι αρκετά δομημένο (Baugh, 2011).



Αφού το ύφασμα παραχθεί με μία από τις προαναφερθείσες μεθόδους, είναι πιθανό να δεχτεί μηχανικές ή και χημικές επεξεργασίες, για να αποκτήσει ιδιότητες που θα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος. Αν και οι παραδοσιακές μέθοδοι χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες νερού και χημικούς παράγοντες φινιρίσματος, υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις σε ορισμένες από τις διεργασίες φιλικότερες προς το περιβάλλον. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι διαδικασίες, το ύφασμα είναι έτοιμο να κοπεί και να ραφτεί για τη δημιουργία ενδυμάτων (Tyler, 2009).



Παραδοσιακή διαδικασία δημιουργίας ρούχου (Εικόνα ιδιόχειρης επεξεργασίας)

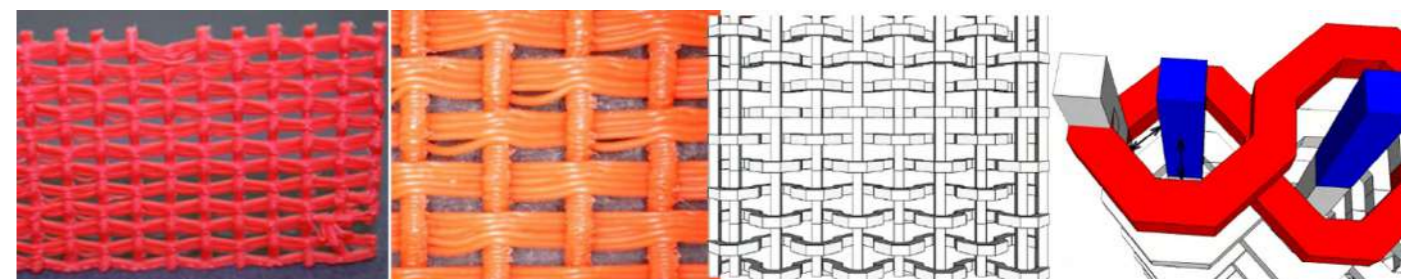
Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ

Μία νέα προσθήκη στους τρόπους κατασκευής υφασμάτων είναι η τρισδιάστατη τυπωμένη δομή που μοιάζει με ύφασμα (Chakraborty & Biswas, 2020). Μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, μπορούν να κατασκευαστούν ολοκληρωμένα ενδύματα χωρίς να χρειαστούν αυτές οι διαδικασίες. Για παράδειγμα, τα τρισδιάστατα μέρη ενός ενδύματος μπορούν να εκτυπωθούν σε έναν εξειδικευμένο τρισδιάστατο εκτυπωτή και στη συνέχεια να συναρμολογηθούν για τη δημιουργία ενός φορέματος (Sprahiu et al., 2020).

Τα περισσότερα τρισδιάστατα εκτυπωμένα ρούχα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην καθημερινότητα των χρηστών, αλλά η συνεχής ανάπτυξη ποικίλων εύκαμπτων δομικών υφασμάτων μπορεί να βελτιώσει τα ρούχα που εκτυπώνονται τρισδιάστατα (Montagna et al., 2018). Παρόλο που επί του παρόντος δεν έχουν επιτευχθεί πλήρως οι ιδιότητες των υφασμάτων, έχει επιτευχθεί κάποιος βαθμός διαπερατότητας και ευελιξίας.

Χρησιμοποιώντας τις μεθόδους SLS και FDM, παρατηρήθηκε ότι το εύθραυστο ABS δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις λεπτής δομής, ενώ το PLA και το νάιλον που χρησιμοποιούνται στο SLS μπορεί να είναι πολύ σκληρά συγκριτικά με τα τυπικά υφάσματα (Melnikova et al., 2014). Ωστόσο, το soft PLA σε συνδυασμό με λιγότερο εύκαμπτα υλικά, όπως το BendLay, μπορεί να αναπαράγει δομές που βασίζονται σε υφάσματα, αναπτύσσοντας σχέδια που δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν από τα παραδοσιακά υφάσματα.

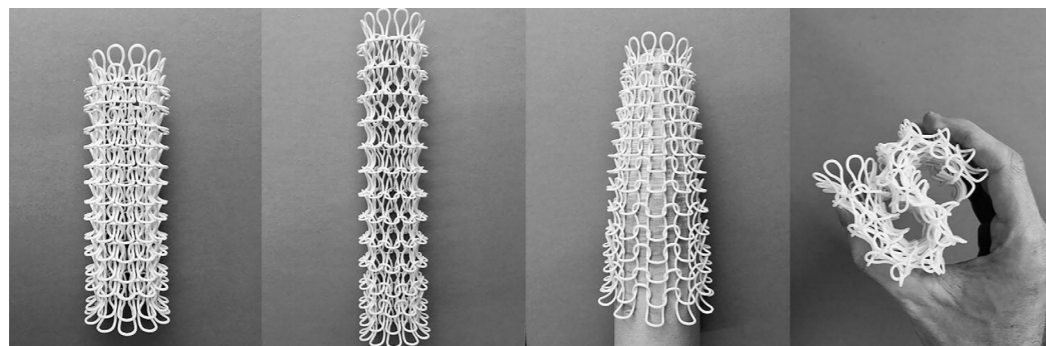
Ακόμα, η δημιουργία τρισδιάστατων υφασμάτων μπορεί να γίνει με εκτύπωση που ακολουθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα προσομοιώσεις πλεκτών και υφαντών κατασκευών (Britt et al., 2008). Όσον αφορά το υφαντό ύφασμα, τα νήματα στημονιού και υφαιδιού σχεδιάζονται ξεχωριστά χρησιμοποιώντας λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης (CAD) και στη συνέχεια ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν ένα μοντέλο σε αρχείο μορφής .stl. Το .stl αρχείο εισάγεται στον τρισδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος εκτυπώνει ύφασμα απλής ύφανσης (Partsch et al., 2015).



Παραδείγματα σχεδιασμού και εκτύπωσης τρισδιάστατων πλεκτών  
 Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/283288900\\_3D\\_PRINTED\\_TEXTILE\\_FABRICS\\_STRUCTURES](https://www.researchgate.net/publication/283288900_3D_PRINTED_TEXTILE_FABRICS_STRUCTURES)

Μελέτες εφαρμογής έχουν δημιουργήσει τρισδιάστατα εκτυπωμένα υφάσματα που βασίζονται στη λογική των πλεκτών, τα οποία παρουσιάζουν την απαιτούμενη ευελιξία και ελαστικότητα (Bingham et al., 2007, Pei et al., 2015). Τα πλεκτά υφάσματα σχηματίζονται από τη διασύνδεση ενός νήματος για τη δημιουργία σειρών συμμετρικών θηλιών (Beecroft, 2019). Μετά από δοκιμές στην δημιουργία πλεκτών εκτυπωμένων δομών μονής και διπλής όψης (interlock), η Beecroft (Beecroft, 2016) εκτύπωσε μια σωληνοειδή δομή πλέξης<sup>6</sup> μονής όψης με χρήση τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου κατασκευασμένου σε λογισμικό Rhino 3D. Αρχικά σχεδιάστηκε ο μονήρης βρόγχος, στη συνέχεια τροφοδοτήθηκε με πάχος και το μοτίβο επαναλήφθηκε μέχρις ότου δημιουργήθηκε το επιθυμητό πλάτος και μήκος. Το τελικό προϊόν που εκτυπώθηκε από νάιλον μέσω της διαδικασίας SLS παρουσίασε μεγάλη ελαστικότητα. Λόγω έλλειψης ευκαμψίας του ίδιου του υλικού, όμως, οι μηχανικές ιδιότητες διαφέρουν, συγκριτικά με τα παραδοσιακά υφαντικά νήματα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν τη δυνατότητα εκτύπωσης εύκαμπτων δομών σε διάφορες κλίμακες που συνδυάζουν τις ιδιότητες των παραδοσιακών πλεκτών υφασμάτων κατασκευών και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Επιπλέον, αυτές οι δομές εκτυπώνονται σε διαφορετικά πάχη, επιδεικνύοντας καλή ευελιξία, αντοχή και μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού, οι οποίες μπορεί να τις καταστήσουν βιώσιμες λύσεις για εφαρμογή στην κλωστοϋφαντουργία. Περαιτέρω έρευνα σε διαφορετικούς τύπους υλικών σε σκόνη, όπως θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU), μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή μαλακότερων υφασμάτων, καταλληλότερων για εφαρμογή σε ενδύματα (Beecroft, 2016).



Σωληνοειδής πλεκτή δομή

Πηγή: [https://parametrichouse.com/wp-content/uploads/2021/09/Flexible\\_Textile-01.jpg](https://parametrichouse.com/wp-content/uploads/2021/09/Flexible_Textile-01.jpg)

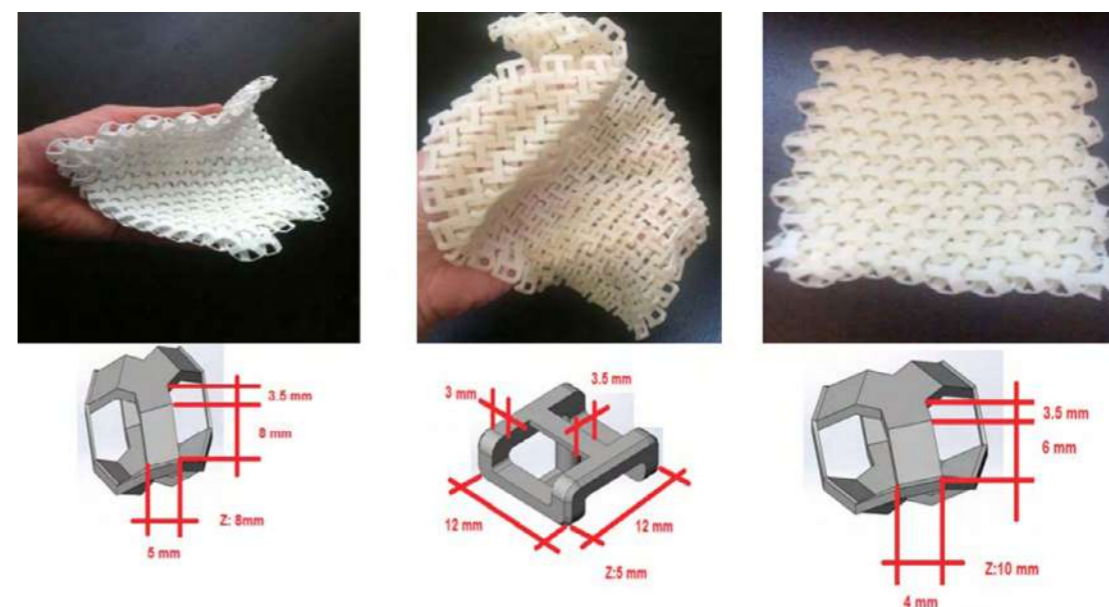
Ακόμα, με τη χρήση της τρισδιάστατης τεχνολογίας έχει εισαχθεί η εγκάρσια σωληνοειδής υφή πλεξίδας (Maypole braid- γαϊτανάκι) που προσομοιώνει τη διαμόρφωση του ελικοειδούς νήματος.



Εκτύπωση τρισδιάστατης πλέξης τύπου γαϊτανάκι

Πηγή: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1528083720912213>

Αντίστοιχα, ερευνητές ανέπτυξαν τρισδιάστατα εκτυπωμένα υφάσματα με δομή αλυσίδα με μεθόδους FDM και SLS που μπορούν να λυγίσουν και να διπλωθούν όπως τα υφάσματα παραδοσιακών ενδυμάτων (Gürçüm et al., 2018).



Εκτυπωμένες δομές επαναλαμβανόμενων μοτίβων τύπου αλυσίδα

Πηγή: [https://www.scitechnol.com/peer-review/implementing-3d-printed-structures-as-the-newest-textile-form-cL16.php?article\\_id=7203](https://www.scitechnol.com/peer-review/implementing-3d-printed-structures-as-the-newest-textile-form-cL16.php?article_id=7203)

6 Τα σωληνοειδή πλεκτά υφάσματα κατασκευάζονται με ελικοειδή σύμπλεξη δύο σετ νημάτων με κυκλικό τρόπο: το ένα σετ νημάτων τρέχει προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού ενώ το άλλο αριστερόστροφα.

Βασιζόμενο στην αλυσιδωτή κατασκευή το Modeclix συνιστά ένα προσαρμόσιμο τρισδιάστατο ύφασμα με δομή αλυσίδας από σκόνη νάιλον, εκτυπωμένο με τη μέθοδο SLS (Bloomfield & Borstrock, 2018). Το Modeclix έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη δημιουργία μιας σειράς ρούχων και αξεσουάρ μόδας, για να καταδείξει την ευελιξία του συστήματος συνδέσμων. Τα φύλλα των συνδεδεμένων υφασμάτων τυπώνονται με πολυαμίδιο (νάιλον PA12), ενώ το υλικό μπορεί να υποστεί μεταγενέστερη επεξεργασία και στη συνέχεια να βαφτεί, γεγονός που προκαλεί την ενσωμάτωση των μοτίβων σε υφαντικές φόρμες. Καθώς η λογική βασίζεται σε δομή αλυσίδας, διευκολύνεται η επισκευή και η επαναχρησιμοποίηση. Το Modeclix ενσωματώνει τους παράγοντες μιας κυκλικής οικονομίας στον κύκλο ζωής του προϊόντος. Δηλαδή, ένα ρούχο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την κατασκευή νέων ρούχων, αξεσουάρ ή άλλων προϊόντων. Η περαιτέρω ανάπτυξη των δυνατοτήτων του συστήματος μέσω νέων εξαρτημάτων θα εξασφαλίσει επίσης την προσαρμοστικότητα και τη μελλοντική διαθεσιμότητα των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Τα νέα προηγμένα κατασκευαστικά εξαρτήματα χρειάζεται να μπορούν να παρατείνουν και να βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, γεγονός που θα επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής.



Modeclix: σύστημα συνδέσμων στην δημιουργία ρούχων και αξεσουάρ μόδας.

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492817301848>

Οι διαφορετικές υφές που υπάρχουν στα νήματα είναι, επιπρόσθετα, δυνατόν να παραχθούν με την τρισδιάστατη εκτύπωση, έχοντας ως στόχο τη δημιουργία εύκαμπτων δομών που μπορούν να ακολουθούν το σχήμα και την κίνηση του σώματος. Ο Hudson εισήγαγε έναν πρωτότυπο τρισδιάστατο εκτυπωτή για εύκαμπτα και μαλακά τρισδιάστατα αντικείμενα. Αυτός ο εκτυπωτής λειτουργεί με βάση τη διαδικασία του felting -πιλήματος<sup>7</sup>. Λειτουργεί παρόμοια με έναν εκτυπωτή FDM, αλλά αντί να εξωθει λιωμένο πλαστικό νήμα σε στρώματα χρησιμοποιεί νήμα και μία βελόνα. Η όλη διαδικασία (λογισμικό σχεδίασης, τεμαχισμός κλπ.) είναι ίδια με αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για την παραγωγή της δομής σε αυτόν τον τύπο τρισδιάστατου

εκτυπωτή, μια βελόνα περνά συνεχώς μέσα από ένα σώμα ινών, περιπλέκοντάς τες, ακολουθώντας την παραδοσιακή τεχνική κατασκευής πιλήματος (Hudson, 2014).



Τρισδιάστατη “εκτύπωση” που βασίζεται στο πύλημα.

Πηγή: <https://3dprint.com/2861/3d-felting-printer/>

Πρόσφατα επιστήμονες από το MIT ανέπτυξαν ένα μηχανικά ανώτερο ύφασμα “μαλακό σαν δέρμα”. Η δομή είναι εμπνευσμένη από το αλληλένδετο μοτίβο του κολλαγόνου και έχει αποδοθεί με χρήση θερμοπλαστικού υλικού TPU (Hay, 2021). Επιπλέον, ο Jack Forman (MIT Media Lab) εισήγαγε πρόσφατα μια τεχνική για να μετατρέψει το ελάττωμα που υπάρχει κατά την εξώθηση υλικού από τους τρισδιάστατους εκτυπωτές σε ένα εύκαμπτο, λεπτό υπόστρωμα υφάσματος. Το προϊόν ονομάστηκε “DefexTiles”, το οποίο είναι μια δομή που μοιάζει με υφαντό (Ham, 2021).



Τρισδιάστατο ύφασμα εμπνευσμένο από το κολλαγόνο, κατασκευασμένο με TPU.

Πηγή: <https://3dprintingindustry.com/news/the-mit-scientists-making-3d-printed-fabrics-as-soft-as-skin-157609/>

DefexTiles- τρισδιάστατη δομή που μοιάζει με υφαντό.

Πηγές: <https://www.3dnatives.com/en/defextiles-mit-311020204/>  
<https://library.artstor.org/#/public/29904398>

7 Πύλημα: ύφασμα από συμπιεσμένες ίνες (φυσικές ή τεχνητές).

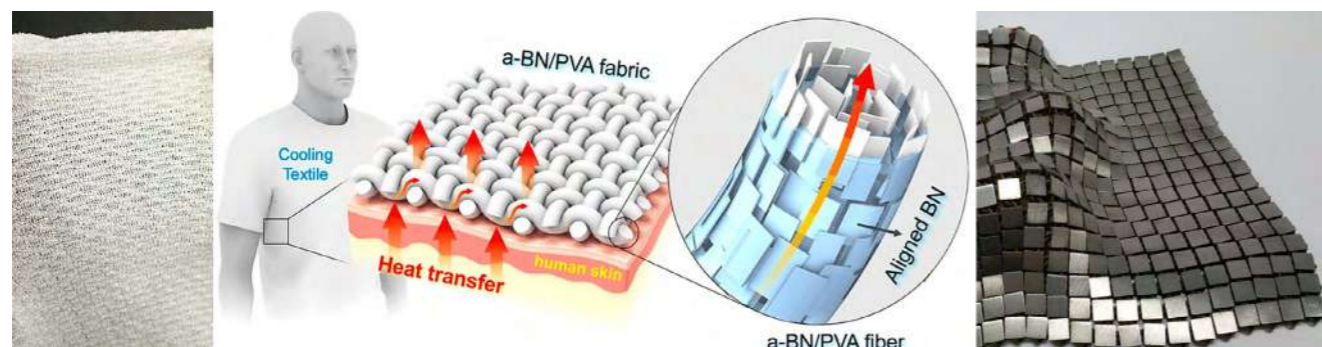
Μία ομάδα ερευνητών εκτύπωσε μια ποικιλία δομών που μοιάζουν με δαντέλα συνδυάζοντας σκληρά και εύκαμπτα υλικά με χρήση των μεθόδων SLS και FDM (Melnikova et al., 2014).



Τρισδιάστατες εκτυπωμένες δαντέλες

Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/264549756\\_3D\\_printing\\_of\\_textile-based\\_structures\\_by\\_Fused\\_Deposition\\_Modelling\\_FDM\\_with\\_different\\_polymer\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/264549756_3D_printing_of_textile-based_structures_by_Fused_Deposition_Modelling_FDM_with_different_polymer_materials)

Επιπρόσθετα, ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Μέριλαντ ανέπτυξαν ένα ύφασμα θερμικής ρύθμισης με χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το ύφασμα δημιουργήθηκε από τρισδιάστατα εκτυπωμένες ίνες κατασκευασμένες από σύνθετο υλικό νανοϊνών (μείγμα PVA και νιτρικού βορίου), οι οποίες υφαίνονται, δημιουργώντας ένα ύφασμα με υψηλό επίπεδο θερμικής αγωγιμότητας. Πρόκειται δηλαδή, για ένα τρισδιάστατο ύφασμα με ικανότητα απομάκρυνσης της θερμότητας (Hay, 2021). Το ύφασμα επιτρέπει στη θερμότητα του σώματος να διέλθει, κάνοντας τον χρήστη να αισθάνεται δροσιά. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας για την κατασκευή ινών και στη συνέχεια η παραδοσιακή ύφανση είναι μια άλλη δυνατότητα χρήσης αυτής της τεχνολογίας στη μόδα. Τέλος, οι μηχανικοί της NASA από το Jet Propulsion Laboratory (JPL) ανέπτυξαν ένα πρωτότυπο, εύκαμπτο και ανθεκτικό τρισδιάστατο ύφασμα για αστροναύτες με τη μορφή συνδεδεμένων μεταλλικών πλακιδίων (Chua, 2021).



Ύφασμα που απομακρύνει τη θερμότητα κατασκευασμένο από μείγμα PVA και νιτρικό βόριο.

Πηγές: <https://www.dezeen.com/2019/02/26/temperature-regulating-fabric-university-of-maryland/>  
<https://phys.org/news/2017-11-fabric-cool.html>

Ύφασμα από τους μηχανικούς της NASA με τη μορφή μεταλλικών πλακιδίων.

Πηγή: <https://www.jpl.nasa.gov/news/space-fabric-links-fashion-and-engineering>

## ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΠΑΝΩ ΣΕ ΥΦΑΣΜΑ: ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ

Εκτός από τα υφάσματα που δημιουργούνται με τρισδιάστατη εκτύπωση, ένας αυξανόμενος αριθμός ερευνών επικεντρώνεται και στον συνδυασμό τρισδιάστατων εκτυπωμένων γεωμετριών σε ύφασμα. Ένα από τα πιο σημαντικά οφέλη είναι η λειτουργικότητα που προστίθεται σε αυτά τα υφάσματα αλλά και η αισθητική τους αξία. Για μία επιτυχημένη εκτύπωση σε ύφασμα χρειάζεται να μελετηθεί το σύνολο των τεχνικών, αντιμετωπίζοντας διάφορα ζητήματα. Οι δύο κύριοι παράγοντες που λαμβάνουμε υπόψη για τον επιτυχημένο συνδυασμό υφάσματος και πλαστικού είναι η πρόσφυση και η σταθερότητα. Ένας διαθέσιμος οδηγός που περιγράφει ορισμένες βασικές τεχνικές και πληροφορίες για απευθείας εκτύπωση σε ύφασμα (Grant, 2016) καθώς και πειράματα που έχουν γίνει προς αυτή την κατεύθυνση, αποτελούν τη βάση για την εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης πάνω σε ύφασμα.

## ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ

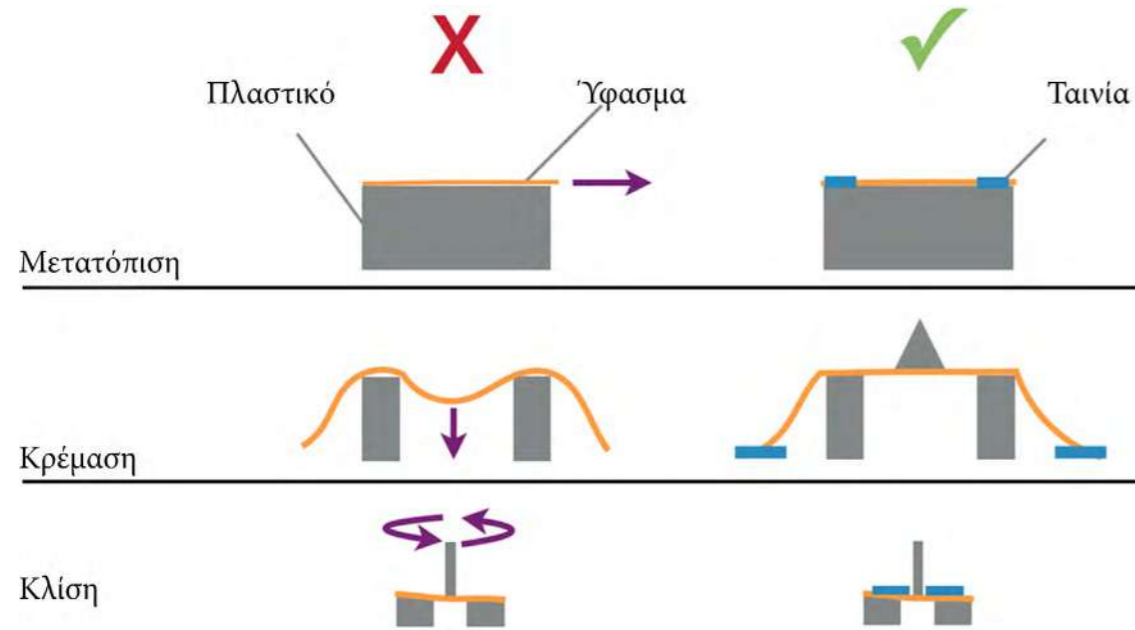
Ζητήματα όπως η κλίση ή η χαλάρωση του υφάσματος πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εκτύπωση. Ακόμα, καθώς το ύφασμα ενδέχεται να είναι μεγαλύτερο από την πλατφόρμα εκτύπωσης, μπορεί να απαιτείται επανατοποθέτηση του υφάσματος μέχρις ότου ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Ένα ζήτημα που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση είναι η σωστή ευθυγράμμιση ενός υφάσματος, το οποίο θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με χρήση ενός δείκτη λέιζερ που είναι προσαρτημένος στην κεφαλή του εξωθητήρα. Ακόμα, όταν επιλέγεται η εκτύπωση να γίνει απευθείας στο ύφασμα, το ύφασμα θα σκληρύνει επιλεκτικά σε ορισμένες περιοχές του, γεγονός που μπορεί να εξυπηρετεί ή να δυσχεραίνει το τελικό αποτέλεσμα.

Για την εξασφάλιση της σταθερότητας του υφάσματος κατά την εκτύπωση, τα σταθερά υφάσματα μπορούν να στερεωθούν με τοποθέτηση ταινίας ή σφιγκτήρων στις άκρες τους. Τα ελαστικά υφάσματα μπορεί να χρειάζονται επιπλέον στερέωμα στην κάτω πλευρά τους, όπως για παράδειγμα με τη χρήση μίας ταινίας διπλής επικόλλησης, για να αποφευχθεί η μετατόπιση κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Για ύφασμα που προορίζεται ως μεσαίο στρώμα της εκτύπωσης ισχύει η ίδια τεχνική στερέωσης του υφάσματος στις άκρες του. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κόλλα. Διαπιστώθηκε ότι η κυανοακρυλική κόλλα με ιξώδες γέλης ήταν εξαιρετικά αποτελεσματική στη συγκόλληση κομματιών υφάσματος στη μέση της εκτύπωσης (Rivera et al., 2017).

Τέλος, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα από νάιλον ή ίνες spandex μπορεί να



μετατοπιστούν ή να λιώσουν λόγω επαφής με τον εξωθητήρα. Η βαθμονόμηση του εξωθητήρα και η τοποθέτηση χαρτοταινίας πάνω του μπορεί να μειώσει το τέντωμα (Grant, 2016).



Επιδιόρθωση προβλημάτων για μέγιστη σταθερότητα του υφάσματος.  
Πηγή: (PDF) Stretching the Bounds of 3D Printing with Embedded Textiles (researchgate.net)

## ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΡΟΣΦΥΣΗ

Δεδομένου ότι η καλή πρόσφυση των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δομών στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα είναι απαραίτητη, έχουν διεξαχθεί δοκιμές που εξετάζουν πώς επηρεάζεται η πρόσφυση μεταξύ των δύο υλικών. Αν και με τη νέα τεχνολογία έχουν αυξηθεί οι δυνατότητες για νέες εφαρμογές κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, υπάρχουν προκλήσεις στην προσκόλληση του τρισδιάστατου εκτυπωμένου πολυμερούς στο υφασμάτινο υπόστρωμα. Ο κύριος παράγοντας επιρροής μπορεί να αποδοθεί στην επιφάνεια του υφάσματος και στις ιδιότητές του (Korger et al., 2016). Η πρόσφυση επηρεάζεται από την ύφανση, το πάχος του νήματος, την υφή, την τραχύτητα, το πέλος, το πάχος και την διαβρεξιμότητα της επιφάνειας του υφάσματος (Mrofiu et al., 2019). Πέρα από τις ιδιότητες του υφάσματος, παράγοντα επιρροής αποτελεί και η προεπεξεργασία του υφάσματος. Οι έρευνες της προεπεξεργασίας του υφάσματος έχουν οδηγήσει σε σημαντικές τροποποιήσεις της δύναμης πρόσφυσης (Kozior et al., 2018). Τέλος, η πρόσφυση επηρεάζεται και από τις παραμέτρους εκτύπωσης. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου, η θερμοκρασία της πλατφόρμας εκτύπωσης (Sprahiu et al., 2017) και ο προσανατολισμός πλήρωσης έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη δύναμη πρόσφυσης. Η σύγκριση των μεθόδων δοκιμής μπορεί να βοηθήσει στην τυποποίηση της έρευνας της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε υφάσματα (Malengier, 2017).

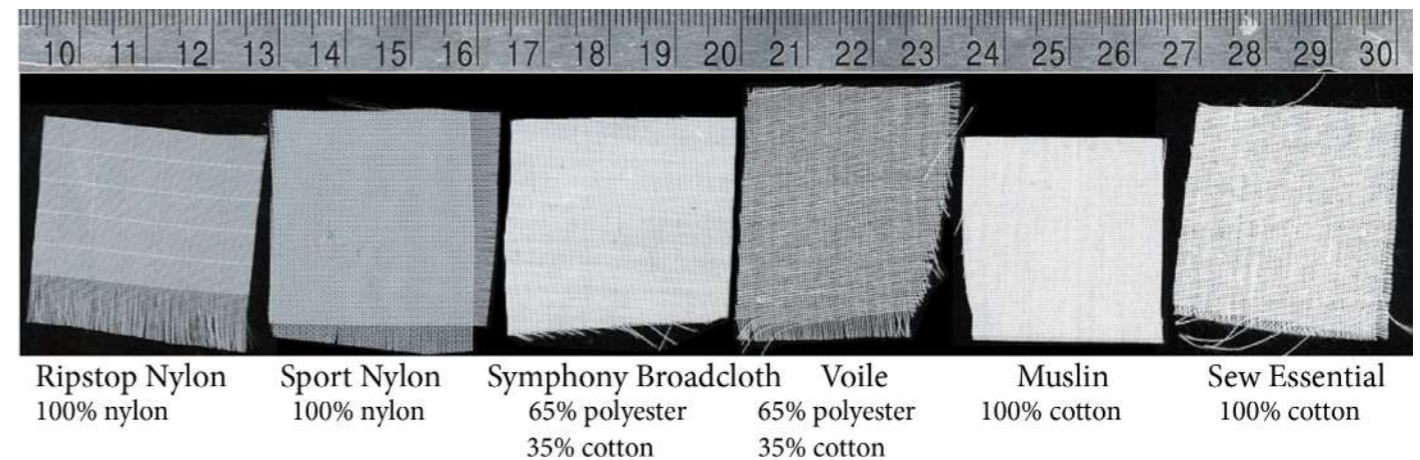
### Παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσφυση

Επιφάνεια και ιδιότητες του υφάσματος

Προεπεξεργασία του υφάσματος

Παράμετροι εκτύπωσης

Οι ερευνητές διερευνούν επίσης την καταλληλότητα διαφόρων υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης πάνω σε συγκεκριμένα υφάσματα (Kozior et al., 2020). Σε μελέτη που διεξήχθη, χρησιμοποιήθηκαν εκτυπωτές FDM, νήμα PLA και ABS και μια ποικιλία διαφορετικών υφασμάτων. Παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης ποικίλλει ανάλογα με τη βαθμονόμηση του τρισδιάστατου εκτυπωτή, καθώς και την ποιότητα και τον τύπο του νήματος που χρησιμοποιείται. Επειδή οι πληροφορίες σχετικά με την παρουσία και τους τύπους επικαλύψεων σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα δεν είναι εύκολα διαθέσιμες, απαιτείται κάποιος βαθμός πειραματισμού γύρω από τις παραμέτρους εκτύπωσης (π.χ. θερμοκρασία εξώθησης), διότι μπορεί να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο ένα ύφασμα αλληλοεπιδρά με το υλικό εκτύπωσης (Rivera et al., 2017).



Υφάσματα στα οποία εφαρμόστηκε τρισδιάστατη εκτύπωση

Πηγή: <http://danielashbrook.com/pubs/2017%20Rivera-Stretching%20the%20Bounds%20of%203D%20Printing.pdf>

Τα περισσότερα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα που κατασκευάζονται από φυσικές ίνες παρουσιάζουν ικανοποιητικές ιδιότητες φινιρίσματος και καλή πρόσφυση λόγω της τραχύτητας της επιφάνειάς τους (Tenhunen et al., 2018) και της υδροφιλικότητας (Korger et al., 2016). Τα μάλλινα υφάσματα παρουσιάζουν καλή πρόσφυση λόγω της τραχιάς επιφάνειάς τους (Sabantina, Kinzel, Ehrmann, & Finsterbusch, 2015). Όταν υφάσματα κυτταρίνης, όπως για παράδειγμα μη επεξεργασμένα βαμβακερά υφάσματα και υφάσματα βισκόζης, χρησιμοποιούνται ως βάση εκτύπωσης, η οξική κυτταρίνη χρησιμοποιείται ως υλικό εκτύπωσης σε μια εξολοκλήρου κυτταρινική προσέγγιση τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Υφάσματα με μεγάλο πάχος και λεία επιφάνεια δεν αποτελούν καλή βάση εκτύπωσης, καθώς το υλικό αποκολλάται. Διαφορετικά πλεκτά υφάσματα από συνθετικές ίνες (όπως πολυπροπυλένιο, πολυεστέρας, πολυουρεθάνη, τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)), που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τρισδιάστατων εξαρτημάτων και εκτυπώθηκαν μέσω της διαδικασίας SLA, έδειξαν καλή δυνατότητα εκτύπωσης (Grothe et al., 2020). Αυτό συνέβη επειδή τα πλεκτά υποστρώματα έχουν μια πιο πορώδη επιφάνεια από τα περισσότερα υφαντά υφάσματα, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν συνδέσεις που κλειδώνουν τη μορφή με το τυπωμένο πολυμερές (Grimmelsmann et al., 2018). Κοινά συνθετικά πολυμερή, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υφασμάτων (π.χ. PET), συχνά αναμειγνύονται με φυσικές ίνες όπως το βαμβάκι ή το μαλλί, για να παραχθεί ένα υφασμάτινο υπόστρωμα ισχυρό και ανθεκτικό στη συρρίκνωση και στο σκίσιμο (Dip et al., 2018).

Σύμφωνα με έρευνες, (Korger et al., 2016) οι προεπεξεργασίες όπως το πλύσιμο και η επεξεργασία με πλάσμα βαμβακερών και πολυεστερικών υφασμάτων μπορούν να επηρεάσουν την πρόσφυση του μαλακού PLA. Μια άλλη μελέτη αποκάλυψε ότι τα πιο υδρόφιλα υφάσματα έδειξαν καλύτερη πρόσφυση με υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω τριχοειδούς δράσης (Korger et al., 2020). Η πρόσφυση μεταξύ βαμβακιού και PLA αυξήθηκε με την εφαρμογή κόλλας πριν από την εκτύπωση, καθώς δημιουργήθηκε πρόσθετη χημική σύνδεση μεταξύ της ίνας και του υλικού εκτύπωσης κατά την εκτύπωση. Το πλύσιμο και η επεξεργασία με διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου έδειξε επίσης θετικό αποτέλεσμα ως διαδικασία προεπεξεργασίας (Kozior et al., 2018). Ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς επικάλυψης, που εφαρμόζεται σε ένα υφασμάτινο υπόστρωμα πριν από την τρισδιάστατη εκτύπωση, θα μπορούσε να αυξήσει την πρόσφυση. Σύμφωνα με μια μελέτη, η επίστρωση με διαφανές θερμοπλαστικό (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο-PMMA), έδειξε ισχυρή πρόσφυση για το σκληρό PLA, ενώ για το ABS και το μαλακό PLA δεν είχε ικανοποιητικό αποτέλεσμα (Unger et al., 2018), (Meyer et al., 2019).

Πέρα από αυτές τις φυσικές και χημικές επεξεργασίες, παρατηρήθηκε ότι το μούλιασμα και το στέγνωμα του τάπητα νανοϊνών με ηλεκτροϊονοποίηση σε νερό ή σαπουνόνερο πριν από την εκτύπωση είναι επωφελές (Kozior et al., 2019), καθώς μειώνεται το ηλεκτροστατικό φορτίο. Επίσης, πειραματισμοί με τη μέθοδο FDM για εκτύπωση PLA πάνω σε υφαντά υφάσματα έδειξαν ότι η πυκνότητα στημονιού, η πυκνότητα του υφαιδίου και η γραμμική πυκνότητα στημονιού επηρεάζουν την πρόσφυση, αλλά το βάρος του υφαιδίου και η γραμμική πυκνότητα υφαιδίου δεν έχουν καμία άμεση επίδραση στην πρόσφυση (Sheron et al., 2018).

Εκτός από την προεπεξεργασία του υφαιδίου, ορισμένες παράμετροι εκτύπωσης επηρεάζουν τη δύναμη πρόσφυσης μεταξύ ενός πολυμερούς και ενός υφαιδίου (Dorke et al., 2017). Διαπιστώθηκε ότι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και της πλατφόρμας εκτύπωσης είχε σημαντικό αντίκτυπο στις δυνάμεις πρόσφυσης. Ωστόσο, άλλες παράμετροι

εκτύπωσης δεν είχαν κανένα σημαντικό αποτέλεσμα. Ακόμα, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μικρή σχέση μεταξύ των υφαιδίων, του πάχους τους και της τεχνολογίας κατασκευής που χρησιμοποιείται. Οι έρευνες έδειξαν ότι οι εκτυπώσεις FDM σε βαμβάκι, πολυεστέρα, μαλλί και βισκόζη μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλή πρόσφυση (Korger et al., 2016), γεγονός που επηρεάζεται και από την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και της πλατφόρμας εκτύπωσης (Spahiū et al., 2017). Όσο μικρότερη είναι η απόσταση, τόσο αυξάνεται η πρόσφυση. Όσον αφορά τα υφάσματα με μεγάλο πάχος, η υψηλότερη τιμή πρόσφυσης παρατηρείται όταν η κατακόρυφη απόσταση είναι σχεδόν ίση με το πάχος του υφαιδίου (Spahiū et al., 2018). Ακόμα, από τη μελέτη (Kozior et al., 2018) προέκυψε ισχυρή συσχέτιση της δύναμης πρόσφυσης με τον προσανατολισμό πλήρωσης. Παρατηρήθηκε ότι οι δυνάμεις πρόσφυσης αυξάνονται όσο πλησιάζουν τις 90° (Dip et al., 2021).

Επιπλέον, παράμετροι όπως η ταχύτητα εκτύπωσης και η θερμοκρασία της πλατφόρμας εκτύπωσης μπορούν επηρεάσουν την πρόσφυση. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να παραχθεί σημαντική επίδραση στην αντοχή πρόσφυσης από τη θερμοκρασία της πλατφόρμας, εάν η θερμοκρασία μετάπτωσης υαλού (Tg) του υλικού είναι υψηλότερη από αυτή τη θερμοκρασία (Sanatgar et al., 2017). Επίσης, επειδή η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά την επεξεργασία εντός του εκτυπωτή, μπορεί να επηρεαστεί η αντοχή του δεσμού μεταξύ των στρωμάτων (Vanderploeg et al., 2017). Όσον αφορά την ταχύτητα εκτύπωσης υπάρχει μια σχέση μεταξύ αυτής και του πάχους του υφαιδίου, η οποία επηρεάζει την πρόσφυση. Η υψηλότερη δύναμη πρόσφυσης μπορεί να επιτευχθεί με τη διατήρηση μίας μέσης ταχύτητας εκτύπωσης (Sanatgar et al., 2017).

Παράγοντες που επηρεάζουν την πρόσφυση			
3D Εκτύπωση	Επιφάνεια & Ιδιότητες Υφαιδίου	Παράμετροι Εκτύπωσης	Προεπεξεργασία Υφαιδίου
Υλικό 3D εκτύπωσης	Τύπος υφαιδίου	Παράμετροι στημονιού- υφαιδίου & γραμμική πυκνότητα στημονιού	Πλύσιμο (διάβρωση ή μούλιασμα σε νερό ή σαπουνόνερο & στέγνωμα)
Μέθοδος 3D εκτύπωσης	Επιφάνεια υφαιδίου	Κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου & της πλατφόρμας εκτύπωσης	Επεξεργασία με πλάσμα, διάλυμα NaOH, κόλλα ή λεπτό στρώμα πολυμερούς επικάλυψης
Θερμοκρασία πλατφόρμας εκτύπωσης	Πάχος	Προσανατολισμός πλήρωσης	
		Ταχύτητα εκτύπωσης	

Έρευνα που επικεντρώθηκε στην πρόσφυση πολυμερών νημάτων (Pei et al., 2015), τα οποία εκτυπώνονται απευθείας σε ύφασμα, διαπίστωσε ότι τα υφαντά υφάσματα από πολυεστερικό μαλλί ή βαμβάκι και τα πλεκτά από σόγια προσκολλώνται καλύτερα με νήματα από ABS, PLA και Nylon, λόγω των ελεύθερων ιών ή της τραχιάς και τριχωτής επιφάνειας του υφάσματος (Kozior et al., 2018). Ένα πολυεστερικό ύφασμα με υψηλό πάχος παρουσιάζει υψηλή ιδιότητα πρόσφυσης (Grimmelsmann et al., 2018). Διαπιστώθηκε επίσης ότι το PLA είχε καλύτερη πρόσφυση σε σύγκριση με τα νήματα ABS και Nylon (Grimmelsmann et al., 2018). Το PLA είχε εξαιρετικά καλή πρόσφυση με μικρό στημόνι και εξακολουθούσε να παρουσιάζει υψηλή ποιότητα εκτύπωσης με καλή αντοχή στην κάμψη. Αν και το PLA είναι υδατοδιαλυτό και δεν είναι επαρκώς ανθεκτικό για μακροχρόνια χρήση, το υλικό εξακολουθεί να είναι κατάλληλο για την παραγωγή πρωτοτύπων και για βραχυπρόθεσμη χρήση.

Εκτυπώσεις PLA σε ύφασμα ζέρσεϊ έδειξαν ότι όταν το πλάτος του υφάσματος αυξάνεται, αυξάνεται η πρόσφυση, ενώ όταν αυξάνεται το πάχος, η πρόσφυση μειώνεται. (Narula et al., 2018). Πειραματισμοί οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το PLA συχνά προσκολλάται καλύτερα στο ύφασμα, όταν εξωθείται σε ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία από την τυπική (210-220°C), καθώς εισχωρεί εν μέρει στο ύφασμα για ισχυρότερο δέσιμο. Για λεπτό ύφασμα, με πάχος λιγότερο από 0,4 mm, η καλύτερη προσκόλληση προέκυψε από την απλή στερέωση του υφάσματος: η δύναμη και η θερμότητα του εξωθητήρα βοηθούν στην επίτευξη καλής σχέσης ανάμεσα στο πλαστικό και το ύφασμα. Για παχύτερο ύφασμα, ωστόσο, ο εξωθητής μπορεί να πιάσει το ύφασμα, μετατοπίζοντάς το κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Σε αυτή την περίπτωση, είναι απαραίτητο να αυξηθεί το ύψος για την επόμενη στρώση που θα εκτυπωθεί, αφήνοντας χώρο για το ύφασμα.

Όταν ένα ύφασμα τοποθετείται ανάμεσα σε δύο εκτυπωμένες στρώσεις, το ύφασμα θα πρέπει να έχει τρύπες ή διάκενα για να ρέει το λιωμένο πλαστικό και να επιτευχθεί η προσκόλληση. Αυτά τα ανοίγματα μπορεί να είναι ένα εγγενές μέρος του υφάσματος, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται δίχτυ, ή τούλι και άλλα υφάσματα χαμηλής πυκνότητας, ή μπορούν να δημιουργηθούν τεχνητά με κοπή.

Δοκιμές εκτύπωσης με χρήση του εκτυπωτή 3D Ultimaker και θερμοκρασίες που συνιστώνται από τον κατασκευαστή (248°C για το ABS και 210°C για το PLA) έδειξαν ότι η πρόσφυση μπορεί να ποικίλλει ανάλογα το ύφασμα και το νήμα που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός του υφάσματος Sew Essential με το PLA μπορεί να αντέξει βάρος που ισοδυναμεί με μια σακούλα παντοπωλείου γεμάτη τρόφιμα. Ομοίως, το ύφασμα Voile με PLA μπορεί να τεντωθεί περίπου 1 cm σε μήκος, χωρίς να αποτύχει η πρόσφυση (Rivera et al., 2017).

Συμπερασματικά, η πρόσφυση είναι ένας σημαντικός παράγοντας, καθώς επηρεάζει τις τελικές χρήσεις, την αντοχή και την ποιότητα του προϊόντος. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί για την προσκόλληση του πολυμερούς στο ύφασμα, όπως μοριακή σύνδεση, μηχανική σύμπλεξη και θερμοδυναμική πρόσφυση (Awaja et al., 2009). Ρυθμίζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους ελέγχου για την εκτύπωση πολυμερών σε υφάσματα, η πρόσφυση μπορεί να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό. Η έρευνα είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς πρόσφυσης και των παραμέτρων ελέγχου της διεργασίας που παράγουν τα καλύτερα αποτελέσματα (Sanatgar et al., 2017).

Από τη βιβλιογραφία, μπορεί να συνοψιστεί ότι τρεις περιοχές πρέπει να διερευνηθούν για την αποτελεσματική εναπόθεση πολυμερών σε υφάσματα. Πρώτον, πρέπει να γίνουν κατανοητά τα φαινόμενα σύνδεσης και πρόσφυσης του πολυμερούς υλικού που εναποτίθεται σε υφάσματα. Η πρόσφυση του πολυμερούς εξαρτάται από την περιοχή επαφής, επομένως η σύνδεση θα πρέπει να γίνεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Δεύτερον, τα τυπωμένα μέρη θα πρέπει να βρίσκονται σε σημεία που δεν θα εμποδίζουν την ελεύθερη κίνηση. Τρίτον, το πολυμερές και το ύφασμα πρέπει να αντέχουν την παραμόρφωση και να επανέρχονται, όταν υποβάλλονται σε δυνάμεις που εμφανίζονται ως μέρος της καθημερινής φθοράς, όπως η συστροφή και το τέντωμα.

Η καλή πρόσφυση στα υφάσματα εξαρτάται από τη συμβατότητα του υλικού, τη φύση της επιφάνειας των ιών και τη φυσική ή χημική επεξεργασία. Για μία αποτελεσματική σύνδεση, το πολυμερές πρέπει να είναι σε επαφή με το ύφασμα σε όλα τα σημεία, για να αναπτύξει τη μέγιστη συγκολλητική αντοχή. Το πολυμερές πρέπει να διεισδύσει στο ύφασμα για σταθερή πρόσφυση. Για τηγμένα πολυμερή με υψηλά ιξώδη, απαιτείται πίεση για καλύτερη διείσδυση.

Μελλοντικές εργασίες θα πρέπει να διερευνήσουν τη μέθοδο εναπόθεσης, για να ελαχιστοποιηθούν οι τάσεις του υφάσματος που μπορεί να οδηγήσουν σε παραμόρφωση. Ακόμα, χρειάζεται να ερευνηθούν περισσότεροι συνδυασμοί υφασμάτων- πολυμερών καθώς και οι παράμετροι εκτύπωσης (θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα εξώθησης, πυκνότητα δόμησης). Οι μελλοντικές εργασίες θα περιλαμβάνουν επίσης δοκιμές πλύσης με διαφορετικές θερμοκρασίες νερού, κύκλους στυψίματος, στέγνωμα και απορρυπαντικό για να διερευνηθεί εάν τα εξαρτήματα διατηρούν τη μορφή τους και εάν η πρόσφυση παραμένει ανέπαφη.

---

# Η Τρισδιάστατη Εκτύπωση στη Βιομηχανία της Μόδας

---

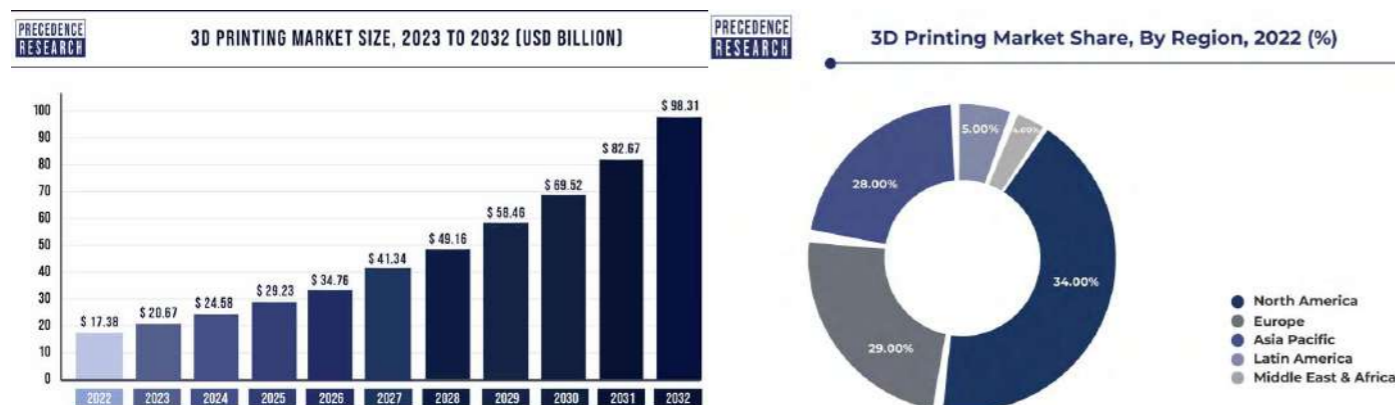
“With 3D printing, fashion has become a canvas for innovation, where imagination knows no bounds.”

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην εισχώρηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία της μόδας. Αφού περιγραφούν όλα τα στάδια που θα οδηγήσουν στο τελικό εκτυπωμένο προϊόν, παρουσιάζονται συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογής. Για την καλύτερη “ανάγνωση” των παραδειγμάτων, αυτά ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο, το εύρος και το αντικείμενο εφαρμογής.

## ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΜΟΔΑ

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αναπτυχθεί ραγδαία και αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης, που έχει αντίκτυπο στην καθημερινή ζωή. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει κερδίσει δημοτικότητα λόγω της τεχνικής άμεσης κατασκευής που χρησιμοποιεί, υποβοηθούμενη από τον ψηφιακό σχεδιασμό. Πλέον, χρησιμοποιείται από διαφορετικούς κλάδους για την εκτύπωση διαφόρων υλικών.

Αποτελεί μία επιχείρηση πολλών δισεκατομμυρίων, αυξάνοντας διαρκώς το κέρδος και το εύρος εφαρμογής. Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς τρισδιάστατης εκτύπωσης ήταν στα 17,38 δισεκατομμύρια δολάρια το 2022 ενώ προβλέπεται να φτάσει περίπου τα 98,31 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2032. (“3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report”, 2021, “3D Printing Market”, 2022)



Πρόβλεψη για το μέγεθος της αγοράς της τρισδιάστατης εκτύπωσης έως το 2032

Πηγή: <https://www.precedenceresearch.com/insightimg/3D-Printing-Market-Size.jpg>

Ποσοστιαίο εύρος αγοράς 3DP ανά τον κόσμο το 2022

Πηγή: <https://www.precedenceresearch.com/insightimg/3D-Printing-Market-Share-By-Region.jpg>

Παρόλα αυτά, η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης άργησε να εισέλθει και έχει επιδιωχθεί λιγότερο στη βιομηχανία της μόδας, λόγω των δυσκολιών στην απόκτηση της τεχνολογίας, των περιορισμών που προκύπτουν από τα υλικά και του γεγονότος ότι το προϊόν πρέπει να είναι φορέσιμο. Αυτή η καθυστέρηση οφείλεται στο γεγονός ότι τα συνθετικά υλικά, που διατίθενται στο εμπόριο για τρισδιάστατη εκτύπωση, δεν είναι αρκετά εύκαμπτα και άνετα ώστε να χρησιμοποιηθούν ως υφάσματα. Λόγω της συμπαγούς δομής τους δεν επιτρέπουν την διέλευση του αέρα, όπως συμβαίνει στα συμβατικά υφάσματα. Όμως, οι πρόσφατες τεχνολογικές

εξελίξεις και η είσοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία της μόδας έχουν ανοίξει ένα νέο χώρο πειραματισμού για δημιουργικότητα και καινοτομία. Η παραγωγή και το εμπόριο στη βιομηχανία της μόδας και της κλωστοϋφαντουργίας μπορούν να αλλάξουν δραστικά, χάρη στην εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της τρισδιάστατης σάρωσης. Προϊόντα μόδας όπως αξεσουάρ, υποδήματα, ενδύματα ή μέρη ενδυμάτων μπορούν να εκτυπωθούν με την αποτελεσματική χρήση πρώτων υλών, με ευελιξία στο σχεδιασμό, χαμηλότερα έξοδα και απλό χειρισμό συσκευών και πρώτων υλών σε σύγκριση με άλλες τεχνικές.

Πρόκειται για μία ταχέως αναδυόμενη τεχνολογία που μπορεί να προσφέρει οικονομική αποδοτικότητα και ευελιξία. Η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών έχει κερδίσει την προσοχή σχεδιαστών και παραγωγών ρούχων, ενώ με εκθετικό ρυθμό αυξάνονται εκείνοι που θέλουν να παράγουν ένα είδος προϊόντος «Do-It-Yourself» (DIY) ή επιθυμούν να ασχοληθούν με την εκτύπωση των δικών τους ρούχων στο σπίτι (Perry, 2018). Προκειμένου να κατανοηθεί σε βάθος η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία της μόδας, γίνεται μία σύντομη επισκόπηση όλων των σταδίων που θα οδηγήσουν στο τελικό εκτυπωμένο προϊόν.

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΟΔΑΣ

### ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

“Sizes will go out the window 10 years from now. Everyone can do their own body scan on a camera.”

Levi Strauss CEO, Chip Bergh

Για τη δημιουργία εξατομικευμένων προϊόντων μόδας, και ιδίως ενδυμάτων και υποδημάτων, απαραίτητο στάδιο πριν τον σχεδιασμό είναι η μέτρηση των απαραίτητων διαστάσεων για την αποτύπωση του ανθρώπινου σώματος. Αυτή μπορεί να γίνει είτε χειρωνακτικά (χρήση μεζούρας) είτε με βάση την τρισδιάστατη σάρωση. Η τρισδιάστατη σάρωση σώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις βασικούς τρόπους: με βάση το φως, με βάση το λέιζερ και με βάση τα μικροκύματα. Οι μέθοδοι διαφέρουν ως προς το κόστος, τον χρόνο δημιουργίας και εξαγωγής των δεδομένων, καθώς και την ανάλυση. Τα χαρακτηριστικά της κάθε μεθόδου αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

### Τύποι 3D σάρωσης σώματος

#### Σάρωση με Laser

Μια δέσμη λέιζερ σαρώνει το σώμα σε κλάσματα δευτερολέπτου, δημιουργώντας ακριβή 3D δεδομένα μέσω εκατοντάδων μετρήσεων. Ο σαρωτής χρησιμοποιεί μικροκύματα χαμηλής ισχύος, απόλυτα ασφαλή για την ανθρώπινη υγεία. Το λογισμικό υπολογιστή αναλύει στη συνέχεια τις εικόνες υψηλής ανάλυσης και αποφασίζει τις ακριβείς μετρήσεις.

#### Σάρωση λευκού φωτός

Χρησιμοποιείται ένας σαρωτής με βάση το λευκό φως και ένα λογισμικό εξαγωγής μετρήσεων. Μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα καταγράφονται εκατοντάδες εικόνες και εξαγονται αυτόματα ακριβείς μετρήσεις μέσω του λογισμικού. Η μέθοδος είναι ανώτερη από την τεχνολογία λέιζερ και επίσης καθίσταται δυνατή η ψηφιοποίηση ολόκληρης της επιφάνειας.

#### Συνδυασμός μοντελοποίησης & επεξεργασίας εικόνας

Δεν χρησιμοποιούνται 3D μετρήσεις, αλλά 3 εικόνες 2D (2 από μπροστά και 1 από το πλάι), για την εξαγωγή και τη δημιουργία τρισδιάστατων πληροφοριών. Οι μετρήσεις υπολογίζονται με βάση τη σιλουέτα του σώματος. Αυτή η μέθοδος είναι η πιο οικονομική.

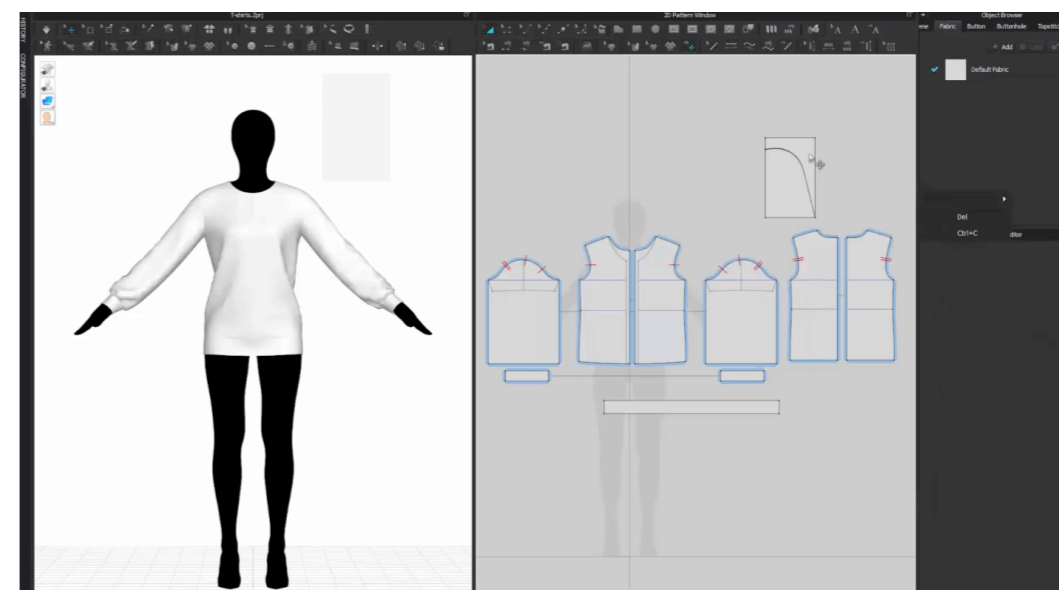
Σε κάθε περίπτωση, δημιουργείται τρισδιάστατα η σιλουέτα του ανθρώπινου σώματος στην οποία είναι καταγεγραμμένες όλες οι απαραίτητες μετρήσεις (και πολλές παραπάνω) που έχουν προκύψει μέσω μίας σειράς φωτογραφιών. Μόλις δημιουργηθούν τα προσωπικά δεδομένα των καταναλωτών στον υπολογιστή, μεταφέρονται στον κατασκευαστή ηλεκτρονικά. Αυτό καθιστά τη διαδικασία προσαρμογής ταχύτερη, αμεσότερη και οικονομικότερη. Τέλος, οι μετρήσεις που αποκτήθηκαν μπορούν να αρχειοθετηθούν για μελλοντική χρήση.

## ΨΗΦΙΑΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΔΑ

Παραδοσιακά, η κατασκευή ενδυμάτων περιλαμβάνει διάφορα στάδια από την αρχική ιδέα μέχρι την παραγωγή του ρούχου. Εφόσον ο σχεδιαστής καταλήξει στην τελική μορφή του ρούχου, έχοντας επιλέξει τα υλικά τα οποία θα χρησιμοποιήσει, δημιουργείται το πατρόν του ρούχου, σύμφωνα με τυποποιημένα μεγέθη ή στα μέτρα του εκάστοτε πελάτη. Το πατρόν αποτελεί ουσιαστικά ένα δισδιάστατο ανάπτυγμα του ρούχου που πρόκειται να δημιουργηθεί. Συνήθως δημιουργούνται ένα ή περισσότερα δείγματα ρούχων, προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις και βελτιστοποιήσεις, οι οποίες στη συνέχεια θα περαστούν και στο πατρόν.

Ο σχεδιασμός του πατρόν αντιπροσωπεύει το 4-6% του συνολικού κόστους ενδυμάτων

(Istook, Newcomb, & Lim, 2011), και μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα, είτε ψηφιακά σε εξειδικευμένα προγράμματα (π.χ. Letra, Gerber, Optitex, Polypatron), είτε συνδυαστικά. Ορισμένες φορές, χρειάζεται να γίνει μοντελοποίηση για την προσομοίωση, την εικονική απόδοση και την οπτικοποίηση της συμπεριφοράς του ρούχου σε κίνηση. Προγράμματα όπως τα CLO 3D, Marvelous Designer, Lectra Modaris και Optitex 3D DESiGN για Illustrator χρησιμοποιούνται για εικονική μοντελοποίηση και δημιουργία προϊόντων μόδας. Με τη μοντελοποίηση, εάν το σχέδιο είναι υπό κλίμακα, παράγεται ταυτόχρονα και το τελικό πατρόν του ρούχου σε δισδιάστατη μορφή. Οι απαραίτητες τροποποιήσεις έχουν γίνει ψηφιακά, επομένως δεν είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν δείγματα. Ακόμα, τα προγράμματα μοντελοποίησης μπορούν να αντικαταστήσουν τη χειροκίνητη ή την ψηφιακή δημιουργία δισδιάστατων πατρόν.

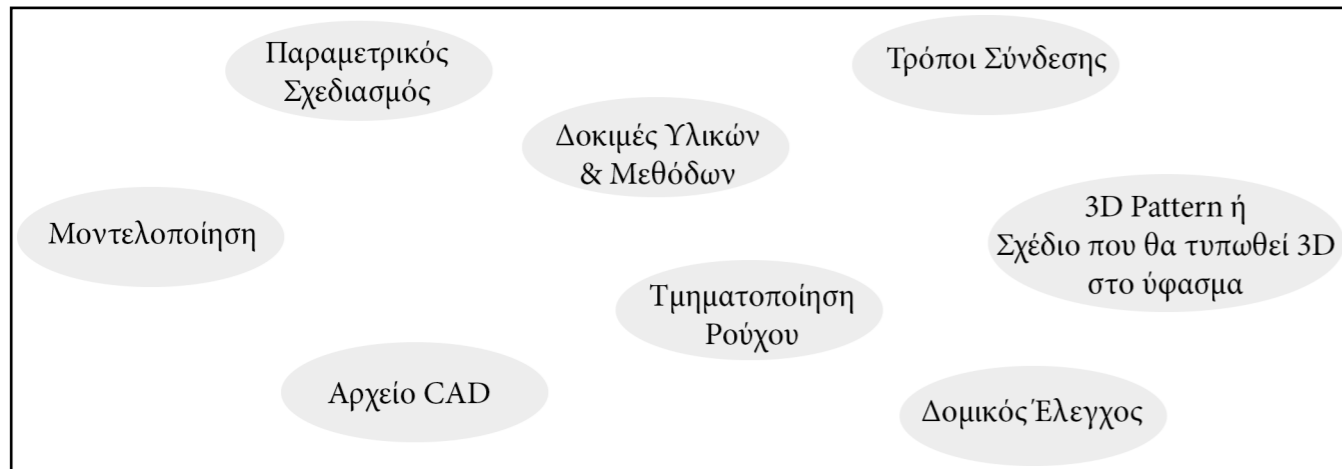


Παράδειγμα μοντελοποίησης ρούχου με χρήση του προγράμματος CLO 3D.

Πηγή: <https://fabacademy.org/2021/labs/dassault/students/linda-zhen/images/week2/clo3d-sample.png>

Ακολούθως, το ψηφιακό σχέδιο λαμβάνει τη βέλτιστη τοποθέτησή του με τη βοήθεια λογισμικού, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η φύρα. Αφού ολοκληρωθούν όλες οι διαδικασίες, το ύφασμα είναι έτοιμο να κοπεί και να ραφτεί για τη δημιουργία ενδυμάτων.

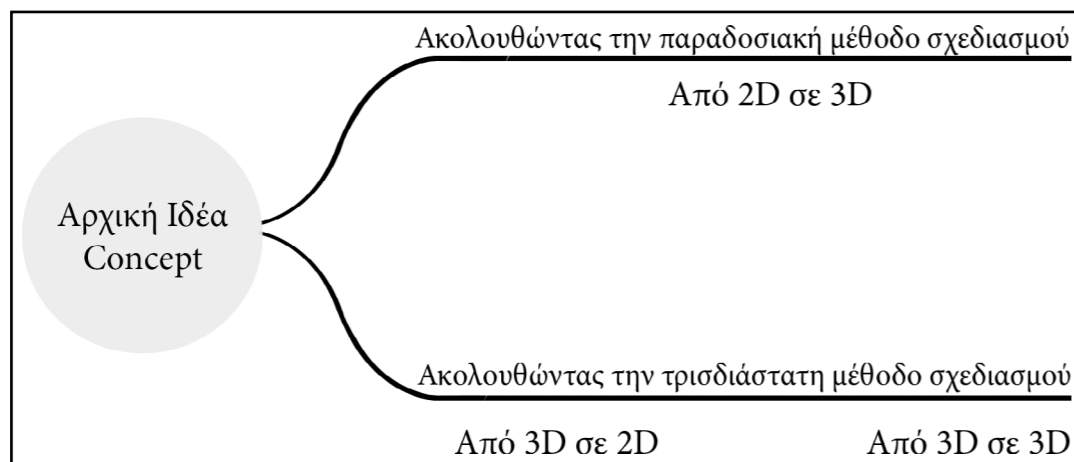
Όσον αφορά την τρισδιάστατη εκτύπωση ενδυμάτων, ο σχεδιασμός κινείται γύρω από μία κεντρική ιδέα (concept), αλλά ακολουθείται μία διαφοροποιημένη ροή εργασιών. Καθώς πρόκειται για μία νέα μέθοδο, η διαδικασία που θα οδηγήσει στο τελικό προϊόν δεν είναι καθορισμένη, ενώ συνήθως περνά από πολλά στάδια πειραματισμού. Η μορφή του ρούχου επηρεάζεται άμεσα από τα υλικά και τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Τα ρούχα θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν είτε με τον τρόπο που αντιμετωπίζονται τα ενδύματα παραδοσιακά, είτε ως τρισδιάστατα μορφολογικά στοιχεία που περιβάλλουν το ανθρώπινο σώμα.



Στάδια που ενδέχεται να περιλαμβάνει η τρισδιάστατη εκτύπωση προϊόντων μόδας

Έπειτα από μελέτη διαφόρων περιπτώσεων εφαρμογής, στις οποίες θα γίνει αναφορά στη συνέχεια, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο σχεδιασμός θα μπορούσε να ακολουθήσει μία από τις ακόλουθες κατευθύνσεις: από 2D σε 3D, από 3D σε 2D ή από 3D σε 3D. Στην πρώτη περίπτωση, η λογική προσεγγίζει την παραδοσιακή σχεδιαστική πορεία. Το ρούχο σχεδιάζεται σε επίπεδα δισδιάστατα μέρη (πατρόν), τα οποία εκτυπώνονται τρισδιάστατα λαμβάνοντας το πάχος και το ανάγλυφο που έχει επιλέξει ο σχεδιαστής. Σε αυτήν την περίπτωση εντάσσεται και η τρισδιάστατη εκτύπωση πάνω σε ύφασμα.

Στις άλλες δύο περιπτώσεις το ρούχο σχεδιάζεται τρισδιάστατα θυμίζοντας γλυπτό. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται η σχεδιαστική ελευθερία που παρέχει η τρισδιάστατη σχεδίαση. Στην περίπτωση που το τρισδιάστατο σχέδιο εξάγεται τρισδιάστατα, η εκτύπωση μπορεί να είναι είτε ενιαία είτε τμηματική. Στην περίπτωση που εξάγεται δισδιάστατα, το τρισδιάστατο σχέδιο χωρίζεται σε δισδιάστατα επίπεδα τμήματα τα οποία θα ενωθούν και πάλι μετά την εκτύπωση.



Στις περιπτώσεις που η εκτύπωση δεν είναι ενιαία, χρειάζεται να έχει γίνει μελέτη του τρόπου σύνδεσης των επιμέρους τμημάτων εκ των προτέρων. Ακόμα, θα πρέπει κατά τον σχεδιασμό να ληφθεί υπόψιν το μέγεθος της πλατφόρμας εκτύπωσης και η ενδεχόμενη κατάτμηση ή συνεπτυγμένη εκτύπωση του σχεδίου (Yap & Yeong, 2014). Όταν ολοκληρωθεί η εκτύπωση, τα τμήματα ενώνονται είτε με προσχεδιασμένες συνδέσεις είτε χειρωνακτικά, ώστε να προκύψει το τελικό τρισδιάστατο ρούχο.

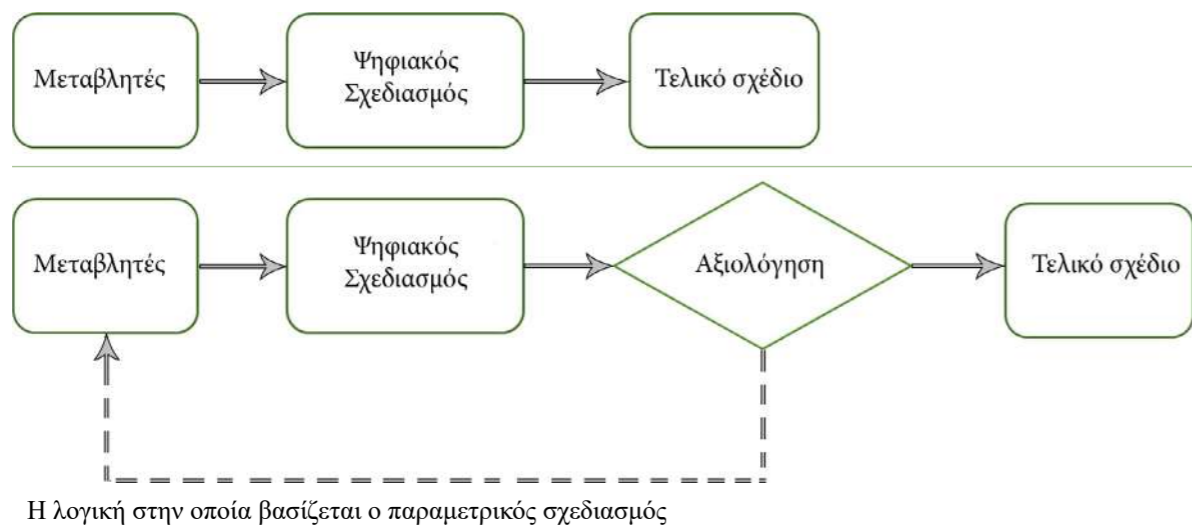
Η τρισδιάστατη προσομοίωση του ρούχου, παρόλο που δεν είναι απαραίτητη σε όλες τις περιπτώσεις, συμβάλλει τόσο στην οπτικοποίηση του ρούχου όσο και στην τμηματοποίησή του. Αν ακολουθηθεί η διαδικασία της μοντελοποίησης, θα πρέπει το αρχείο να εξαχθεί στον κατάλληλο τύπο αρχείου, ώστε στην συνέχεια να επεξεργαστεί και να μπορέσει να εκτυπωθεί από τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Στη συνέχεια, ακολουθεί γεωμετρική μοντελοποίηση σε κατάλληλο λογισμικό σχεδίασης (CAD), όπου τα εικονικά πρωτότυπα δημιουργούνται έχοντας πραγματικές μετρήσεις και αναφορές. Καθώς το Rhino 3D είναι πιο εύχρηστο στον σχεδιασμό πολύπλοκων καμπύλων επιφανειών, χρησιμοποιείται ευρύτερα στη μοντελοποίηση τρισδιάστατης σχεδίασης προϊόντων μόδας, όπου ο σχεδιασμός περιλαμβάνει πολλές καμπύλες επιφάνειες. Άλλα προγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι τα Solidworks, CATIA, NX και Autodesk Fusion.

Στον τομέα της ανάλυσης μηχανικής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAE), τα Ansys, Abaqus, CATIA, NX, Adams, SimScale, κ.λπ. είναι εργαλεία που εφαρμόζονται συχνά. Για εργαλεία κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAM), εκτός από εργαλεία ειδικά για μηχανές, τα 3D expert, Cura, Slic3r, Materialize 3-matic, κ.λπ. εφαρμόζονται στην προσομοίωση και τη δημιουργία διαδρομής εργαλείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι χρήσεις αυτών των εργαλείων δεν είναι αποκλειστικές, αλλά συμπληρωματικές. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία τρισδιάστατης σχεδίασης, το σχέδιο εξάγεται σε αποδεκτό τύπο αρχείου, εισάγεται σε λογισμικό κοπής (slicer) και στην συνέχεια τροφοδοτεί τον τρισδιάστατο εκτυπωτή για να ξεκινήσει η εκτύπωση (Rhinoceros, 2021).

Καθώς η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν έχει ωριμάσει ακόμα στον τομέα της μόδας, παρατηρείται πως δεν υπάρχουν εξειδικευμένα τρισδιάστατα λογισμικά σχεδίασης για τον τομέα αυτόν. Σε επόμενο στάδιο, θα μπορούσαν τα υπάρχοντα προγράμματα μοντελοποίησης που χρησιμοποιούνται για προσομοίωση των ρούχων να μπορούν να εξάγονται σε λογισμικό slicer και να εκτυπώνονται τρισδιάστατα, χωρίς την μεσολάβηση γεωμετρικής μοντελοποίησης σε λογισμικό σχεδίασης (CAD).

**Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗ ΜΟΔΑ**



Ο παραμετρικός σχεδιασμός αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο σχεδιασμού που προσφέρει δυναμικά και ευέλικτα μοντέλα. Η επικράτησή του στον τομέα της αρχιτεκτονικής έχει ανοίξει τον δρόμο και στη βιομηχανία της μόδας. Ο συνδυασμός δεξιοτεχνίας σχεδιασμού ενδυμάτων με παραμετρικά δομικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού, επιτρέπει όχι μόνο δημιουργικά αλλά και κατασκευαστικά σχέδια.

Ο παραμετρικός σχεδιασμός είναι ένας τύπος υπολογιστικού σχεδιασμού, που εστιάζει κυρίως στην προσαρμογή ενός συνόλου παραμέτρων για τη δημιουργία διαφορετικών σχεδίων, αντί να χρησιμοποιεί πολύπλοκους αλγόριθμους και προσομοιώσεις. Αυτές οι παράμετροι συχνά καθοδηγούνται από μαθηματικές εξισώσεις ή αλγόριθμους και επιτρέπουν τη γρήγορη εξερεύνηση και αξιολόγηση διαφορετικών επιλογών σχεδίασης. Σύνηθες πρόγραμμα παραμετρικού σχεδιασμού είναι το Grasshopper®.

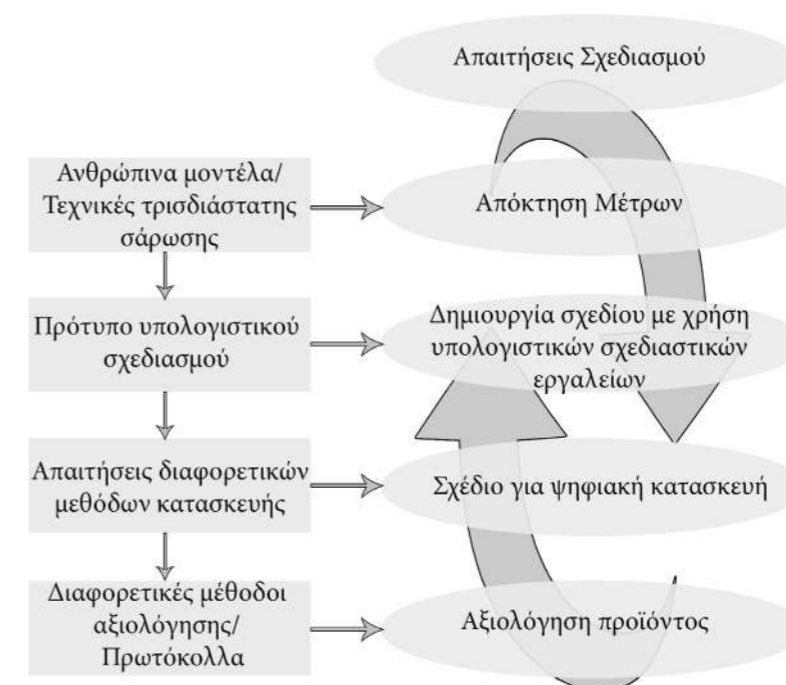
Κατά το σχεδιασμό ενός πατρόν, παράγοντες όπως η εφαρμογή και η δομή είναι κρίσιμοι και καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα. Δίνοντας διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους είναι εφικτή η εύκολη και γρήγορη τροποποίηση του συνολικού πατρόν, χωρίς την ανάγκη χειροκίνητων προσαρμογών και τροποποιήσεων σε κάθε ξεχωριστό κομμάτι. Η μαζική παραγωγή είναι κατάλληλη μόνο για τυπικούς σωματότυπους και δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες εξατομικευμένων ενδυμάτων, ενώ η προσαρμογή καλύπτει τις ανάγκες εξατομικευμένων

ενδυμάτων. Ωστόσο, ο φόρτος εργασίας είναι μεγάλος και αναποτελεσματικός. Ως εκ τούτου, η υλοποίηση ενός αυτοματοποιημένου συστήματος δημιουργίας πατρόν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική, πράσινη και βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας ενδυμάτων.

Οι ψηφιακές καινοτομίες διευκολύνουν τη μαζική παραγωγή, καθώς τα σχέδια μπορούν να τροποποιηθούν εύκολα σε πολυάριθμες σχεδιαστικές επιλογές. Με την τροποποίηση μιας ή περισσότερων παραμετρικών μεταβλητών, δημιουργούνται εναλλακτικές μορφές και ως εκ τούτου επιτυγχάνεται εξατομικευμένος σχεδιασμός που ανταποκρίνεται στους διαφορετικούς σωματότυπους και μαζική προσαρμογή (Atkinson et al. 2008, Hermans, 2012). Οι επιχειρήσεις ένδυσης μπορούν μέσω της αυτοματοποιημένης και εξατομικευμένης παραγωγής να βελτιώσουν την παραγωγική τους αποδοτικότητα, να μειώσουν τη σπατάλη πόρων και να ανταποκριθούν στη βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας ενδυμάτων (Jin et al., 2023).

Με βάση τις απαιτήσεις σχεδιασμού και χρησιμοποιώντας τον παραμετρικό σχεδιασμό, η διαδικασία για τον σχεδιασμό εξατομικευμένων προϊόντων μόδας μπορεί να αναλυθεί στα εξής βήματα:

- 1) Συλλογή παραμέτρων για τον προσδιορισμό της ακριβούς ανατομίας του ανθρώπινου σώματος (μέτρηση διαστάσεων ή τρισδιάστατη σάρωση).
- 2) Δημιουργία σχεδίου χρησιμοποιώντας υπολογιστικά εργαλεία σχεδιασμού.
- 3) Σχέδιο για ψηφιακή κατασκευή.
- 4) Αξιολόγηση προϊόντος.



Ροή εργασίας: Σχεδιασμός με χρήση παραμετρικών σχεδιαστικών εργαλείων (Εικόνα ιδιόχειρης επεξεργασίας)

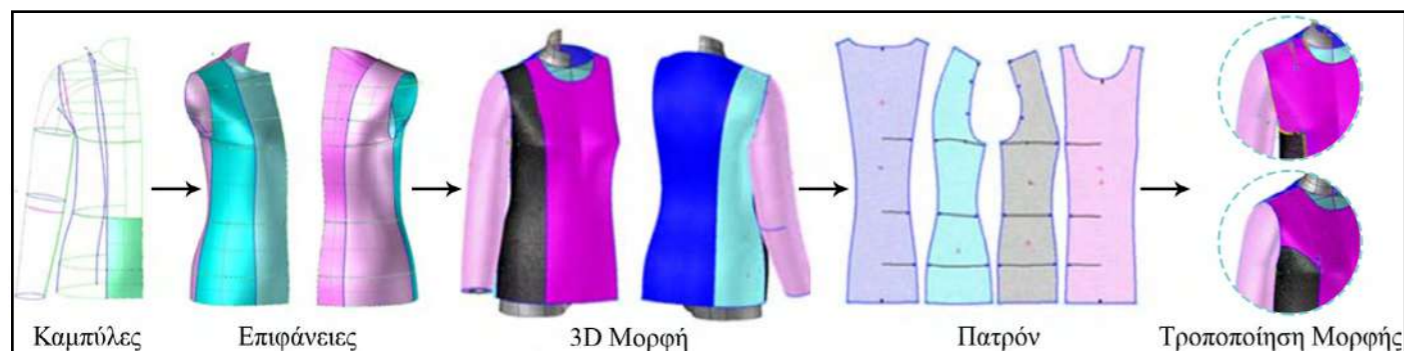


Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει μια σειρά ερευνών για την έξυπνη παραγωγή πατρών. Ερευνητές ανέλυσαν και συνέκριναν την παραδοσιακή χειροκίνητη κατασκευή προτύπων με τα υπάρχοντα συστήματα σχεδίασης CAD για την υποστήριξη της εκμάθησης ανάπτυξης ενδυμάτων, ενώ επιχείρησαν και την δημιουργία ενός νέου λογισμικού ανοιχτού κώδικα, που βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο (Papachristou et al., 2019).

Σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη εκτύπωση, μπορούν να δημιουργηθούν από έναν πηγαίο κώδικα ατελείωτες μορφές ενδυμάτων και κοσμημάτων με βάση τις προσωπικές προτιμήσεις και απαιτήσεις του χρήστη, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο κατασκευής. Ταυτόχρονα, τα εργαλεία παραμετρικής σχεδίασης είναι σε θέση να υπολογίσουν και να ελέγξουν τη λειτουργικότητα και την εκτυπωσιμότητα των δημιουργούμενων φορμών, με βάση τους περιορισμούς και τα όρια που θέτει ο σχεδιαστής (Zee & Vries, 2008).

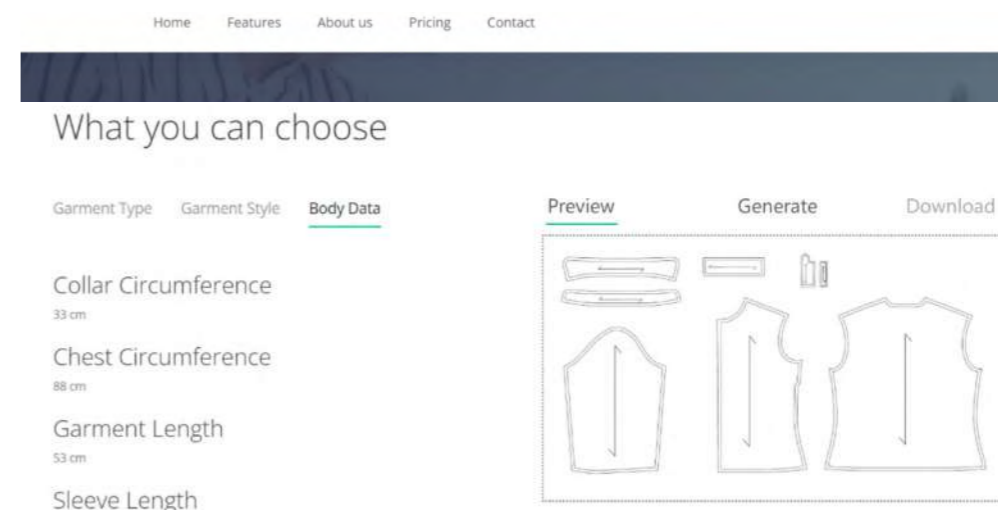
Αντίστοιχα, η παραμετρική μοντελοποίηση είναι η “δημιουργία ενός τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου χρησιμοποιώντας μια σειρά προ-προγραμματισμένων κανόνων ή αλγορίθμων που βασίζονται σε δεδομένα και παραμέτρους σχεδίασης” (BIM Wiki, 2021). Χρησιμοποιώντας παραμετρική σχεδίαση, το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί και να ενημερώνεται αυτόματα με βάση τα δεδομένα και τις παραμέτρους που καθορίζονται από τον σχεδιαστή.

Επιπλέον, προτάθηκε μια παραμετρική μέθοδος μοντελοποίησης ενσωματωμένη στο τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης: όταν το μανεκέν, που προσομοιώνει το ανθρώπινο σώμα, αλλάζει μέγεθος, το εικονικό ένδυμα (σε φαρδιά γραμμή) προσαρμόζεται αυτόματα σε αυτήν την αλλαγή. Ταυτόχρονα, το ένδυμα εξάγεται και σε ένα δισδιάστατο πρωτότυπο. Το σημαντικό πλεονέκτημα των αποτελεσμάτων της έρευνας είναι ότι οι τρισδιάστατες πληροφορίες σώματος, οι οποίες αναπτύσσονται με βάση εκτεταμένες σειρές μετρήσεων, ενσωματώνονται στην ανάπτυξη προϊόντων χωρίς να χρειάζεται οι εταιρείες ένδυσης να στραφούν σε περιβάλλον ανάπτυξης 3D. Αυτό μπορεί να διευκολύνει πολύ τους σχεδιαστές διασφαλίζοντας ταυτόχρονα βέλτιστη εφαρμογή για διαφορετικούς σωματότυπους με εξοικονόμηση χρόνου έως και 60% (Krzywinski & Siegmund, 2017).



Η κατασκευή του 3D ρούχου, που βασίζεται σε καμπύλες και επιφάνειες, επιτρέπει την εύκολη μετατροπή μεγέθους ή μορφής.  
Πηγή: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/254/15/152006/pdf>

Με βάση τον παραμετρικό σχεδιασμό, προτάθηκε η αυτόματη δημιουργία πατρών ενδυμάτων. Ο βασικός σκελετός του πατρών αναλύθηκε και σχεδιάστηκε σε ένα δισδιάστατο επίπεδο χρησιμοποιώντας παραμετρικές μεταβλητές. Χωρίστηκε σε γεωμετρικά σχήματα που αποτελούνται από σημεία, γραμμές και καμπύλες και προσδιορίστηκε η λειτουργική σχέση μεταξύ των γεωμετρικών στοιχείων με τη βοήθεια ενός συστήματος συντεταγμένων ορθής γωνίας. Οι αλγόριθμοι βασισμένοι σε διαφορετικές παραμέτρους συνδυάστηκαν με τη γλώσσα Python αναπτύσσοντας ένα αυτόματο σύστημα δημιουργίας πατρών για γυναικεία πουκάμισα. Το παραμετρικό πατρών επαληθεύτηκε, συγκρίνοντας την ομοιότητά του με αυτό που έγινε χειρωνακτικά (Jin et al., 2023).



Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις επιθυμητές διαστάσεις και το στυλ του ρούχου. Τα αυτόματα δημιουργούμενα μοτίβα αποθηκεύονται σε μορφή αρχείου DXF, η οποία ήταν διαθέσιμη για λήψη ή αποστολή στην παραγωγή.  
Πηγή: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1268>

Παρά τις δυσκολίες και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή κάθε νέας τεχνολογίας (επένδυση κεφαλαίου στην έρευνα, αγορά ψηφιακών μηχανημάτων εκτύπωσης, χρήση κατάλληλων υλικών εκτύπωσης, τεχνογνωσία κ.ά.), στη βιομηχανία της μόδας έχει αρχίσει ήδη να χρησιμοποιείται ο παραμετρικός σχεδιασμός και η τρισδιάστατη εκτύπωση. Ακόμα και στους αγοραστές επιτρέπεται η διαδικτυακή πρόσβαση και η εκτύπωση εικονικών μοντέλων (Sawant, 2021), που αφορούν εξατομικευμένα προϊόντα προστιθέμενης αξίας.

Στο εγγύς μέλλον, αναμένεται να αναπτυχθεί μια πλατφόρμα λογισμικού για την υποστήριξη εξατομικευμένου σχεδιασμού προϊόντων μέσω ψηφιακής κατασκευής. Ακόμα, μία πλατφόρμα ή ένα λογισμικό που θα είναι σε θέση να παρέχει όλες τις επιθυμητές λειτουργίες σχεδιασμού, χωρίς να απαιτείται η εναλλαγή διαφορετικών προγραμμάτων, μπορεί να βοηθήσει τους σχεδιαστές να αποφύγουν πιθανά σφάλματα εξοικονομώντας χρόνο και χρήματα και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα στον σχεδιασμό.

## ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΔΥΜΑΤΩΝ

Αν και η τρισδιάστατη εκτύπωση συνδέθηκε αρχικά με τη δημιουργία πλαστικών μοντέλων, έχει σημειωθεί ουσιαστική πρόοδος στην παραγωγή υφασμάτων που χρησιμοποιούν διάφορες ίνες και υλικά πιο φιλικά στον χρήστη και στο περιβάλλον. Παρόλο που τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα ρούχα υστερούν στην ευελιξία και την άνεση, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ρούχα, η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη υλικών έχει οδηγήσει σε πρόοδο στον τομέα της δημιουργίας εύκαμπτων υφασμάτων κατασκευών και λειτουργικών ενδυμάτων.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στην τρισδιάστατη εκτύπωση ενδυμάτων είναι πολυμερή ή σύνθετα πολυμερή υλικά, που είναι ελαφρύτερα και σχετικά πιο εύκαμπτα επιτρέποντας την κίνηση. Συνοπτικά, τα κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση ενδυμάτων είναι ελαφριά πλαστικά (ABS, PLA, σκόνη νάιλον, κ.λπ.) και TPU, που βρίσκεται μεταξύ πλαστικού και καουτσούκ. Το ABS είναι ένα οικονομικό σκληρό πλαστικό και ως εκ τούτου είναι πιο κατάλληλο για δημιουργικά διάφορων διακοσμητικών στην τεχνολογία ένδυσης. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής ακρίβειας, χρειάζεται μεταεπεξεργασία. Το PLA, ως βιοδιασπώμενο και φιλικό προς το περιβάλλον βιοϋλικό, μπορεί να ανακυκλωθεί, ενώ θεωρείται το πιο πολύτιμο πολυμερές στον τομέα της ένδυσης λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων εφελκυσμού και τήξης. Τα ρούχα που εκτυπώνονται από PLA είναι εύθραυστα με κακή θερμική σταθερότητα και χαμηλότερη αντοχή από το ABS. Επομένως, δεν είναι κατάλληλο για ρούχα με λεπτά τοιχώματα.

Η εύκαμπτη πολυουρεθάνη (PU), όταν χρησιμοποιείται για τρισδιάστατη εκτύπωση ρούχων, αν και δεν παρουσιάζει παραμόρφωση, είναι ακριβή και δημιουργεί ανεξέλεγκτες αλλαγές από το αρχικό σχέδιο μετά την εκτύπωση. Επιπλέον, καθώς η εκτύπωση περιορίζεται κυρίως από το ιξώδες του υλικού, όταν η θερμοκρασία του εξωθητήρα μειωθεί, θα προσκολληθεί στο ακροφύσιο, γεγονός που οδηγεί εύκολα σε απόφραξη. Συγκριτικά, το νάιλον έχει εξαιρετική αντοχή σε εφελκυσμό, ελαστικότητα και σκληρότητα. Επιπλέον, η ακρίβεια εξόδου του είναι καλύτερη από αυτή των ABS και PLA. Όμως, η χαμηλότερη θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης οδηγεί σε θερμική συρρίκνωση κατά τη χρήση του προϊόντος, η οποία εξακολουθεί να μην μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις της ένδυσης (Wu et al., 2022).

Μελέτη που αξιολόγησε τα εκτυπωμένα δείγματα από PLA, soft PLA και Filaflex (TPE, θερμοπλαστικό ελαστομερές) διαπίστωσε ότι το Filaflex είναι το καλύτερο υλικό για τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Cakar et al., 2021). Ακόμα, συγκρίνοντας το εύκαμπτο TPU (θερμοπλαστικό ελαστομερές πολυουρεθάνης) με το συμπαγές ABS, προέκυψε ότι το

πρώτο παρέχει μια σχετικά λεία επιφάνεια και είναι καταλληλότερο για σχέδια σύνδεσης σε προϊόντα ένδυσης, ενώ το δεύτερο προσφέρει υψηλή απόδοση, αλλά χρήζει μεταεπεξεργασίας λόγω τραχύτητας.



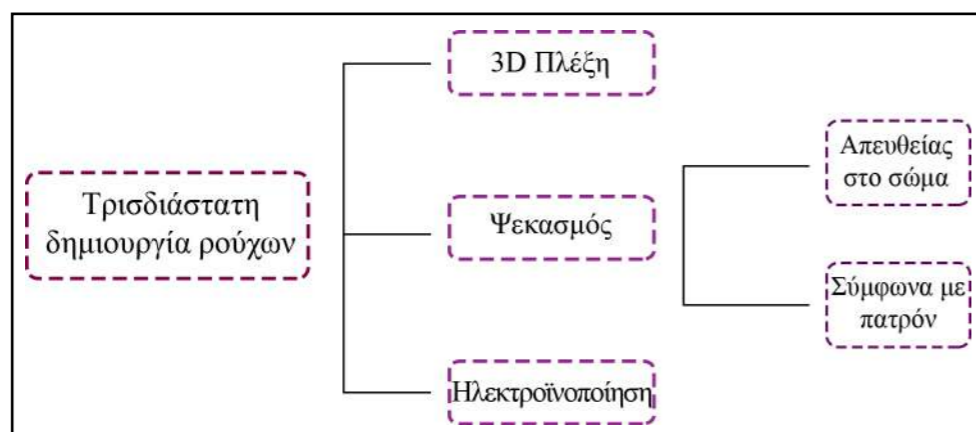
Με τη διαδικασία FDM εκτυπώθηκε εξολοκλήρου ένα τρισδιάστατο φόρεμα με τριγωνικά στοιχεία από εύκαμπτο Filaflex. Για να μπορεί να φορεθεί εύκολα, προστέθηκαν κορδόνια και στις δύο πλευρές του φορέματος (Spahiu et al., 2020)

Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/343639366\\_3D\\_printing\\_for\\_clothing\\_production/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/343639366_3D_printing_for_clothing_production/figures?lo=1)

Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία της μόδας και της κλωστοϋφαντουργίας είναι οι FDM, SLA, SLS, LOM, DLP και MJT (Poly-jet)(Chakraborty & Biswas, 2020). Για την τρισδιάστατη εκτύπωση ολόκληρου υφάσματος ή τμημάτων αυτού χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο τεχνικές FDM λόγω της ελάχιστης σπατάλης υλικού, της μεγαλύτερης ευελιξίας, του χαμηλού κόστους και της ευκολίας χρήσης σε σύγκριση με άλλες τεχνικές (Spahiu et al., 2018).

**ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ**

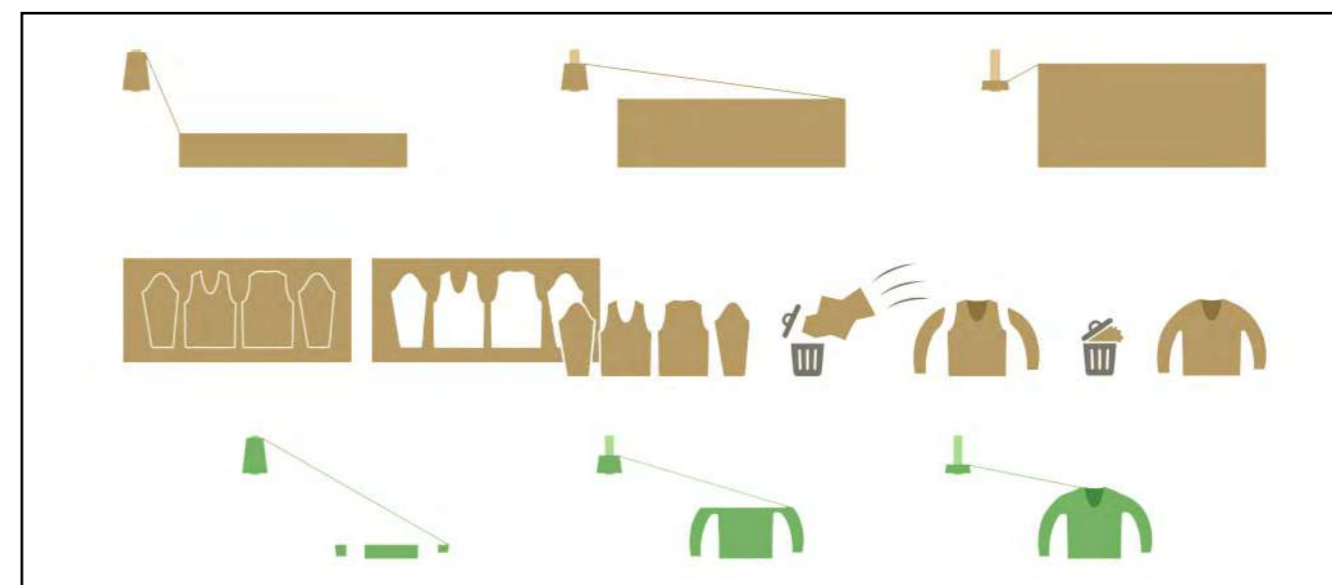
Όσον αφορά την τρισδιάστατη δημιουργία ρούχων, αξίζει να γίνει μία αναφορά σε κάποιες ακόμα μεθόδους. Παρόλο που το προϊόν δημιουργείται τρισδιάστατα, παίρνει δηλαδή την τελική του μορφή χωρίς να χρειάζεται σύνδεση επιμέρους δισδιάστατων μερών, δεν εμπίπτει ούτε στην παραδοσιακή διαδικασία παραγωγής ούτε στην τρισδιάστατη εκτύπωση με τον τρόπο που έχει παρουσιαστεί ως τώρα. Οι μέθοδοι αυτές αφορούν τη δημιουργία του ρούχου με τρισδιάστατη πλέξη και τη δημιουργία του ρούχου με ψεκασμό.



**1. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΛΕΞΗ**

Η Ιαπωνική εταιρεία κατασκευής μηχανών πλεξίματος Shima Seiki έχει πλεκτομηχανές που ράβουν ολόκληρο το ρούχο, χωρίς να χρειάζεται συναρμολόγηση. Έτσι προκύπτει ένα πλεκτό χωρίς ραφές πλεγμένο σε τρεις διαστάσεις απευθείας από το μηχάνημα. Με τη μέθοδο της τρισδιάστατης πλέξης του ρούχου, η παραγωγή γίνεται κατά παραγγελία στο μέγεθος του πελάτη (Shima Seiki).

Η εταιρεία Son of a Tailor ολοκλήρωσε το 2019 στην Ιταλία σε συνεργασία με την Shima Seiki μια καμπάνια για καθημερινά ανδρικά πουλόβερ από μαλλί merino χωρίς ραφές. Η καμπάνια προωθήθηκε μέσω της πλατφόρμας Kickstarter, λαμβάνοντας 400 παραγγελίες τις πρώτες 24 ώρες και πέτυχε τον στόχο των \$15.000 σε λιγότερο από 40 λεπτά. Ο δημιουργός Jess Christian Fleischer υποστήριξε ότι η βιομηχανία ένδυσης πρέπει να επανεξεταστεί, καθώς το κοινό είναι έτοιμο για αυτό. Οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατανάλωσης είναι αναγκαίο να μειωθούν άμεσα, ενώ οι παραγωγοί χρειάζεται να εξασφαλίσουν περιβαλλοντικά βιώσιμες γραμμές παραγωγής.



Στα συμβατικά πλεκτά το ύφασμα, αφού δημιουργηθεί, κόβεται κατά μήκος σχεδίων, για να παραχθούν μέρη του ρούχου, τα οποία στη συνέχεια ράβονται μεταξύ τους. Το ύφασμα από την κοπή και τα περιθώρια ραφής γίνονται απόβλητα υλικού. Αντίθετα με την τρισδιάστατη πλέξη του ρούχου, δεν σπαταλάται κανένα υλικό. (Εικόνα ιδιόχειρης επεξεργασίας)

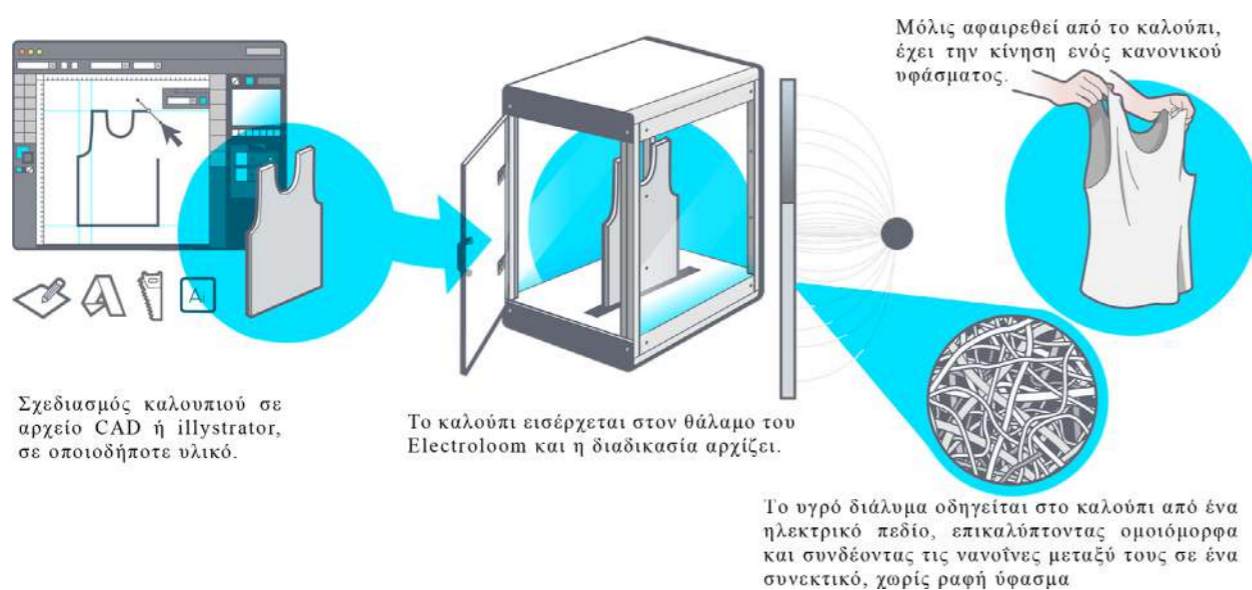
Τα πουλόβερ τους ελαχιστοποιούν τη σπατάλη υφάσματος κατά τη διαδικασία κοπής από 21% σε λιγότερο από 1%. Ακόμα, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από 30.000 άνδρες σε όλο τον κόσμο, έχουν καταφέρει να μειώσουν το ποσοστό επιστροφής προϊόντος στο 4%. Επιπλέον, όλα τα ενδύματα κατασκευάζονται κατόπιν παραγγελίας ενώ δεν υπάρχει απόθεμα, προσπαθώντας να μηδενίσουν τα απόβλητα με οποιονδήποτε τρόπο (Fleischer, 2020). Αυτή η νέα τάση προωθεί επίσης τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών και νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης.



Δημιουργία εξατομικευμένων πουλόβερ χωρίς ραφές από τις εταιρείες Son of a Tailor και Shima Seiki. Πηγή: <https://www.kickstarter.com/projects/jessfleischer/zero-waste-pullover>

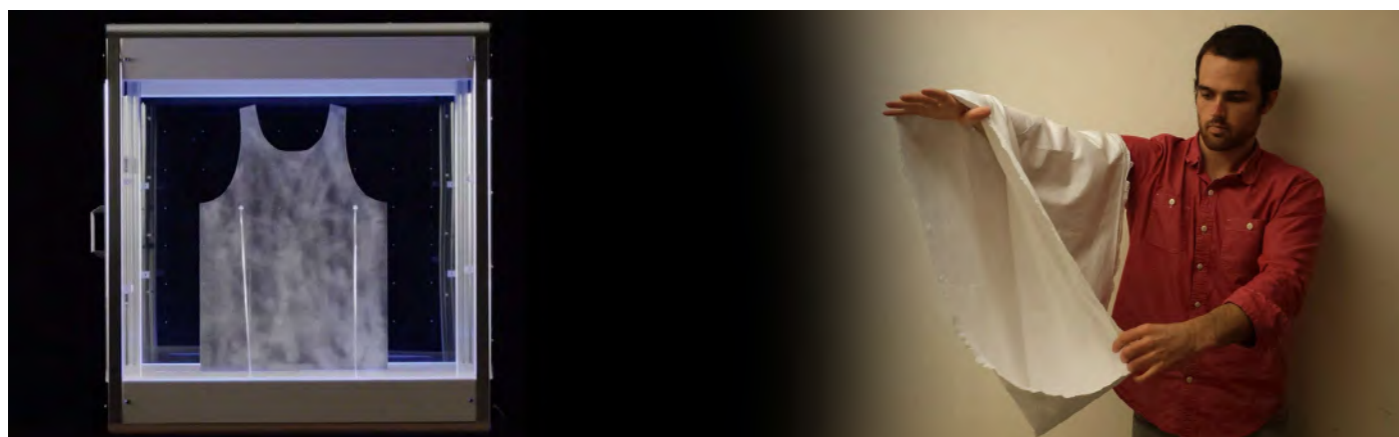
## 2. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΪΝΟΠΟΙΗΣΗ

Το Electrospinning δημιουργήθηκε για την κατασκευή τρισδιάστατων υφασμάτων με προσαρμοσμένη υφή με μια διαδικασία “Field Guided Fabrication”, η οποία χρησιμοποιεί ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε έναν θάλαμο εκτυπωτή, για να καθοδηγήσει ηλεκτροϊονοποιημένες νανοϊνες σε ένα καλούπι οποιουδήποτε σχήματος. Με την αλλαγή του καλουπιού που τοποθετείται μέσα στη μηχανή Electroloom, αλλάζει και το σχήμα του δημιουργούμενου ενδύματος ή αντικειμένου. Με τη μέθοδο αυτή δημιουργήθηκαν ενδύματα όπως μπλουζάκια ή γιλέκα, αλλά η νέα νεοσύστατη εταιρεία Electroloom με έδρα το Σαν Φρανσίσκο έκλεισε το 2016 λόγω ανεπαρκούς χρηματοδότησης. Έτσι, αυτή η τεχνική ηλεκτροϊνοποίησης παρέμεινε στη φάση του πρωτοτύπου (White et. al., 2015).



Διαδικασία δημιουργίας ρούχου με τη μέθοδο Electrospinning

Πηγή: <https://www.kickstarter.com/projects/electroloom/electroloom-the-worlds-first-3d-fabric-printer>



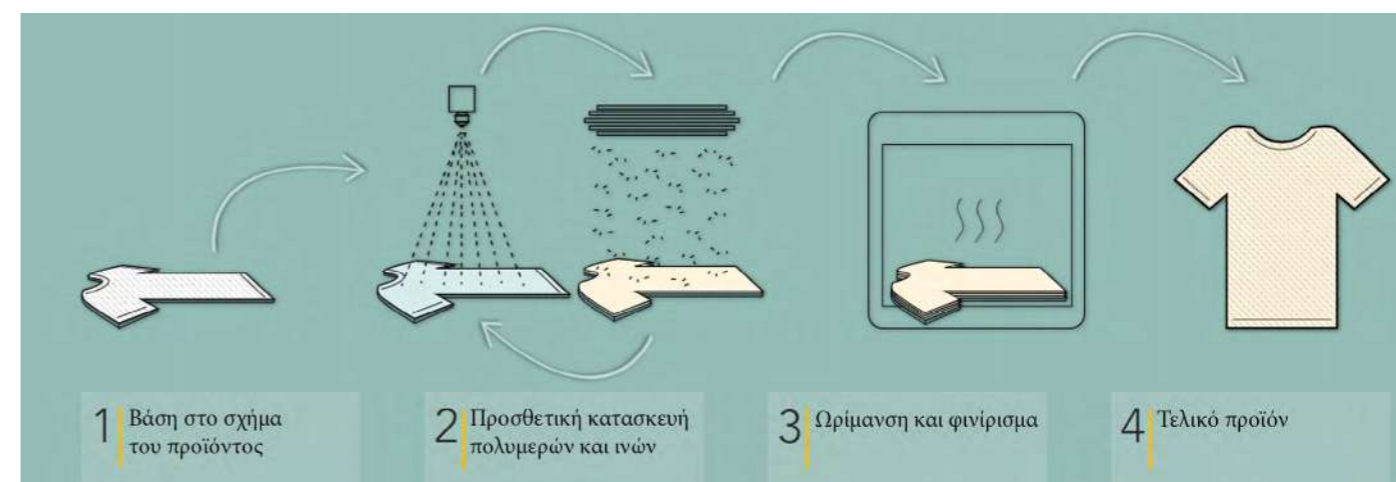
Άποψη εκτυπωμένου ρούχου με το Electrospinning

Πηγή: [https://www.lifo.gr/sites/default/files/styles/max\\_1920x1920/public/articles/2020-08-03/electroloom.jpg?i-token=OTiMEaBe](https://www.lifo.gr/sites/default/files/styles/max_1920x1920/public/articles/2020-08-03/electroloom.jpg?i-token=OTiMEaBe)

## 3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΨΕΚΑΣΜΟ

Η εταιρεία Tamicare με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο που ιδρύθηκε το 2001 κατασκεύασε ένα καινοτόμο τρισδιάστατο ύφασμα, το “Cosyflex”, το οποίο απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Το Cosyflex, κατασκευασμένο από συνδυασμό ινών, είναι ελαστικό και άνετο στη χρήση. Το ύφασμα, το οποίο ψεκάζεται σε στρώσεις από έναν εκτυπωτή, μπορεί να παραχθεί με διάφορους τύπους υγρών πολυμερών με βάση το νερό όπως φυσικό λατέξ, πυρίτιο, πολυουρεθάνη και τεφλόν, καθώς και υφαντικές ίνες όπως βαμβάκι, βισκόζη και πολυαμίδιο, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ανακυκλωμένα υλικά (Tamicare, 2021).

Ο εκτυπωτής εναποθέτει με ακρίβεια τα υλικά με βάση το σχήμα του ρούχου. Επομένως, δεν χρειάζεται κοπή και έτσι εξοικονομείται υλικό. Μετά την σκλήρυνση το ύφασμα αφαιρείται από την πλατφόρμα κατασκευής και είναι έτοιμο για χρήση ή επιπλέον επεξεργασία (ψηφιακή εκτύπωση, κέντημα κ.ά.) Σύμφωνα με την εταιρεία μπορεί να εφαρμοστεί στη μόδα και την αθλητική ένδυση για τη δημιουργία εσωρούχων, ρούχων και παπουτσιών (Shaw, 2016).



Διαδικασία κατασκευής υφάσματος Cosyflex.

Πηγή: <https://www.tamicare.com/manufacture>

Ο Manel Torres εφηύρε την τεχνολογία ύφανσης με ψεκασμό το 2003. Ανακάλυψε ότι από ένα υγρό, που περιέχει ίνες και συνδετικά στοιχεία, μπορεί να δημιουργηθεί ένα μη υφαντικό υλικό ή ένα φιλμ σε οποιαδήποτε επιφάνεια, ακόμα και σε νερό. Συγκεκριμένα στον τομέα της μόδας, τα ρούχα δημιουργούνται απευθείας από την πρώτη ύλη μέσω ενός spray. Η μέθοδος αυτή παρέχει τη δυνατότητα εξατομίκευσης των προϊόντων (σχήμα, μέγεθος, υφή, χρώμα, άρωμα), ώστε να ταιριάζουν στις απαιτήσεις του κάθε πελάτη.

Η τεχνολογία ψεκασμού της Fabrican, όπως ονομάζεται, τροποποιεί συνεχώς τη σύνθεση χρησιμοποιώντας πιο φιλικά για το περιβάλλον υλικά, παρέχοντας βιώσιμη μόδα. Χρησιμοποιεί διαφορετικούς τύπους ινών, από φυσικές έως συνθετικές, συμπεριλαμβανομένων ινών κερατίνης, όπως μαλλί και μοχέρ, βαμβάκι, νάιλον, κυτταρίνη και νανοϊνες άνθρακα. Οι επιστρώσεις ψεκασμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επισκευή και την ανανέωση κατεστραμμένων ή φθαρμένων περιοχών του, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Ακόμα, αυτοί οι υγροί ιστοί μπορούν να ανακυκλωθούν. Δημιουργούνται δηλαδή ρούχα τα οποία αφού έχουν φορεθεί, μπορούν να αποσυντεθούν και να ψεκαστούν και πάλι. Συνεπώς, η διαδικασία ξεκινά με αφετηρία τις πρώτες ύλες, οι οποίες στη συνέχεια ψεκάζονται ώστε να δημιουργήσουν σε αυτήν την περίπτωση- το ρούχο, και όταν το ρούχο απορριφθεί, μετατρέπεται σε πρώτη ύλη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται (fabrican, n.d.).



Η κυκλική διαδικασία σχεδιασμού στην οποία βασίζεται η Fabrican.  
 Πηγή: <https://www.fabricanltd.com/about/ethical-and-environmental/>



Άποψη της διαδικασίας ψεκασμού για τη δημιουργία ρούχου.

Πηγή: <https://girbaulab.com/manel-torres-founder-of-fabrican-at-the-girbau-lab-innovators-club/>

Η χρήση αυτής της μεθόδου έγινε ευρέως γνωστή όταν στην Εβδομάδα Μόδας του Παρισιού για την επίδειξη της συλλογής Άνοιξη/Καλοκαίρι 2023, η παριζιάνικη μάρκα ενδυμάτων Coperni, παρουσίασε επί σκηνής αυτή τη διαδικασία. Το μοντέλο Bella Hadid βάφτηκε κυριολεκτικά με ένα λευκό σπρέι, το οποίο στη συνέχεια μετατράπηκε σε φόρεμα πάνω στο σώμα της, μέσα σε περίπου 10 λεπτά. Στη συνέχεια, η επικεφαλής του οίκου επενέβη στο στυλ του φορέματος, δημιουργώντας ένα σκίσιμο και αλλάζοντας τη λαιμόκοψη (Parkes, 2022).



Δημιουργία φορέματος μέσω ψεκασμού στη διάρκεια της εβδομάδας μόδας το 2023.

Πηγή: Image via Getty/JULIEN DE ROSA/AFP <https://www.complex.com/style/a/gooseed/bella-hadid-spray-on-coperni-dress-fabrican-manel-torres>

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

“Η Βιομηχανία της μόδας έπρεπε να ενσωματώνει περισσότερη τεχνολογία, για να αντικατοπτρίζει την πορεία της κοινωνίας”.

Τα τελευταία χρόνια, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα μόδας έχουν βρεθεί στο προσκήνιο πολλών επιδείξεων μόδας. Η τρισδιάστατη εκτύπωση στη μόδα αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία εξαιρετικά περίπλοκων και εντυπωσιακών ρούχων, που κινούνταν στην αναζήτηση των ορίων της μόδας. Πλέον υπάρχουν σχεδιαστές που ενδιαφέρονται να χρησιμοποιήσουν την τρισδιάστατη εκτύπωση ως μια συμφέρουσα μέθοδο κατασκευής για την ανάπτυξη συλλογών με καθημερινά, εξατομικευμένα ενδύματα και αξεσουάρ, που αντιπροσωπεύουν την συνύπαρξη ομορφιάς και τεχνολογίας.

Αν και η δημιουργία εξατομικευμένων προϊόντων αποτελεί μια δαπανηρή διαδικασία στη βιομηχανία της μόδας, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η ιδανική τεχνική για μαζική προσαρμογή, καθώς παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής προϊόντων μόδας κατασκευασμένα στα μέτρα του εκάστοτε πελάτη. Η τρισδιάστατη εκτύπωση βελτιώνει τη διαδικασία παραγωγής, καθώς επιτρέπει ταχύτερες και φθηνότερες μεθόδους παραγωγής πρωτοτύπων, αλλά και δημιουργία προσαρμόσιμων προϊόντων. Αυτά τα στοιχεία είναι αρκετά σημαντικά στη βιομηχανία της μόδας. Όμως, παρόλο που οι περιπτώσεις που αφορούν πλήρως τρισδιάστατα εκτυπωμένα ρούχα αυξάνονται, οι περισσότερες περιπτώσεις εξακολουθούν να αφορούν μερική κατασκευή ή δημιουργία αξεσουάρ.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένες περιπτώσεις εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία της μόδας, οι οποίες ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες:

- (1) Δημιουργία εξολοκλήρου τρισδιάστατα εκτυπωμένων ρούχων,
- (2) Συνδυασμός τρισδιάστατης εκτύπωσης και υφάσματος,

## ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΞΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΡΟΥΧΩΝ

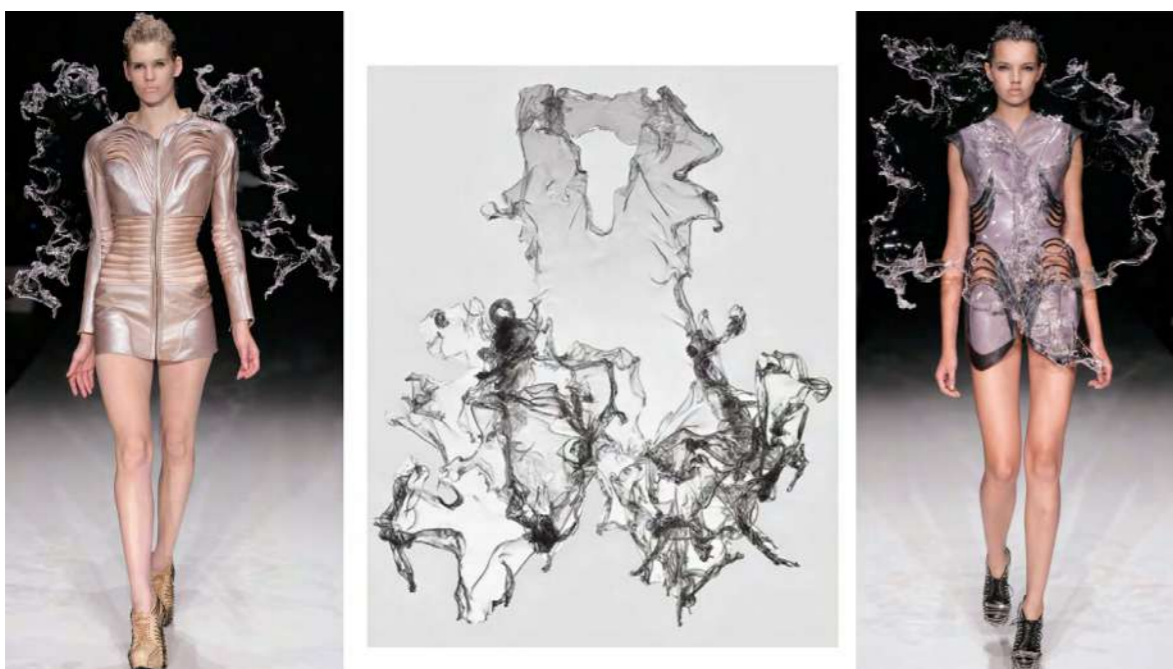
Ο Ολλανδός βιομηχανικός σχεδιαστής Jiri Evenhuis και ο Φινλανδός καλλιτέχνης Jane Kytanen ήταν οι πρώτοι που δημιούργησαν ένα πλήρως λειτουργικό εκτυπωμένο φόρεμα με το όνομα “Black Drape Dress” το 2000 (Kuhn & Minuzzi, 2015). Το όραμά τους ήταν να δημιουργήσουν ρούχα, τσάντες και αξεσουάρ, ώστε όσοι ταξιδεύουν να κατεβάζουν και να εκτυπώνουν τα σχέδια σε οποιαδήποτε τοποθεσία χρησιμοποιώντας τρισδιάστατους εκτυπωτές. Ονόμασαν το εγχείρημα Lost Luggage και το Black Drape Dress ήταν μέρος αυτού του έργου.



To Black Drape Dress

Πηγή: <https://3denginearrings.com/wp-content/uploads/2020/04/1401286.png>

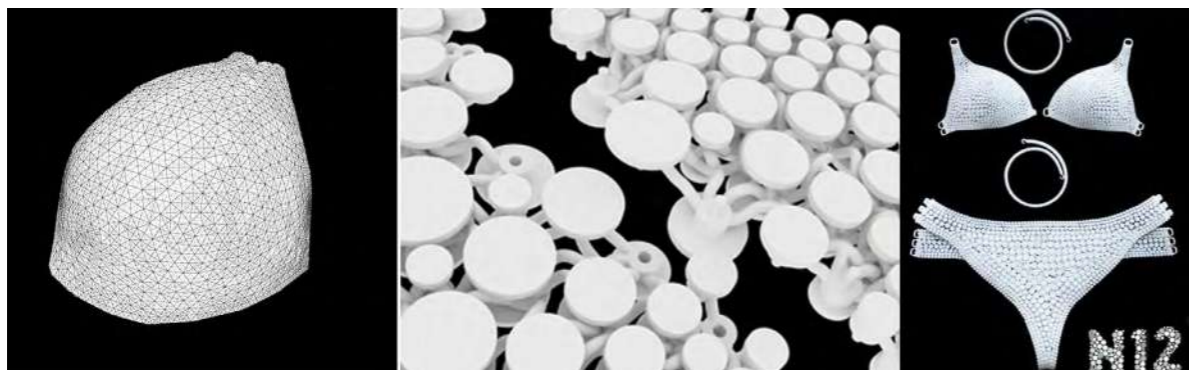
Από τις αρχές της δεκαετίας του 2010, πολλές τρισδιάστατα εκτυπωμένες δημιουργίες εμφανίστηκαν σε επιδείξεις μόδας (Richardot, 2020). Η Iris van Herpen ήταν μια από τις πρώτες σχεδιάστριες που υιοθέτησε αυτή την τεχνολογία παρουσιάζοντας το 2010 το πρώτο της εκτυπωμένο φόρεμα ως μέρος της συλλογής Crystallisation, το οποίο δημιουργήθηκε με τεχνολογία SLS. Το φόρεμα ήταν τυπωμένο από λευκό πολυαμίδιο θυμίζοντας τον τρόπο που οι αποθέσεις ασβεστόλιθου σχηματίζουν κοχύλια (Herpen, 2020b). Χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη τεχνολογία, επιχειρεί να κατασκευάσει εννοιολογικά προϊόντα μόδας, ενσωματώνοντας περίπλοκες δομές και γεωμετρίες (Brown, 2020).



Crystallisation

Πηγές: <https://www.irisvanherpen.com/DOCS/IVH-Crystallization.pdf>  
<https://www.dezeen.com/2013/03/23/crystallize-water-dress-by-iris-van-herpen-daphne-guinness-and-nick-knight/>

Η εταιρεία ρούχων Continuum από τους σχεδιαστές Mary Huang και Jenna Fizel δημιούργησε προϊόντα μόδας που βασίζονται σε ψηφιακή σχεδίαση και τρισδιάστατη εκτύπωση. Το 2011 σε συνεργασία με την Shapeways δημιούργησαν το πρώτο εκτυπωμένο μπικίνι. Το σχέδιο αποτελείται από κύκλους διαμέτρου αντιστρόφως ανάλογης της καμπυλότητας της επιφάνειας (Etherington, 2011), ενώ τα κομμάτια κουμπώνουν μεταξύ τους χωρίς να ράβονται (Shaw, 2016). Στον ιστότοπο της Continuum, οι πελάτες είχαν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν το δικό τους μπικίνι προσδιορίζοντας τα σχήματα του μαγιό τους και τις μετρήσεις του σώματός τους. Στη συνέχεια, το σχέδιο εκτυπωνόταν σε εκτυπωτή SLS με λευκό Nylon 12 το οποίο είναι ανθεκτικό, εύκαμπτο, λεπτό σε πάχος, αδιάβροχο και άνετο (“Continuum”, n.d.).



Τρισδιάστατο τυπωμένο μπικίνι N12

Πηγή: <https://www.dezeen.com/2011/06/07/n12-3d-printed-bikini-by-continuum-fashion-and-shapeways/>

Οι σχεδιαστές Francis Bitonti και Michael Schmidt συνεργάστηκαν για να δημιουργήσουν το τρισδιάστατο εκτυπωμένο φόρεμα που φόρεσε η Dita Von Teese στο συνέδριο που διοργάνωσε η Shapeways στο Ace Hotel της Νέας Υόρκης το Μάρτιο του 2013 (Shaw, 2016). Το φόρεμα, το οποίο έλαβε πολλές διακρίσεις και προκάλεσε το ενδιαφέρον του κοινού, αποτελούταν από 2.500 κομμάτια που συνδέονταν μεταξύ τους με το χέρι. Αφού ολοκληρώθηκε, βάφτηκε με μαύρη λάκα και ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση 12.000 κρυστάλλων Swarovski στο χέρι.

Την ίδια χρονιά, σε επίδειξη μόδας της Victoria’s Secret κατά τη διάρκεια της εβδομάδας μόδας στο Παρίσι, παρουσιάστηκε το τρισδιάστατο εκτυπωμένο σύνολο Snow Queen. Για τη δημιουργία του συνόλου που αποτελούνταν από κορσέ, καπέλο και φτερά αγγέλου, χρειάστηκε η συνεργασία της εταιρείας Shapeways, του αρχιτέκτονα Bradley Rothenberg και της Swarovski. Ο σχεδιασμός έγινε με χρήση των λογισμικών Rhino και Maya στις ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου, αφού προηγήθηκε τρισδιάστατο σκανάρισμα (Monget, 2013). Ήταν μια διαδικασία που κινούνταν ανάμεσα στις προσαρμογές του ψηφιακού μοντέλου και τις φυσικές δοκιμές σε νάιλον χρησιμοποιώντας τους εκτυπωτές EOS Selective Laser Sintering 3D. Το εκτυπωμένο σύνολο επιστρώθηκε με εκατομμύρια Swarovski και συνδυάστηκε με εσώρουχα Victoria’s Secret.



Το φόρεμα της Dita Von Teese και το σύνολο της Victoria’s Secret σε συνεργασία με τη Swarovski.

Πηγές: <https://www.dezeen.com/2014/02/14/moviefrancis-bitonti-dita-von-teese-3d-printed-dress/>  
<https://www.designboom.com/design/3d-printed-lingerie-at-the-victorias-secret-fashion-show-12-11-2013/>

Η σχεδιάστρια Alexis Walsh με έδρα τη Νέα Υόρκη εξερεύνησε τις αναδυόμενες τεχνολογίες και τις συνδύασε με την παραδοσιακή χειροτεχνία. Η διεπιστημονική προσέγγιση που χρησιμοποιεί ωθεί στα άκρα το σχέδιο μόδας. Σε συνεργασία με τον Ross Leonardy δημιούργησε το 2013 το “Spire Dress”. Ο σχεδιασμός του φορέματος έγινε με αλγορίθμους χρησιμοποιώντας τα ψηφιακά προγράμματα Grasshopper και Rhino 3D και εκτυπώθηκε τρισδιάστατα με τη μέθοδο SLS. Το φόρεμα συντίθεται από 400 λευκά νάιλον κομμάτια συναρμολογημένα στο χέρι με μεταλλικά συνδετικά κρικάρια (Chavez, 2014). Χρειάστηκαν τουλάχιστον έξι μήνες έρευνας και πειραματισμού για την ανάπτυξη του ενδύματος. Το 2020, οι Alexis Walsh και ο Justin Hattendorf ξεκίνησαν το JAW Studio. Μαζί έχουν συνεργαστεί για τη δημιουργία τρισδιάστατα εκτυπωμένων κοσμημάτων, προϊόντων μόδας, υλικών και αντικειμένων (Walsh).



Spire Dress

Πηγή: <https://3dprintingindustry.com/news/66801-66801/>

Την άνοιξη του 2015 στην επίδειξη μόδας της Iris van Herpen παρουσιάστηκε η ready-to-wear συλλογή Magnetic Motion σε συνεργασία με τον αρχιτέκτονα Niccolo Casas και την εταιρεία 3D Systems. Η συλλογή περιλάμβανε ένα στράπλες ημιδιαφανές φόρεμα με κρυστάλλινους σχηματισμούς. Ο σχεδιασμός του φορέματος προέκυψε από πειραματισμούς σε μαγνητικά πεδία και σιδηρορευστά που διεξήχθησαν από τον καλλιτέχνη Jolan Van Der Wiel και αναπτύχθηκαν μέσω ψηφιακών προσομοιώσεων από τον Niccolo Casas (Casas, n.d.) Το φόρεμα δημιουργήθηκε στις διαστάσεις του μοντέλου, με χρήση της τεχνολογίας SLA χρησιμοποιώντας το υγρό φωτοπολυμερές υλικό Accura Cleave. Το υλικό αυτό σκληραίνει σε διαδοχικές στρώσεις με υπεριώδες φως, με αποτέλεσμα ένα λείο, ημιδιαφανές και λεπτομερές προϊόν (Print to Fit, 2014). Το φόρεμα τυπώθηκε σε εκτυπωτή ProX950 σε δύο δομικά μέρη και χρειάστηκαν 45 και 36 ώρες εκτύπωσης αντίστοιχα. Τέλος, χρειάστηκαν 8 ώρες επιπλέον για το γυάλισμα (Casas, n.d., Shaw, 2016).



Magnetic Motion

Πηγές: <https://www.niccolocasas.com/magnetic-motion>  
<https://carnegieart.org/exhibition/iris-van-herpen/>

Ο Karl Lagerfeld, επικεφαλής και καλλιτεχνικός διευθυντής του οίκου Chanel, παρουσίασε μία φουτουριστική τρισδιάστατη εκτυπωμένη εκδοχή του κλασικού σακακιού στην επίδειξη μόδας στο Παρίσι τον Ιούλιο του 2015. Η συλλογή F/W 2015 αποτελούνταν από 10 σύνολα κατασκευασμένα με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, ενώ τα αξεσουάρ κοσμημάτων ήταν επίσης τρισδιάστατα εκτυπωμένα. Στόχος ήταν να μετατραπεί το εμβληματικό σακάκι του 20ού αιώνα στην πιο σύγχρονη εκδοχή του ακολουθώντας τις εξελίξεις του 21ου αιώνα.

Μέρη του τούντ σακακιού και της φούστας εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα (Hipolite, 2015) με τη μέθοδο SLS. Όσον αφορά τον κορμό, είναι εκτυπωμένος σε ένα κομμάτι, χωρίς να έχει ραφές (Matich, 2015). Συμπληρωματικά, προσαρτήθηκαν χάντρες και παγιέτες, δημιουργώντας ένα εφέ που μοιάζει με κέντημα.

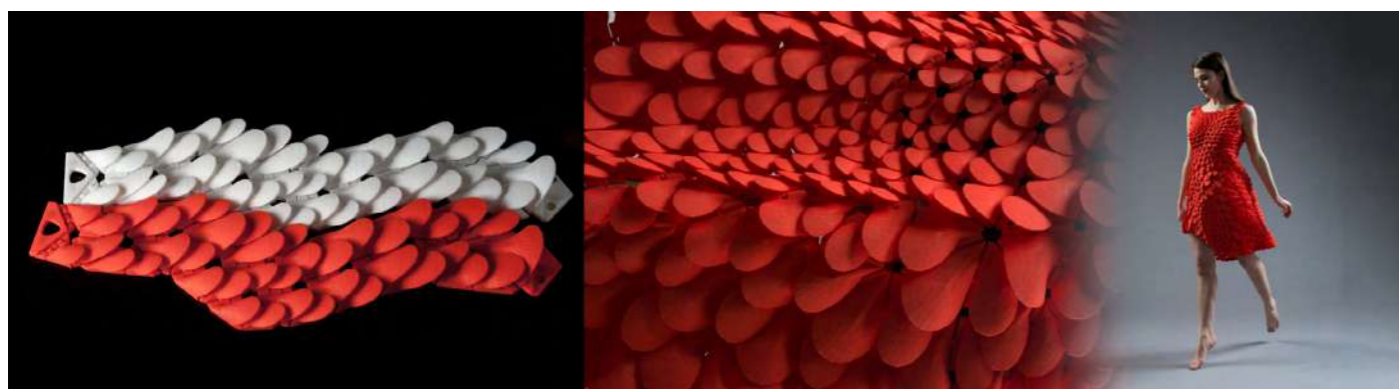




Τρισδιάστατα μέρη από ρούχα του οίκου Chanel

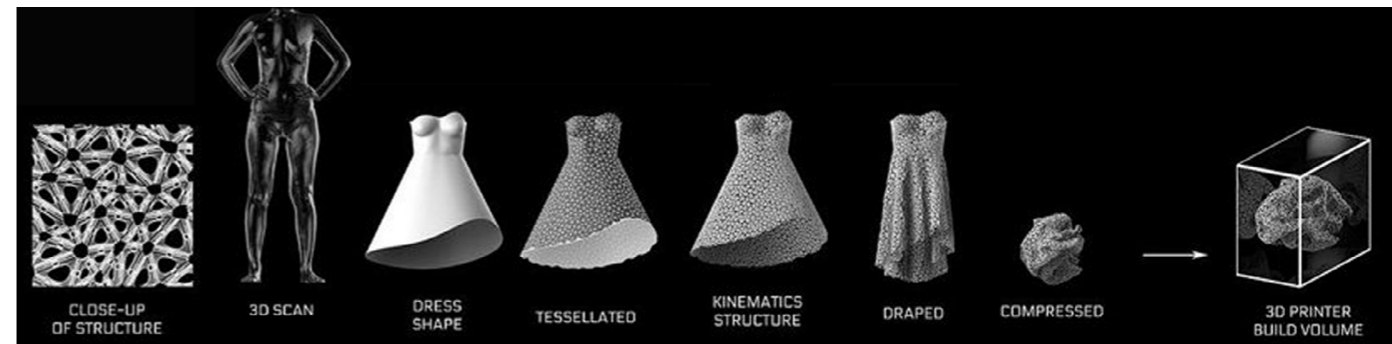
Πηγή: [https://gigazine.net/gsc\\_news/en/20150925-chanel-couture-3d-printing/](https://gigazine.net/gsc_news/en/20150925-chanel-couture-3d-printing/)

Λόγω της περιορισμένης περιοχής εκτύπωσης, τα φορέματα γενικά εκτυπώνονται τμηματικά και στη συνέχεια συναρμολογούνται. Αλλά η Jessica Rosenkrantz και ο Jesse Louis-Rosenberg, που ίδρυσαν τη Nervous System το 2007, ήθελαν να τυπώσουν ένα φόρεμα που δεν θα απαιτούσε συναρμολόγηση μετά την εκτύπωση (Adario Strange, 2021). Για να το πετύχουν αυτό, δημιούργησαν ένα φόρεμα χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη σάρωση του σώματος και στη συνέχεια προσομοίωση, ώστε να εκτυπωθεί ως ένα ενιαίο διπλωμένο κομμάτι. Χρησιμοποιώντας αυτή τη διαδικασία τύπωσαν το φόρεμα Kinematics το 2014 και το φόρεμα Kinematic Petals το 2016 (Nervous System, 2020b, Watkin, 2021). Το φόρεμα αποτελείται από χιλιάδες μοναδικά τριγωνικά πάνελ που συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους, όλα εκτυπωμένα τρισδιάστατα ενιαία σε νάιλον. Ενώ κάθε εξάρτημα είναι άκαμπτο, συνολικά, συμπεριφέρονται ως ένα συνεχές ύφασμα που ανταποκρίνεται στην κίνηση του σώματος. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό ύφασμα, αυτό το ύφασμα ποικίλλει ως προς την ακαμψία, την ελαστικότητα, το πορώδες και το σχέδιο. (Nervous System, 2020c).



Φόρεμα Kinematic petals

Πηγή: <http://inspirationist.net/the-kinematic-petals-dress-features-interconnected-elements-articulated-as-imbricating-shells/>



Διαδικασία εκτύπωσης του φορέματος Kinematics

Πηγή: <https://www.tctmagazine.com/downloads/4355/download/Nervous-Scrunch.png?cb=576b5808dd11fbac20a8430288370c55&w=620&h=>

Η Ισραηλινή σχεδιάστρια μόδας Danit Peleg το 2015 χρησιμοποίησε για την πτυχιακή της εργασία οικιακό τρισδιάστατο εκτυπωτή, προκειμένου να δημιουργήσει τη συλλογή “Liberty Leading the People”, εμπνευσμένη από τον ομώνυμο πίνακα του Delacroix. Η συλλογή της αποτελούνταν από πέντε τρισδιάστατα εκτυπωμένα φορέματα με χρήση του ελαστικού υλικού Filaflex. Η εκτύπωση έγινε σε μέρη τα οποία στη συνέχεια συναρμολογήθηκαν σαν παζλ, ενώ όλη η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο σπίτι της (Peleg, 2020a), δείχνοντας τις δυνατότητες εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής στον χώρο της μόδας.

Η Danit Peleg σχεδίασε επίσης το τρισδιάστατο φόρεμα, μέρος της συλλογής “The Birth of Venus Collection”, εμπνευσμένο από τον πίνακα του Botticelli, το οποίο φορούσε η παραολυμπιονίκης Amy Purdy στην τελετή έναρξης των Παραολυμπιακών Αγώνων στο Ρίο ντε Τζανέιρο το 2016 (Steinberg, 2020). Το φόρεμα εκτυπώθηκε σε FilaFlex σε συνεργασία με την αμερικανική εταιρεία Gerber Technology και η εκτύπωση σε οικιακούς εκτυπωτές Witbox διήρκεσε 120 ώρες. Το 2017, η Danit παρείχε τη δυνατότητα στους πελάτες της μέσω του ιστοτόπου της να παραγγέλνουν εξατομικευμένα σε διαστάσεις, χρώμα και λεπτομέρειες τρισδιάστατα εκτυπωμένα ρούχα. Από το 2020, το κοινό μπορούσε να αγοράσει τα ψηφιακά αρχεία τρισδιάστατων ενδυμάτων και στη συνέχεια να τα εκτυπώσει στον πλησιέστερο τρισδιάστατο εκτυπωτή (Peleg, n.d.).



Liberty Leading the People, The Birth of Venus Collection

Πηγές: <https://bigsee.eu/danit-peleg-danit-peleg-3d-danit-peleg-nft-collection-liberty-leading-the-people/>

<https://wwd.com/fashion-news/fashion-scoops/amy-purdy-wears-3-d-printed-dress-at-paralympic-opening-ceremony-10522946/>

Σε πρόσφατη συλλογή της που αποτελείται από 5 σύνολα, η Danit Peleg χρησιμοποίησε τις τεχνολογίες Polyjet, FDM και Jet Fusion. Επιπλέον, χρησιμοποίησε το OPTITEX, ένα λογισμικό δημιουργίας πατρών, για να δημιουργήσει τις 2D και 3D εκδόσεις της συλλογής.



Nouns: Από την πρόσφατη συλλογή της Danit Peleg

Πηγές: <https://nftvevening.com/wp-content/uploads/2023/02/Cashier-Noun-3D-printed.png> , <https://www.instagram.com/p/CpL5cVYoXLk/?hl=en>

Το τρισδιάστατο εκτυπωμένο φόρεμα “Loom” αναπτύχθηκε από τη σχεδιάστρια Maria Alejandra Mora-Sanchez με έδρα το Χιούστον σε συνεργασία με το Cosine Additive το 2017. Έχοντας ως πηγή έμπνευσης τη φυλή Wayuu, μια εθνοτική κοινότητα της χερσονήσου Guajira στη βόρεια Κολομβία και τη βορειοδυτική Βενεζουέλα, που διαμορφώνεται από τη φύση και το τοπικό περιβάλλον, δημιούργησε ψηφιακά το μοτίβο για το ρούχο. Το τελικό προϊόν εκτυπώθηκε με τη μέθοδο τύπου FFF χρησιμοποιώντας TPU και αποτελεί ένα καινοτόμο 3D φόρεμα που προσαρμόζεται σε διαφορετικά σώματα (Mora Sanchez).



Loom

Πηγή: <https://www.mariale.design/loom>

Η αειφορία αποτελεί μεγάλη ανησυχία για την κλωστοϋφαντουργία, καθώς θεωρείται μία από τις κορυφαίες βιομηχανίες παραγωγής ρύπων στον κόσμο (Fibre2Fashion, 2012). Η Αμερικανίδα σχεδιάστρια μόδας Julia Daviy, έχοντας σκεφτεί ότι τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα ρούχα θα μπορούσαν να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα στη βιομηχανία της μόδας (Morgen, 2020), δημιούργησε το 2018 τη συλλογή καθημερινών ρούχων “Liberation” (Dip et al., 2021). Σχεδίασε την πρώτη τρισδιάστατη εξατομικευμένη φούστα “Zero Waste” χρησιμοποιώντας ανακυκλώσιμα νήματα, αποδεικνύοντας ότι κατά τη διαδικασία παραγωγής παράγονται λιγότερο από 1% απόβλητα. Σύμφωνα με την Julia Daviy, με την τρισδιάστατη εκτύπωση δεν γίνεται σπατάλη υφασμάτων, ενώ αποφεύγεται και η μαζική παραγωγή. Κάθε ρούχο εκτυπώνεται σε δύο ή τέσσερα μέρη, χρησιμοποιώντας τεχνολογία εκτύπωσης FDM μεγάλης κλίμακας και υλικό εκτύπωσης θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU). Επίσης, έχει στραφεί στις εύκαμπτες ρητίνες και τη στερεολιθογραφία (SLA), η οποία της επιτρέπει να εκτυπώνει περίπλοκες δομές χωρίς (σχεδόν) καμία μετα-επεξεργασία ή χειρωνακτική εργασία ( PROMOSTYL).



Liberation

Πηγή: <https://sourcingjournal.com/gallery/topics/technology/julia-daviy-3d-printed-fashion-the-liberation-collection-nyfw-september-118113/9j0a9984-teaser/>

Δύο Ρώσοι σχεδιαστές—ο Oleg Soroko και ο Minstev Kirill—συνεργάστηκαν εφαρμόζοντας τον παραμετρικό σχεδιασμό στην μόδα δημιουργώντας το τρισδιάστατο εκτυπωμένο φόρεμα Dragonfly το 2019. Αυτό το φόρεμα αποτελείται από δύο μέρη, με το πάνω μέρος να έχει συμπαγή γεωμετρία και το κάτω μέρος να είναι σχεδιασμένο ως αλυσίδα. Η ιδέα πίσω από τον σχεδιασμό ήταν να δημιουργήσει ένα φόρεμα απλό και πολύπλοκο ταυτόχρονα με δομή που θυμίζει το Chain Mail project της NASA.



Dragonfly

Πηγή: <https://parametric-architecture.com/dragonfly-3d-printed-dress/>

Η πολυπλοκότητα καταδεικνύει τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης και το μελλοντικό εύρος της βιομηχανίας της μόδας να κάνει τα ρούχα φορέσιμα και άνετα στην εφαρμογή. Τα τρισδιάστατα παραμετρικά μοτίβα θα ήταν αδύνατον να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους. Η αλυσίδα μπορεί να (απο)συναρμολογηθεί από τους χρήστες.

Πριν από τον σχεδιασμό έλαβε χώρα η τρισδιάστατη σάρωση ενός ανθρώπινου σώματος, ενώ μετά από αυτόν το φόρεμα εκτυπώθηκε στο εργαστήριο τρισδιάστατης εκτύπωσης του Ινστιτούτου Αεροπορίας της Μόσχας (Moscow Aviation Institute - ΜΑΙ) από εκτυπωτή SLS από πολυαμίδιο. Πλέον το φόρεμα μπορεί να εκτυπωθεί ακόμα και από οικιακούς εκτυπωτές FDM και να συναρμολογηθεί από τους χρήστες (Team PA, 2019).

### ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ

Η Iris van Herpen είναι από τους πιο γνωστούς σχεδιαστές τρισδιάστατων εκτυπώσεων στη βιομηχανία της μόδας. Η συλλογή Ludi Naturae, η οποία είχε επίκεντρο τη φύση, περιλάμβανε το φόρεμα Foliage σχεδιασμένο με αλγόριθμο στο Grasshopper και κατασκευασμένο από τρισδιάστατα μοτίβα εκτυπωμένα με PolyJet. Η τρισδιάστατη εκτύπωση συμπεριέλαβε το τούλι ανάμεσα στο εκτυπωμένο υλικό για καλύτερη σύνδεση (Doubrovski et al., 2018).



Foliage

Πηγές: [https://images.squarespace-cdn.com/content/61b0c1af18d3c65348ad7e76/1641306130429-YYC241QEHD24A54M-3WA/iris\\_van\\_herpen\\_HC\\_SS18\\_look01.jpeg?format=1500w&content-type=image%2Fjpeg](https://images.squarespace-cdn.com/content/61b0c1af18d3c65348ad7e76/1641306130429-YYC241QEHD24A54M-3WA/iris_van_herpen_HC_SS18_look01.jpeg?format=1500w&content-type=image%2Fjpeg)  
<https://3dprintedart.stratasys.com/videos-2-Stznm/v/iris-van-herpen-ludi-naturae>

Σε κάθε της συλλογή η Iris van Herpen προσπαθεί να ωθήσει στα όρια την τρισδιάστατη εκτύπωση ενδυμάτων (Chalcraft, 2020) και δημιουργεί ρούχα που χαρακτηρίζονται από πρωτοπορία και δημιουργικότητα. Ακόμα, έχει συνεργαστεί με τους Alexander McQueen και Viktor & Rolf και το σχεδιαστικό της στυλ έχει επηρεαστεί από αυτούς (Hemmings, 2020). Πειραματίζεται με συσχετισμούς που προκύπτουν μέσα από τη συμβίωση, τον διάλογο της τέχνης και της επιστήμης, τη διασταύρωση του τεχνητού και του οργανικού, το πείραμα, την καινοτομία και τη συνεργασία. Συνδυάζει την τεχνολογία με την παραδοσιακή ραπτική, την οποία διευρύνει μέσα από καινοτόμες διεπιστημονικές προσεγγίσεις συνεργασιών με καλλιτέχνες, αρχιτέκτονες

και ακαδημαϊκούς. Μερικές σημαντικές συνεργασίες που έχει πραγματοποιήσει είναι με τη Neri Oxman από το MIT Media Lab (McMahon, 2020), τον Ιταλό αρχιτέκτονα και καθηγητή Niccolò Casas (Niccolo Casas, 2020a), την Αυστριακή αρχιτέκτονα και σχεδιάστρια Julia Koerner (Koerner, 2020a), τον αρχιτέκτονα Daniel Widrig, τον Βέλγο αρχιτέκτονα Isaie Bloch (Howarth, 2020) και επιστήμονες από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ντελφτ όπως οι Jouke Verlinden and Zjenja Doubrovski (Verlinden et al., 2020) μεταξύ άλλων.

Η εταιρεία μόδας threeASFOUR (N.Y., ΗΠΑ) συνδύασε τη σύγχρονη τεχνολογία με την παραδοσιακή δεξιοτεχνία, για να δημιουργήσει είδη ένδυσης. Ιδρύθηκε το 2005 από τους σχεδιαστές Gabriel Asfour (Λίβανος), Angela Donhauser (Σοβιετική Ένωση) και Adi Gil (Ισραήλ) (ThreeASFOUR, 2020), οι οποίοι από το 2013 άρχισαν να συνδυάζουν την τρισδιάστατη εκτύπωση με τη δεξιοτεχνία υψηλής ραπτικής, αναπαράγοντας φυσικές μορφολογίες, βιολογικές μορφές και πολύπλοκη γεωμετρία στα ρούχα τους. Οι ThreeASFOUR έχουν συνεχείς συνεργασίες με οραματιστές καλλιτέχνες αλλά και με διάφορες εταιρείες, πραγματοποιώντας μια διεπιστημονική προσέγγιση τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην παραγωγή. Η δέσμευση για βιωσιμότητα είναι αναπόσπαστο μέρος του οράματος της εταιρείας. Τα φορέματα Bahai, Harmonograph, Oscillation και Pangolin είναι μερικά παραδείγματα από τις δημιουργίες τους (Pearson, 2020).

Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα φορέματα “Harmonograph” και “Pangolin”, που αποτελούν μέρος της συλλογής Biomimicry, παρουσιάστηκαν στην επίδειξη μόδας για το φθινόπωρο-χειμώνα του 2016 στη Νέα Υόρκη. Η συλλογή εστιάζει σε βιολογικές μορφές και υφές και αποτελεί συνεργασία των threeASFOUR με τον σχεδιαστή Travis Fitch και την εταιρεία Stratasys. Συγκεκριμένα, το πρώτο φόρεμα περιστρέφεται γύρω από το σώμα σε τρεις σπείρες, που μιμούνται την ακολουθία Fibonacci (Stratasys, 2016). Η μορφή διερευνά τη σχέση σώματος-κυττάρου, όπου η πραγμάτωση ενός μέρους είναι αδιαχώριστη από το σύνολο. Το δεύτερο φόρεμα αποτελείται από 14 μοτίβα μιμούμενα υφές ζώων και ανταποκρίνεται στην κίνηση και την ανατομία του χρήστη. Για τη δημιουργία των ρούχων χρησιμοποιήθηκε το υλικό Agilus30 που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys. Είναι ένα ελαστομερές υλικό διαθέσιμο σε μαύρο χρώμα με βάση το ακρυλικό που μιμείται το καουτσούκ. Το Agilus30 διαθέτει εξαιρετική ευελιξία, ακρίβεια, ανθεκτικότητα και λείο φινίρισμα επιφάνειας και είναι κατάλληλο για περίπλοκα σχήματα και λεπτομέρειες (Stratasys). Ακόμα, η ικανότητα του τρισδιάστατου εκτυπωτή Objet500 Connex3 να μεταβάλλει τις ιδιότητες του υλικού, όπως την ακαμψία και τη διαβάθμιση χρώματος, παρείχε στους σχεδιαστές τον απαραίτητο έλεγχο στο πορώδες, τη διαφάνεια και την ευελιξία ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις κινητικές απαιτήσεις του ανθρώπινου σώματος (Stratasys, 2016, McKnight, 2016).



Pangolin και Harmonograph

Πηγές: <https://threeasfour.tumblr.com/post/144020465695/threeasfour-pangolin-dress-3d-printed-in>  
<https://www.dezeen.com/2016/02/17/3d-printed-dresses-threeasfour-new-york-fashion-week-2016/>

Η Pringle of Scotland παρουσίασε το φθινόπωρο του 2014 στην επίδειξη μόδας του Λονδίνου ρούχα με τρισδιάστατη εκτύπωση. Σε συνεργασία με τον Richard Beckett, που ασχολείται με την επιστήμη των υλικών, χρησιμοποίησαν τρισδιάστατο εκτυπωτή SLS, EOS Formiga P100, για τη δημιουργία μικροσκοπικών μερών νάιλον υψηλής ανάλυσης, ώστε να επιτευχθεί η κίνηση του ρούχου. Τα τυπωμένα μέρη στερεώθηκαν με το χέρι στο πλεκτό. Οι λωρίδες του υλικού σχημάτιζαν μανσέτες για σακάκια, ενώ μεγαλύτερα στοιχεία δημιουργούσαν σχέδια σε σχήμα διαμαντιού σε πουλόβερ και αμάνικα τοπ (Howarth, 2014).



Pringle of Scotland

Πηγή: <https://www.dezeen.com/2014/02/17/3d-printed-fabrics-by-richard-beckett-woven-into-pringle-of-scotland-s-ready-to-wear-garments/>

Η Ισραηλινή σχεδιάστρια μόδας Noa Raviv παρουσίασε το 2014 την πτυχιακή της εργασία που αφορούσε την τρισδιάστατη εκτυπωμένη συλλογή με τίτλο “Hard Copy”. Πηγή έμπνευσης αποτελούν τα σπασμένα μαρμάρινα ελληνικά γλυπτά, τα οποία παρουσιάζουν έλλειψη συμμετρίας και δημιουργούν θέμα αντίληψης σχετικά με τη σκληρότητα του υλικού και την ελεύθερα ρέουσα μορφή του γλυπτού. Η συλλογή με αναφορά στο παρελθόν δημιουργεί νέες φόρμες και υφές χρησιμοποιώντας ως βασικό στοιχείο της σύνθεσης το πλέγμα που εμφανίζεται στα τρισδιάστατα αντικείμενα των ψηφιακών λογισμικών. Για να “σπάσει” η συμμετρία και η ορθοκανονικότητα του αυστηρού αυτού συστήματος, τα πλέγματα παραμορφώνονται δημιουργώντας οπτικές ψευδαισθήσεις διςδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων. Τα ρούχα αποτελούνται από τρισδιάστατες εκτυπωμένες ασπρόμαυρες άκαμπτες γραμμές, ενώ σε ορισμένα ρούχα χρησιμοποιείται και μία πορτοκαλί γραμμή, η οποία τονίζει τις ακμές του επιλεγμένου αντικειμένου στο λογισμικό μοντελοποίησης. Τα τρισδιάστατα φουτουριστικά σχήματα συνδυάστηκαν με ύφασμα κομμένο με laser· τούλι και μεταξωτή οργάντζα, σε μαύρους, άσπρους και ημιδιαφανείς τόνους τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο με βολάν και πλισέ, δημιουργώντας σχήματα με όγκο (Howarth, 2014). Για την εκτύπωση επιλέχθηκε έγχρωμος τρισδιάστατος εκτυπωτής πολλών υλικών Objet500 Connex3 (Stratasys) με χρήση των πολυμερών υλικών VeroWhite και VeroBlack (Stratasys, 2014).



Hard Copy

Πηγή: <https://www.designboom.com/design/noa-raviv-stratasys-hard-copy-fashion-collection-3d-printing-israel-08-25-2014/>

Η Αυστριακή σχεδιάστρια Julia Koerner κινείται ανάμεσα στην αρχιτεκτονική, το αντικείμενο και το σχέδιο μόδας, υιοθετώντας τεχνολογία για την εφαρμογή τεχνικών αρχιτεκτονικού σχεδιασμού στη σχεδίαση μόδας και κοστούμιών. Ίδρυσε την εταιρεία JK Design GmbH, που ειδικεύεται στον ψηφιακό σχεδιασμό για τρισδιάστατη εκτύπωση και το 2015 κυκλοφόρησε μια εξολοκλήρου τρισδιάστατα εκτυπωμένη συλλογή ρούχων με τίτλο “Sporophyte”. Η Koerner έχει εφαρμόσει τρισδιάστατη εκτύπωση και παραμετρικό σχεδιασμό για προϊόντα υψηλής ραπτικής που αντλούν έμπνευση από τη φύση. Έχει συνεργαστεί με οίκους υψηλής ραπτικής (Iris van Herpen, Chanel) αλλά και παραγωγές του Χόλυγουντ, όπως το Marvel’s Black Panther, δημιουργώντας τρισδιάστατα εκτυπωμένα κοστούμια. Πρόσφατα συνεργάστηκε με τη Swarovski συνδυάζοντας την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης με γυαλί (Koerner).



Το τρισδιάστατο εκτυπωμένο φόρεμα αντικατοπτρίζει τον πλασματικό κόσμο της τεχνικής προόδου της Wakanda και ταυτόχρονα παραπέμπει σε μοτίβα της παραδοσιακής ενδυμασίας Ζουλού.

Πηγή: <https://www.juliakoerner.com/black-panther>

Φόρεμα από τη συλλογή Arid, αποτελούμενο από συνδεόμενα 3D κομμάτια εκτυπωμένα πάνω σε ύφασμα.

Πηγή: <https://www.juliakoerner.com/aridcollection>

Ακόμα, έχει εφαρμόσει τρισδιάστατη εκτύπωση απευθείας σε ύφασμα. Στη συλλογή “Arid”, 38 τυπωμένα κομμάτια από Vero Multi-Material με χρήση του εκτυπωτή J850, 3DF Polyjet από την Stratasys®, (3D fashion by stratasys) μπορούν να συνδυαστούν δημιουργώντας ένα φόρεμα ή να αναδιαμορφωθούν για να σχηματίσουν άλλα είδη ενδυμάτων. Διαθέτουν αρμούς αντί για ραφές, που επιτρέπουν διαφορετικές συνδέσεις και διαμορφώσεις (Sawant, 2021).

Η Γερμανίδα σχεδιάστρια Babette Sperling στη δημιουργία της συλλογής της το 2016 εντόπισε ότι υπήρχαν τρία σημαντικά ζητήματα σχετικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση στη μόδα. Τα προϊόντα δεν έχουν ικανοποιητικά άνετη εφαρμογή, οι περισσότεροι σχεδιαστές χρησιμοποιούν τρισδιάστατους εκτυπωτές πολλαπλών υλικών που δεν είναι προσβάσιμοι στους περισσότερους τελικούς χρήστες και τέλος, η προέλευση και ο οικολογικός αντίκτυπος των υλικών δεν λαμβάνονται συχνά υπόψη.



Διακοσμητικά τρισδιάστατα εκτυπωμένα στοιχεία από την Babette Sperling

Πηγή: <https://www.designindaba.com/articles/creative-work/fashion-collection-features-hidden-braille-messages>

8 Ο εκτυπωτής J850 TechStyle 3D Stratasys είναι ένας PolyJet εκτυπωτής ειδικός για τρισδιάστατη εκτύπωση υφασμάτων, ρούχων, αξεσουάρ και υποδημάτων. Βασίζεται στην τεχνολογία inkjet της Stratasys, εκτυπώνοντας περισσότερα από 600.000 χρώματα με το υλικό Agilus30 CMY και τις ρητίνες VeroVivid και Vero ContactFlex, προσφέροντας απαλή και λεία αίσθηση. Το J850 TechStyle μπορεί να εκτυπώσει σε διάφορα υφάσματα, όπως τζιν, βαμβάκι, πολυεστέρα, λινό και δέρμα. Τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει το PolyJet είναι η ικανότητα ελέγχου της αδιαφάνειας και της σκληρότητας του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, εάν το λογισμικό GrabCAD Print της εταιρείας παράσχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης των ρούχων δείχνοντας την εφαρμογή στο σώμα, μπορεί να διευρύνει τις δυνατότητες οπτικοποίησης στον κόσμο της μόδας (Molitch-Hou, 2022).

Στόχος της ήταν να δημιουργήσει ρούχα χρησιμοποιώντας εκτύπωση FDM με φυσικά, ανακυκλώσιμα υλικά. Η ιδέα ήταν να εκτυπώσει τρισδιάστατο κείμενο σε γραφή Braille απευθείας σε ύφασμα. Μετά από δοκιμές εκτύπωσης διαφορετικών υλικών σε ύφασμα, επιλέχθηκε ένα εύκαμπτο νήμα από ανακυκλώσιμες πρώτες ύλες. Το φιλικό προς το περιβάλλον, βιοδιασπώμενο υλικό WillowFlex είχε ισχυρή πρόσφυση σε φυσικά υλικά όπως το βαμβάκι και το μετάξι, και η Sperling το χρησιμοποίησε τόσο για την εκτύπωση κειμένου απευθείας στο ύφασμα, όσο και για την δημιουργία κουμπιών διαφορετικών μεγεθών (Scott, 2017).

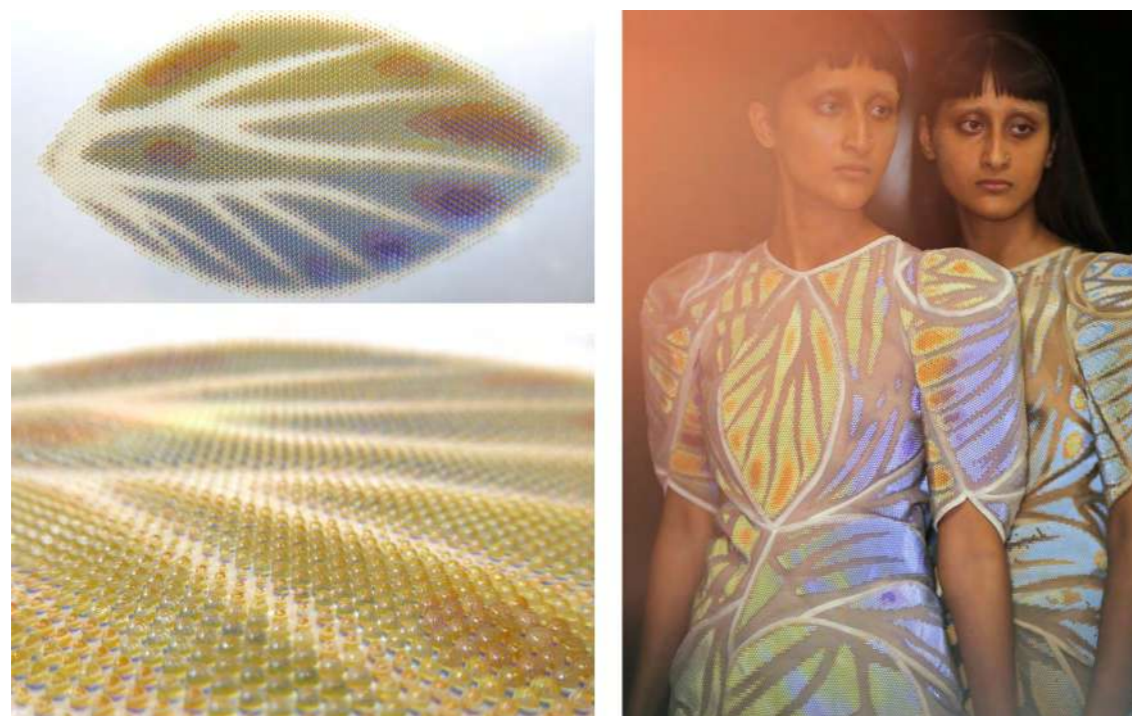
Ο Αμερικανός σχεδιαστής Travis Fitch είναι ο δημιουργός του Fitchwork, μιας συνεργατικής προσπάθειας που ιδρύθηκε το 2016 και περιέχει αρχιτεκτονική, μόδα και σχεδιασμό προϊόντων. Στα έργα του συνδυάζει γεωμετρική έρευνα με καινοτόμα σχεδιαστικά εργαλεία. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει σημαντικές συνεργασίες με σχεδιαστές μόδας δημιουργώντας τρισδιάστατα εκτυπωμένα ρούχα και συμμετέχοντας στην έρευνα, την ανάπτυξη και την εφαρμογή σύγχρονων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Χαρακτηριστικό διαφόρων έργων του αποτελεί η χρήση του χρώματος στην τρισδιάστατη εκτύπωση υφασμάτων, καθώς τα έργα τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κόσμο της μόδας είναι συχνά μονόχρωμα. Το 2017, η Fitchwork κυκλοφόρησε το Superpattern, μια συλλογή από περίπλοκα δομημένα, κατά παραγγελία φωτιστικά και κοσμήματα (Fitch).



Πολύχρωμες σχεδιαστικές εκτυπώσεις πάνω σε ύφασμα από τον Travis Fitch

Πηγή: <https://www.instagram.com/fitchwork/>

Το φόρεμα Greta Oto, που σχεδιάστηκε το 2019 από τους threeASFOUR σε συνεργασία με τον σχεδιαστή Travis Fitch και την εταιρεία Stratasys, αποτελείται από πολυεστερικό ύφασμα πάνω στο οποίο έχει γίνει απευθείας τρισδιάστατη εκτύπωση. Το σχέδιο μιμείται φτερά πεταλούδας και αποτελείται από τρισδιάστατες κουκίδες που έχουν δύο λωρίδες χρώματος και μία διάφανη επιστρώση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το χρώμα του φορέματος να αλλάζει με κάθε ελάχιστη αλλαγή γωνίας φωτισμού, δημιουργώντας μια ιριδίζουσα μπλε-χρυσή χρωματική ποικιλομορφία. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Vero Multi-Material και εκτυπώθηκε από τον εκτυπωτή J850™ 3DFashion (Stratasys, 2019).



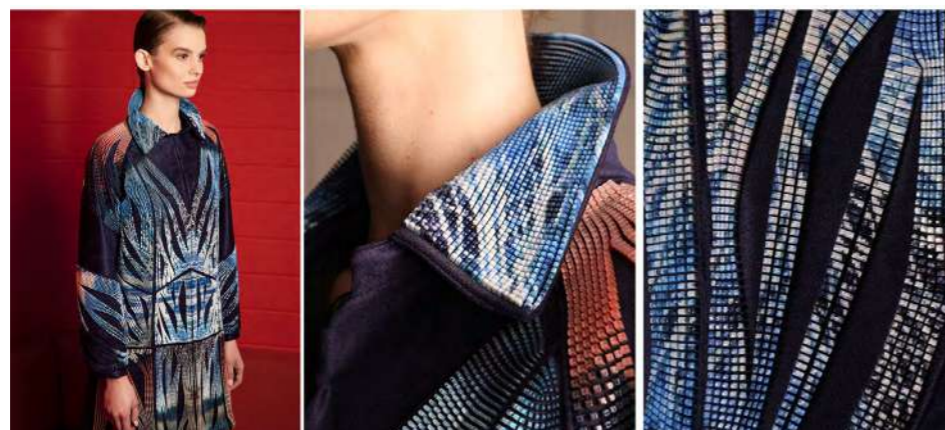
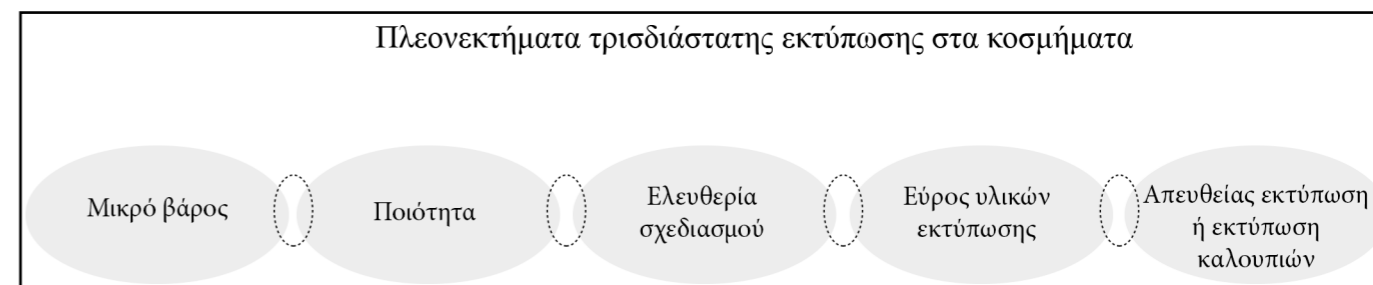
Το φόρεμα Greta Oto

Πηγή: <https://3dprintedart.stratasy.com/fashion/greta-oto-dress>

## Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΟΣΜΗΜΑΤΩΝ

Για την τρισδιάστατη εκτύπωση κοσμημάτων, τα απαραίτητα εργαλεία είναι ένα λογισμικό CAD για την δημιουργία ψηφιακών σχεδίων και ένας εκτυπωτής υψηλής ανάλυσης. Λόγω της καταλληλότητας των διαθέσιμων υλικών, τα κοσμήματα που εκτυπώνονται τρισδιάστατα έχουν γενικά υψηλότερη αποδοχή από πελάτες, σχεδιαστές και κατασκευαστές στη βιομηχανία της μόδας, σε σύγκριση με τα ρούχα. Πέρα από την ελευθερία σχεδιασμού που παρέχει η τρισδιάστατη εκτύπωση, τα κοσμήματα που δημιουργούνται μπορούν να έχουν μικρό βάρος και υψηλή ποιότητα. Ακόμα, μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας σχεδόν οποιοδήποτε υλικό. Πέρα από τις πολυμερείς ρητίνες και τα πλαστικά υλικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μέταλλα όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας και ο μπρούτζος, αλλά και πολύτιμα μέταλλα όπως το ασήμι και ο χρυσός. Επιπλέον, μπορούν να εφαρμοστούν πολλές άμεσες και έμμεσες τεχνικές. Υπάρχουν επίσης τρισδιάστατοι εκτυπωτές και σχεδιαστικά προγράμματα εξειδικευμένα στην κατασκευή κοσμημάτων, προσφέροντας στους κατασκευαστές και στους σχεδιαστές κοσμημάτων μια ευρύτερη γκάμα συστημάτων και υλικών.

Η πρόσφατη συλλογή της Ganit Goldstein “GnoMon”, όπου χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος εκτυπωτής, αντλεί την έμπνευση του ονόματός της από ένα από τα αρχαιότερα και απλούστερα επιστημονικά αστρονομικά όργανα που μετρά το μήκος των σκιών για να δείξει την ώρα, τον γνώμονα. Η νέα συλλογή εκφράζει έναν εναλλακτικό τρόπο σκέψης για κλίμακες και χρόνους στη βιομηχανία της μόδας, όπου η προσαρμογή και τα διαχρονικά κομμάτια θα μπορούσαν να είναι ένας νέος τρόπος αντιμετώπισης των ρούχων (Zeitoun, 2022).



Η συλλογή GnoMon της Ganit Goldstein, όπου κυριαρχούν τα πολύχρωμα τρισδιάστατα εκτυπωμένα υφάσματα.

Πηγή: <https://www.designboom.com/design/ganit-goldstein-gnomon-3d-printed-clothing-collection-parametric-textiles-07-29-2022/>

Οι διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να είναι άμεσες ή έμμεσες. Στην άμεση τρισδιάστατη εκτύπωση, μία πηγή ενέργειας όπως μία δέσμη laser ή ηλεκτρονίων, λιώνουν επιλεκτικά το στρώμα μεταλλικής σκόνης, κατασκευάζοντας απευθείας τα μεταλλικά μέρη. Για τη διαδικασία αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι SLM και EBM. Μία άλλη μέθοδος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, είναι ο εκτυπωτής binder jetting, ο οποίος λειτουργεί με μέταλλα ή πολυμερή.

Όσον αφορά την εκτύπωση μη μεταλλικών υλικών, συνήθως επιλέγονται μέθοδοι που βασίζονται σε ρητίνη, όπως SLA, LCD ή MSLA και DLP, λόγω της υψηλής ανάλυσης εκτύπωσης που προσφέρουν και της διαθεσιμότητας ρητινών κεριού που καίγονται πλήρως κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Η εκτόξευση υλικού (MJT) είναι ακόμα μια τεχνολογία ρητίνης, που είναι γενικά

ταχύτερη ειδικά για παραγωγή μεγάλου όγκου και παρέχει υψηλή ανάλυση. Τέλος, ορισμένοι εκτυπωτές FDM μπορούν να εκτυπώσουν νήματα κεριού. Παρόλο που είναι συνήθως πιο γρήγοροι, αδυνατούν να δημιουργήσουν κοσμήματα με υψηλή λεπτομέρεια και περιπλοκότητα, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Στην έμμεση τρισδιάστατη εκτύπωση, δημιουργούνται πρωτότυπα που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για χύτευση ή απευθείας καλούπια για χύτευση. Η μέθοδος “Investment Casting” είναι δημοφιλής στην τρισδιάστατη εκτύπωση κοσμημάτων. Συνδυάζει την τρισδιάστατη εκτύπωση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής καλουπιών. Αντί το αντικείμενο να σκαλίζεται σε σκληρό κεριό μοντελοποίησης για να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα, σχεδιάζεται σε λογισμικό σχεδίασης (CAD) και εκτυπώνεται τρισδιάστατα σε κεριό ή άλλο υλικό, όπως ρητίνη. Η εκτύπωση του χυτεύσιμου μοντέλου σε ρητίνη συνήθως επιτυγχάνεται μέσω στερεολιθογραφίας (SLA) ή ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (DLP). Στη συνέχεια, το κόσμημα ολοκληρώνεται με την παραδοσιακή διαδικασία χύτευσης (Jaeger, 2022). Η άμεση κατασκευή καλουπιών αποτελεί μία παρόμοια μέθοδο, αλλά σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ανάγκη για φυσικό πρωτότυπο (Chua et al. 2010). Η έμμεση τρισδιάστατη εκτύπωση έχει το πλεονέκτημα της παραγωγής εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας τυπικά υλικά με γνωστές ιδιότητες σε ανταγωνιστικό κόστος, ειδικά σε μεγαλύτερη ποσότητα παραγωγής (Cheah et al., 2004).



Από το 3D εκτυπωμένο καλούπι ή πρωτότυπο, στο τελικό μεταλλικό προϊόν  
Πηγή: <https://all3dp.com/2/3d-printer-for-jewelry-how-they-work-which-to-choose/>

Ορισμένοι εκτυπωτές που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιομηχανία κοσμημάτων είναι οι ExOne M-Print και M-Flex, οι οποίοι χρησιμοποιούν την τεχνολογία binder jetting για την παραγωγή των συμπαγών μεταλλικών μερών (Chua et al. 2010) και την τεχνολογία SLA που παράγει μοτίβα για χύτευση (Gebhardt 2012), ο EnvisionTEC Perfactory που παράγει ένα φυσικό κύριο μοτίβο με τεχνολογία DLP και ο εκτυπωτής Solidscap 3D, ο οποίος παράγει μοτίβα για χύτευση ή καλούπια (Yap & Yeong, 2014).

Όσον αφορά τα λογισμικά σχεδίασης, υπάρχουν ορισμένα που διατίθενται δωρεάν όπως το Tinkercad, ορισμένα εξειδικευμένα για τον σχεδιασμό κοσμημάτων όπως το 3Design, το Firestorm και το JCD, καθώς και άλλα προγράμματα γενικής χρήσης όπως το SolidWorks, Rhino & Grasshopper, Fusion 360, Maya, Modo, Blender και ZBrush.

Ο πίνακας που ακολουθεί συγκρίνει και αξιολογεί τα διαθέσιμα λογισμικά που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό κοσμημάτων.

	Οργανικό	Παραμετρικό	Εξειδικευμένο στα κοσμήματα	Εμπειρία χρήστη	Προσαρμογή	Τιμή
<b>3Design</b>	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
<b>Blender</b>	★★★★☆	★★★★☆	☆☆☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★
<b>Firestorm</b>	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
<b>Fusion 360</b>	☆☆☆☆☆	★★★★☆	☆☆☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
<b>JCD</b>	★★★★☆	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆	★★★★★	★★★★☆
<b>Maya</b>	★★★★★	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆	☆☆☆☆☆
<b>Modo</b>	★★★★☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
<b>Rhinoceros</b>	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆	★★★★☆
<b>SolidWorks</b>	☆☆☆☆☆	★★★★☆	☆☆☆☆☆	★★★★☆	★★★★☆	☆☆☆☆☆
<b>TinkerCAD</b>	☆☆☆☆☆	★★★★☆	☆☆☆☆☆	★★★★★	☆☆☆☆☆	★★★★★

Τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη σχεδίαση κοσμημάτων  
Πηγή: <https://formlabs.com/eu/blog/jewelry-design-cad-software/>



## Παραδείγματα εφαρμογής

Η τρισδιάστατη εκτύπωση εφαρμόζεται όλο και περισσότερο στα κοσμήματα, τόσο στην κατασκευή πρωτοτύπων όσο και στην παραγωγή, λόγω της διαδικασίας παραγωγής και του τελικού προϊόντος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνολογίες SLS ή Polyjet για εκτύπωση με ρητίνη και πλαστικά υλικά. Ακόμα, είναι δυνατή η τρισδιάστατη εκτύπωση με μέταλλα όπως ο ορείχαλκος, το ασήμι ή ο μπρούντζος. Ακόμα, η τρισδιάστατη εκτύπωση σε αυτή τη βιομηχανία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία καλουπιών και να συνδυαστεί με άλλες τεχνικές, όπως την τεχνική του “χαμένου κεριού”.

Η Nervous System πέρα από τα φορέματα έχει δημιουργήσει συλλογές εμπνευσμένες από τη φύση, που θα ήταν αδύνατο να δημιουργηθούν χωρίς τρισδιάστατη εκτύπωση. Οι συλλογές αποτελούνται από κοσμήματα (δαχτυλίδια, βραχιόλια και κολιέ), φωτιστικά, διακοσμητικά, αντικείμενα και αρχιτεκτονικές κατασκευές εσωτερικού και εξωτερικού χώρου.



Κοσμήματα από την nervous system. Τα κοσμήματα έχουν κατασκευαστεί είτε απευθείας με 3D εκτύπωση στο τελικό υλικό, είτε με 3D εκτύπωση σε κερί και μετά με χύτευση σε κάποιο μέταλλο.

Πηγή: [https://n-e-r-v-o-u-s.com/shop/search\\_tags.php?search=jewelry](https://n-e-r-v-o-u-s.com/shop/search_tags.php?search=jewelry)

Η Lynne MacLachlan ασχολείται επίσης με την τρισδιάστατη εκτύπωση κοσμημάτων στη Γλασκώβη της Σκωτίας. Πρόκειται για μια μηχανικό αεροδιαστημικής, η οποία έγινε σχεδιάστρια κοσμημάτων συνδυάζοντας τον ψηφιακό σχεδιασμό, την τρισδιάστατη εκτύπωση και παραδοσιακές χειροποίητες τεχνικές μεταλλουργίας και φινιρίσματος (MacLachlan, n.d.).



Πολύχρωμα τρισδιάστατα κοσμήματα από τη Lynne MacLachlan.

Πηγή: <https://lynnemacLachlan.co.uk/>

Η αρχιτέκτονας και ιδρύτρια της εταιρείας LACE, Jenny Wu, χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση για τη δημιουργία κοσμημάτων. Αναλόγως το υλικό που χρησιμοποιεί (νάιλον, ανθρακονήματα με θερμοπλαστικό υλικό (PEEK), ασήμι, ροζ χρυσό, ατσάλι), χρησιμοποιεί και την αντίστοιχη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έμμεσης ή άμεσης κατασκευής. Η διαδικασία, ανάλογα με το μέγεθος του κοσμήματος, το υλικό και τη μεταεπεξεργασία, κυμαίνεται χρονικά από ώρες μέχρι ημέρες.



LACE by Jenny Wu.

Πηγή: <https://la.racked.com/2015/6/18/8804613/lace-by-jenny-wu-3d-printed-jewelry>

Οι νεοφυείς επιχειρήσεις κοσμημάτων Gildform και Cloud Factory χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέροντας έναν οικονομικό τρόπο για οποιονδήποτε να δημιουργήσει το δικό του κόσμημα. Βοηθούν στον σχεδιασμό και παράγουν κοσμήματα χωρίς ελάχιστες παραγγελίες. Η Gildform χρησιμοποιεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο, εκτυπώνοντας ένα τρισδιάστατο κέρινο μοντέλο για χύτευση (Gildform).



Κοσμήματα δημιουργημένα από 3D εκτύπωση και χύτευση.  
Πηγή: <https://www.gildform.com/>

Η εσθονική start-up εταιρεία Cloud Factory παρέχει τη δυνατότητα τρισδιάστατης εκτύπωσης απευθείας σε ασήμι με τη μέθοδο SLM. Πρόκειται για μία οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη παραγωγή, καθώς χρησιμοποιείται 100% ανακυκλωμένη σκόνη ασημιού 925. Με αυτόν τον τρόπο η ατμοσφαιρική ρύπανση μειώνεται κατά 80%, η ρύπανση των υδάτων κατά 76% και η χρήση νερού κατά 40% δημιουργώντας μικρότερο αντίκτυπο στον πλανήτη και αποφεύγοντας τη δημιουργία απορριμμάτων στη διαδικασία παραγωγής. Επίσης, η δημιουργία κοσμημάτων γίνεται κατά παραγγελία σύμφωνα με τις απαιτήσεις των πελατών, επομένως δεν υπάρχει απόθεμα. Συνολικά, η εταιρεία λειτουργεί με 80% μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα (Cloud Factory).



3D εκτυπωμένα κοσμήματα απευθείας σε ασήμι.  
Πηγή: <https://all3dp.com/4/3d-printed-custom-silver-jewelry-becomes-an-influencer-trend/>

## Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΔΗΜΑΤΩΝ

“The world doesn’t need more shoes but it deserves innovation”.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση στα υποδήματα θα επιτρέψει τη “μαζική προσαρμογή” παρέχοντας ακρίβεια στην εφαρμογή και εξατομίκευση στον σχεδιασμό (Black, 2012). Με την τρισδιάστατη εκτύπωση η προσαρμογή μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα χωρίς επιπλέον κόστος, σε αντίθεση με τη χρήση συμβατικών τεχνολογιών (Weller et al., 2015). Επιπλέον, πέρα από τα κοινά λογισμικά 3D μοντελοποίησης, υπάρχουν εξειδικευμένα λογισμικά για τη δημιουργία εξατομικευμένων υποδημάτων όπως το RomansCAD, το iCAD3D+ ή το LutraCAD, το οποίο εξειδικεύεται στις εσωτερικές σόλες. Στον τομέα των υποδημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί οι μέθοδοι SLS, DLP, FDM, FFF και MJF. Εταιρείες όπως Zellerfeld, Adidas, Nike, Dior, New Balance, Columbia, Under Armour, Reebok, Hilos κ.ά. έχουν υποστηρίξει και ενσωματώσει αυτήν την τεχνολογία είτε στην κατασκευή πάτων ή ολόκληρου παπουτσιού.

### Παραδείγματα εφαρμογής

Το 2002, η Timberland προσέλαβε κατασκευαστές για να μετατρέψουν τα δισδιάστατα ψηφιακά σχέδια για τις σόλες των παπουτσιών της σε τρισδιάστατα πρωτότυπα από ξύλο ή αφρό. Αυτά χρειάζονταν το λιγότερο μία εβδομάδα για να δημιουργηθούν με κόστος 1.200\$ το καθένα. Επιπλέον, το δισδιάστατο σχέδιο δεν εμπεριείχε όλη την πληροφορία και αν το πρωτότυπο δεν ήταν το επιθυμητό, χρειαζόταν ακόμα μία εβδομάδα για την επανάληψη. Για τον λόγο αυτό, η Timberland επέλεξε την τρισδιάστατη εκτύπωση επενδύοντας αρχικά σε έναν έγχρωμο τρισδιάστατο εκτυπωτή ProJet CJP και το 2005 σε έναν δεύτερο εκτυπωτή CJP ProJet που παρέχει ζωντανά χρώματα 24-bit και ανάλυση 600 dpi. Οι έγχρωμοι εκτυπωτές παράγουν φυσικά μοντέλα πιο αποδοτικά από τις συμβατικές μεθόδους, έχοντας σημαντικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα και τις δαπάνες της Timberland. Με αυτήν τη μέθοδο το κόστος ανέρχεται στα 35\$ και ο χρόνος κατασκευής στα 90 λεπτά, μειώνοντας τον κύκλο παραγωγής από τρεις σε δύο εβδομάδες, ενώ η εκτύπωση γίνεται εντός της εταιρείας (Precision, 2016).



3D εκτυπωμένες σόλες της εταιρείας Timberland  
Πηγή: <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/timberland-company>

Η Adidas το 2014 επέλεξε να εκτυπώσει τρισδιάστατα την ενδιάμεση σόλα του παπουτσιού, καθώς αποτελεί το πιο κρίσιμο κομμάτι για την επίτευξη της άνεσης. Το 2017, ανακοίνωσε μια συνεργασία με την αμερικανική εταιρεία Carbon, μια καινοτόμο εταιρεία τρισδιάστατης εκτύπωσης, χρησιμοποιώντας την ειδική τεχνολογία της εταιρείας που ονομάζεται “Digital Light Synthesis” (παλαιότερα γνωστή ως CLIP), η οποία παράγει ανθεκτικά πολυμερή προϊόντα. Το αποτέλεσμα αυτής της συνεργασίας ήταν η νέα σειρά παπουτσιών περιορισμένης έκδοσης “Futurecraft 4D” με τρισδιάστατα εκτυπωμένη ενδιάμεση σόλα. Ο σχεδιασμός της ενδιάμεσης σόλας βασίστηκε σε δεδομένα από αθλητές σε όλο τον κόσμο, που αφορούσαν τα σημεία πίεσης από τη χρήση των παπουτσιών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η σύνθετη δικτυωτή δομή της ενδιάμεσης σόλας να είναι πιο πυκνή, πιο άκαμπτη ή πιο μαλακή σε ορισμένες περιοχές. Για τη δημιουργία της χρησιμοποιήθηκαν πολυουρεθάνη και φωτοσκληρυνόμενη ρητίνη, οι οποίες εκτυπώθηκαν από τον εκτυπωτή M2 της Carbon.

Εκτοτε, η Adidas χρησιμοποιεί αυτήν την ενδιάμεση σόλα και σε άλλες σειρές παπουτσιών, καθώς βελτιώνει την απόδοση στο τρέξιμο. Η τελευταία τέτοια σειρά είναι το “4DFWD runner”, το οποίο κυκλοφόρησε στα καταστήματα τον Σεπτέμβριο του 2022. Τα παπούτσια είναι κατασκευασμένα από 40% βιολογικό υλικό (adidas, 2021) εξασφαλίζοντας 23% περισσότερη αντικραδασμική προστασία (Gregurić, 2022). Χάρη στη δομή της σόλας η κατακόρυφη πίεση μετατρέπεται σε οριζόντια δύναμη, δίνοντας στους δρομείς μια διαρκή ομαλή ώθηση προς τα εμπρός (Gregurić, 2022).



Εκτυπωμένη ενδιάμεση σόλα των αθλητικών υποδημάτων adidas  
Πηγή: <https://all3dp.com/2/adidas-3d-printed-shoes/>

Ακόμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, διάφορες εταιρείες αθλητικών και καθημερινών υποδημάτων έχουν ασχοληθεί με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Η Nike έφτιαξε ένα ζευγάρι παπούτσια, τα “Superfly Flyknit”, για την Αμερικανίδα αθλήτρια Allyson Felix χρησιμοποιώντας τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης SLS. Αυτή η τεχνολογία συντομεύει τον κύκλο παραγωγής παπουτσιών από τρεις μήνες σε λίγες ώρες. Επομένως, οι αθλητές μπορούν να έχουν έγκαιρα τα ιδανικά παπούτσια. Ακολούθως, η Under Armour (McKenna, 2016) λάνσαρε ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο sneaker περιορισμένης έκδοσης που ονομάζεται “Archi-TechFuturist”. Η τρισδιάστατη εκτυπωμένη σόλα μπορεί να προσφέρει καλύτερη αντικραδασμική προστασία και πιο σταθερή στήριξη στους αθλητές. Ο Όμιλος Adidas (Burgess, 2016) λάνσαρε ένα αντίστοιχο παπούτσι με τρισδιάστατη εκτύπωση με το όνομα “3D Runner Pump”, ενώ η Reebok ανέπτυξε το “Reebok Liquid Speed”, που περιορίζεται στα 300 ζευγάρια. Πρόσφατα, οι κινεζικές καινοτόμες επωνυμίες υποδημάτων Heliot Emil x SCRY Lab παρουσίασαν στη Διεθνή Εβδομάδα Μόδας του Παρισιού το 2022 τρισδιάστατα εκτυπωμένα παπούτσια. Αντίστοιχα παπούτσια έχουν δημιουργήσει και οι κινεζικές μάρκες casual αθλητικών παπουτσιών Li Ning, Peak (SLS, DPL, FFF) και Fused Kodo (Wu et al., 2022), ενώ έχει χρησιμοποιηθεί και η τεχνολογία MJF.



Nike ([https://www.sportsbusinessjournal.com/-/media/Sporttechie/2016/05/16/3dp\\_zoom\\_superfly\\_side\\_full-1080x675](https://www.sportsbusinessjournal.com/-/media/Sporttechie/2016/05/16/3dp_zoom_superfly_side_full-1080x675))  
Under armour (<https://www.designboom.com/technology/under-armour-architech-futurist-sneaker-03-23-2017/>)  
Adidas ([https://images.stockx.com/360/adidas-3D-Runner-Black/Images/adidas-3D-Runner-Black/Lv2/img01.jpg?fm=jpg&auto=compress&w=480&dpr=2&updated\\_at=1626899711&h=320&q=60](https://images.stockx.com/360/adidas-3D-Runner-Black/Images/adidas-3D-Runner-Black/Lv2/img01.jpg?fm=jpg&auto=compress&w=480&dpr=2&updated_at=1626899711&h=320&q=60))  
Reebok ([https://3dprint.com/wp-content/uploads/2018/08/cq5dam.web\\_4-3-6-1.jpg](https://3dprint.com/wp-content/uploads/2018/08/cq5dam.web_4-3-6-1.jpg))  
Heliot Emilx SCRY Lab ([https://scccry.com/cdn/shop/files/Heliot\\_Emil\\_clp\\_F22\\_104\\_2048x2048.jpg?v=1656929026](https://scccry.com/cdn/shop/files/Heliot_Emil_clp_F22_104_2048x2048.jpg?v=1656929026))  
Li Ning (<https://www.shopnings.com/media/catalog/product/cache/8cbe5510a4b9bcd7106717f4e01bc158/a/i/ai9w6-01ur2.jpg>)  
Peak (<https://i.pinimg.com/736x/cd/87/1a/cd871a5eb69be0d05836122419b06629.jpg>)  
Fused ([https://fusedfootwear.com/cdn/shop/products/YT-tutorial-06.38\\_1024x.png?v=1670247803](https://fusedfootwear.com/cdn/shop/products/YT-tutorial-06.38_1024x.png?v=1670247803))

Η εταιρεία υποδημάτων Feetz (ΗΠΑ) σχεδίασε πλήρως τρισδιάστατα εκτυπωμένα παπούτσια από υλικό TPE που αναπνέει και έχει αντοχή στο χρόνο, τα οποία εκτυπώθηκαν με εκτυπωτή τύπου FDM- FFF (Millsaps, 2016). Είναι κατασκευασμένα από πολυμερές νήμα Flex-knit™, το οποίο είναι ανακυκλώσιμο και μπορεί να τεντωθεί κατά 700–800% και να επανέλθει χωρίς να σπάσει (Peh & Thongdee, 2018). Τα εξατομικευμένα παπούτσια φτιάχνονται σε 7 ημέρες κατά παραγγελία, στο χρώμα, μέγεθος και στυλ που θα επιλέξει ο εκάστοτε πελάτης (Kim et al., 2019), και παραδίδονται εντός δύο εβδομάδων από την ημέρα παραγγελίας (MADE DIFFERENT, 2016). Μέσω της εφαρμογής SizeMe ο πελάτης βγάζει 3 φωτογραφίες για κάθε πόδι και με αυτόν τον τρόπο η εταιρεία μπορεί να έχει 22 μετρήσεις με τις διαστάσεις του (Feetz). Τέλος, τα παπούτσια μπορούν να ανακυκλωθούν· το υλικό λιώνει για την επαναδημιουργία νέων παπουτσιών. Με τη χρήση ανακυκλώσιμων και ανακυκλωμένων υλικών το αποτύπωμα του άνθρακα μειώνεται κατά 60%, ενώ καθώς κατά την παραγωγή δεν χρησιμοποιείται νερό, εξοικονομούνται 7570.824 λίτρα νερού ανά ζευγάρι (Peh & Thongdee, 2018).



Διαδικασία παραγωγής των υποδημάτων Feetz

Πηγή: <https://www.instagram.com/feetzshoes/?hl=en>

Η Zoe (Jia-Yu) Dai από την Ταϊβάν χρησιμοποίησε τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή υποδημάτων στην πτυχιακή της στο London College of Fashion, τον Δεκέμβριο του 2014. Η συλλογή με το όνομα “breaking the mould” αποτελείται από οργανικές δομές και συνδυάζει τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής υποδημάτων με την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αφού έγιναν οι μετρήσεις του ποδιού με 3D Scanner, δημιουργήθηκε εξατομικευμένο καλαπόδι για τη δημιουργία των παραδοσιακών μερών του παπουτσιού σε δέρμα. Στη συνέχεια ο πάτος και το τακούνι του παπουτσιού σχεδιάστηκαν σε τρισδιάστατο λογισμικό και εκτυπώθηκαν για τη δημιουργία πρωτοτύπων και πειραματισμού σε ABS και PLA με εκτυπωτή FDM. Για τη δημιουργία του τελικού προϊόντος, χρησιμοποιήθηκε εκτυπωτής EOS

(Electro Optical Systems) που χρησιμοποιεί την τεχνολογία SLS και σκόνη νάιλον ως υλικό εκτύπωσης, λόγω καλύτερου φινιρίσματος. Το τακούνι γυαλίστηκε, βάφτηκε με λευκό σπρέι και συνδέθηκε με το δερμάτινο μέρος του παπουτσιού.



3D εκτυπωμένα παπούτσια της Zoe Dai

Πηγή: <https://3dprint.com/wp-content/uploads/2015/04/breakingfeatured.jpg>

Η Annie Foo είναι μια σχεδιάστρια που χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση σε συνδυασμό με συμβατικές μεθόδους κατασκευής καινοτόμων υποδημάτων. Αρχικά, γίνεται τρισδιάστατη σάρωση του ποδιού ή του παπουτσιού και ακολουθεί τρισδιάστατη σχεδίαση γύρω από το μοντέλο σε εικονική πραγματικότητα (VR) χρησιμοποιώντας λογισμικό Gravity Sketch. Έπειτα, τα σχέδια εξάγονται στο Oculus Medium για τη βελτίωση των λεπτομερειών και ακολούθως, στο Rhino 3D πριν σταλούν για εκτύπωση. Τα τελευταία παπούτσια που δημιούργησε για πασαρέλα εκτυπώθηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή HP Jet Fusion 4200 (SLS), χρησιμοποιώντας PA12 Nylon (Carlota, 2019).



Φουτουριστικά 3D εκτυπωμένα παπούτσια της Annie Foo

Πηγή: <https://www.3dnatives.com/en/annie-foo-3d-printed-shoes-190720194/>

---

## Ο Αντίκτυπος της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στο Περιβάλλον

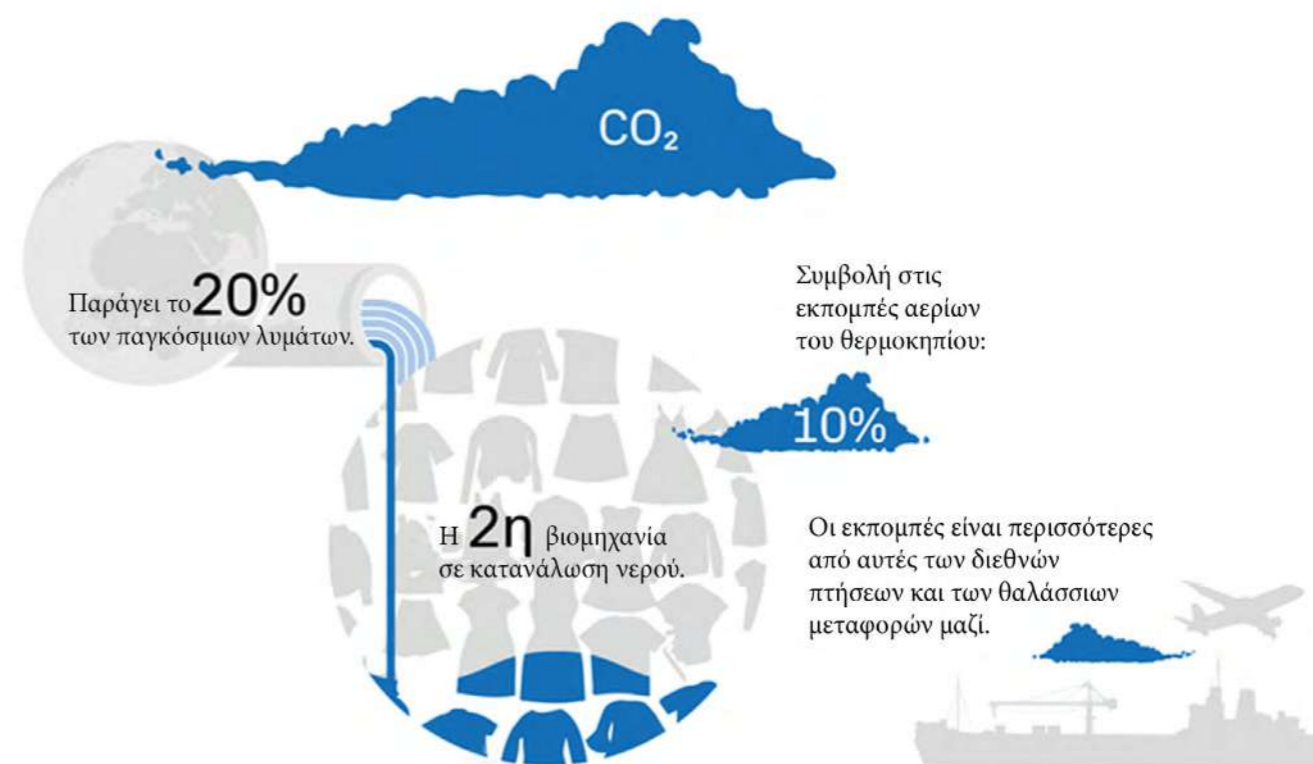
---

“Η τρισδιάστατη εκτύπωση παράγει λιγότερα απόβλητα κατά την κατασκευή σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μηχανήματα, συμβάλλοντας σε μια πιο πράσινη, πιο βιώσιμη τεχνολογία” (Janssen et al., 2014).

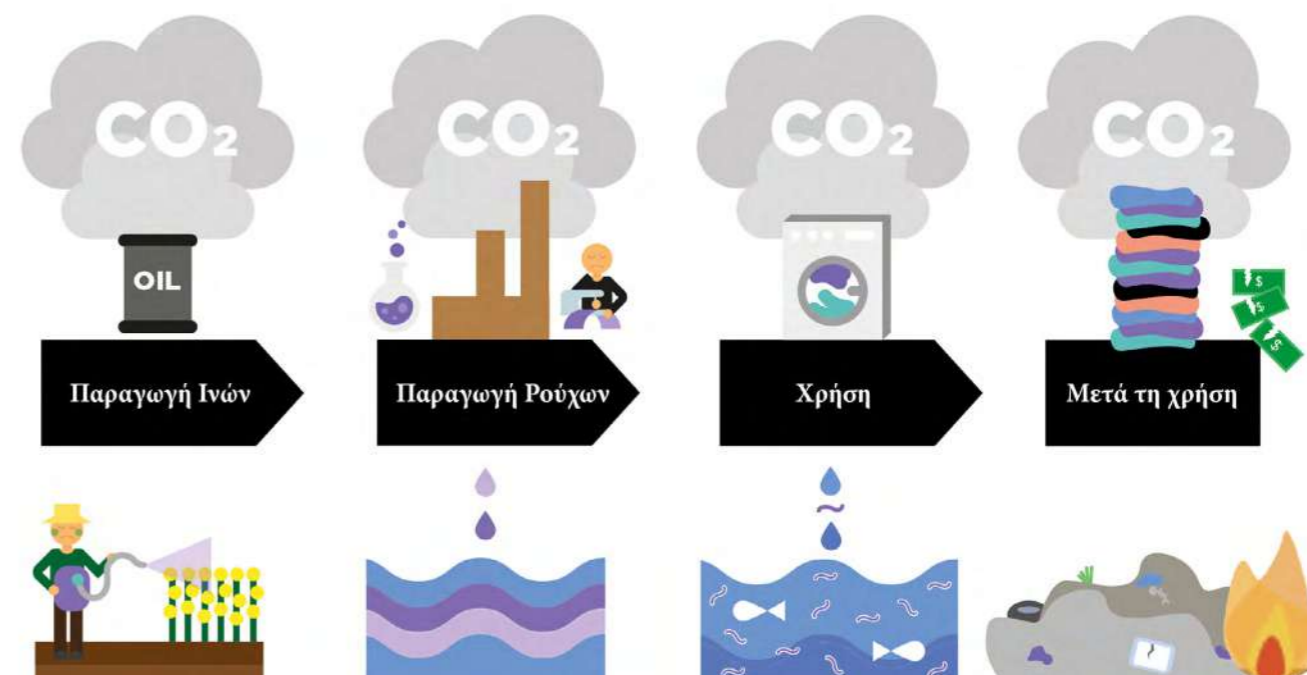
Το τέταρτο κεφάλαιο διερευνά την επίδραση που έχει η τρισδιάστατη εκτύπωση στο περιβάλλον και πώς η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία της μόδας θα μπορούσε να προσεγγίσει μία zero-waste φιλοσοφία.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τις αφαιρετικές μεθόδους παραγωγής προκύπτουν πολλά απόβλητα από το χρησιμοποιούμενο υλικό. Παρόλο που μπορεί να ανακυκλωθούν, απαιτείται ένα πρόσθετο βήμα επεξεργασίας, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου. Η τρισδιάστατη εκτύπωση αντιπροσωπεύει μια σχετικά νέα τεχνολογία κατασκευής που σχετίζεται με τη βιωσιμότητα (Gebler et al. 2014). Εκτός από τις περιπτώσεις όπου απαιτούνται στηρίγματα κατά την κατασκευή, τα οποία στην συνέχεια απορρίπτονται<sup>9</sup>, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μόνο τα υλικά που απαιτούνται για τη δημιουργία του αντικειμένου (Reeves, 2009). Το περιβαλλοντικό της πλεονέκτημα έγκειται στο εξής: πέρα από το ότι μειώνει στο ελάχιστο τα απόβλητα κατά την κατασκευή, βελτιστοποιεί τη γεωμετρία και δημιουργεί ελαφρά εξαρτήματα με μικρότερη κατανάλωση υλικού. Το μεγαλύτερο μέρος του αχρησιμοποίητου υλικού στις διάφορες διεργασίες, όπως στην κατασκευή με βάση τη σκόνη ή ένα υγρό φωτοπολυμερές, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί άμεσα ή να ανακυκλωθεί. Πιο συγκεκριμένα, για τις σκόνες μετάλλων υπολογίζεται ότι το 95-98% μπορεί να ανακυκλωθεί (Petrovic et al., 2011). Τα απόβλητα που παράγονται από την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι κατά μέσο όρο 70-90% λιγότερα από τα απόβλητα που παράγονται από αφαιρετικές μεθόδους παραγωγής (Worth, 2022).

Στοιχεία της βιομηχανίας της μόδας



Πηγή: [https://www.3dnatives.com/en/wp-content/uploads/sites/2/environment\\_cover2.jpg](https://www.3dnatives.com/en/wp-content/uploads/sites/2/environment_cover2.jpg)



Πηγές: <https://createfashionbrand.com/carbon-footprint/>  
<https://www.credit-suisse.com/about-us-news/en/articles/news-and-expertise/sustainable-fashion-your-personal-consumer-footprint-202201.html>

<sup>9</sup> Γίνεται έρευνα για πιθανές επαναχρησιμοποιήσιμες λύσεις υποστήριξης, οι οποίες θα μπορούσαν να μειώσουν τη χρήση υλικού κατά περίπου 35% (Worth, 2022).

Όσον αφορά τη διαδικασία σχεδιασμού στη βιομηχανία της μόδας, οι σχεδιαστές συνήθως ξεκινούν τη φάση της κατασκευής 6 με 12 μήνες πριν το προϊόν κυκλοφορήσει στην αγορά. Εκείνη την περίοδο γίνεται έρευνα πρώτων υλών συγκεντρώνοντας δείγματα από προμηθευτές, πολλά από τα οποία καταλήγουν στον χώρο υγειονομικής ταφής στο τέλος της σεζόν. Η ρύπανση από ύφασμα κατά την κατασκευή των ρούχων είναι ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα. Με τη νέα τεχνολογία, πολλές από τις δοκιμές και τα σφάλματα του σχεδιασμού του προϊόντος μπορούν να πραγματοποιηθούν ψηφιακά πριν από την παραγωγή του πρώτου μοντέλου με τρισδιάστατη εκτύπωση.

Ακόμα, η σχεδόν αποκλειστική χρήση μηχανημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης, σε αντίθεση με την πληθώρα μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται μέχρις ώρας, θα μπορούσε να μειώσει δραστικά το κόστος και να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο η βιομηχανία κατασκευάζει ρούχα (Sun & Lu, 2015). Αν ο σχεδιαστής διαθέτει τρισδιάστατο εκτυπωτή, η όλη διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί στο ατελιέ του. Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται τόσο κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής, όσο και κατά τη μεταφορά και το απόθεμα, λόγω της ικανότητας της επιτόπου δημιουργίας κατά παραγγελία. Ως αποτέλεσμα, οι σχεδιαστές εξοικονομούν χρήματα από τη συσκευασία και το περιβάλλον γλιτώνει από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα των εμπορευματικών οχημάτων.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει ήδη αποδειχθεί ότι είναι ένας οικονομικά αποδοτικός τρόπος για τη σχεδίαση και τη δημιουργία πρωτοτύπων με απεριόριστες δυνατότητες. Από την άποψη της βιωσιμότητας, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει επίσης τη δυνατότητα να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των προϊόντων μόδας. Η τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα εκτύπωσης αξεσουάρ ρούχων, κουμπιών για αντικατάσταση ή πρόσθετου πάτου υποδημάτων. Με αυτόν τον τρόπο μέσα σε λίγα λεπτά υπάρχοντα προϊόντα μόδας ανανεώνονται με την προσθήκη νέων διακοσμητικών στοιχείων ή επισκευάζονται αντικαθιστώντας κατεστραμμένα ή εκλείποντα μέρη από ευέλικτα υλικά, όπως το TPU.

Παράδειγμα αυτής της προσέγγισης αποτελεί και το πολυλειτουργικό φόρεμα Microspace Transmorpho. Ο μεταμορφωτικός σχεδιασμός του φορέματος επιτρέπει ευελιξία στην αισθητική και τις λειτουργίες του φορέματος, παρέχοντας στους χρήστες ευκαιρίες να σχεδιάσουν το μικρο- και μακρο-περιβάλλον τους. Έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να λειτουργεί ως μακρύ ή κοντό φόρεμα, με διαφορετική σιλουέτα και υφή ανάλογα με το μήκος (Koo & Zarate, 2015) και να επεκτείνει τον κύκλο ζωής του. Για τη δημιουργία χρησιμοποιήθηκαν ύφασμα, θερμοπλαστικά υλικά τα οποία εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα, και ακρυλικά τα οποία κόπηκαν με λέιζερ. Είναι επομένως φανερό, πως μπορούν να δημιουργηθούν προϊόντα με αυξημένη αισθητική αξία, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής των υπαρχόντων.



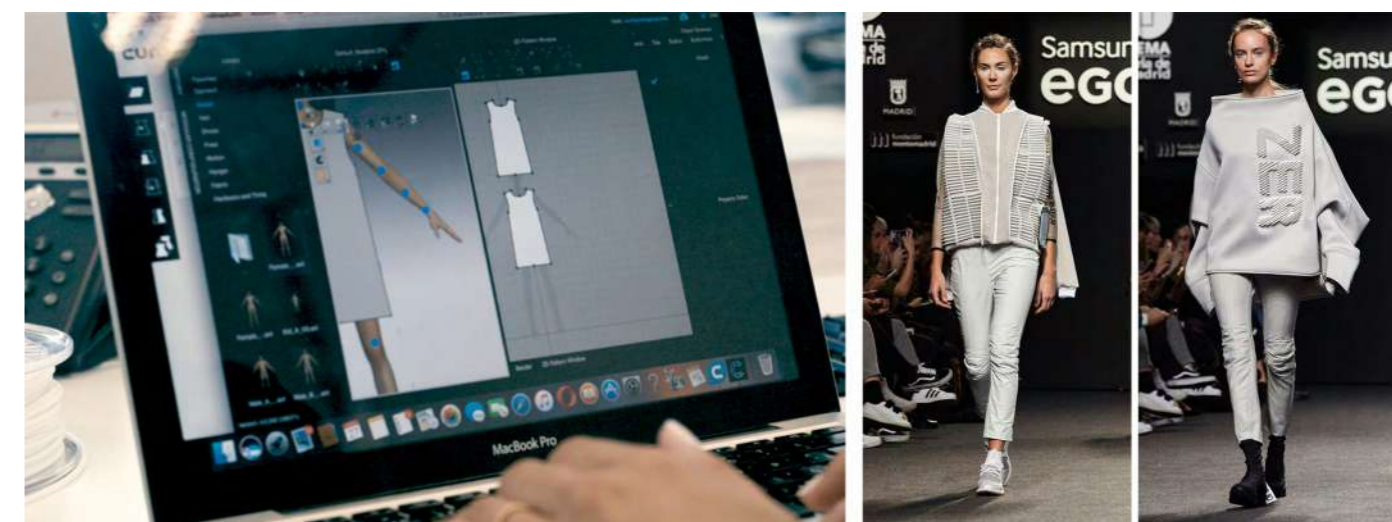
Το πολυλειτουργικό φόρεμα Microspace Transmorpho το οποίο μπορεί να μετατρέπεται από μακρύ σε κοντό όταν το στρίψωμα συνδέεται με τη λαϊμόκοψη.

Πηγή: [https://cdn.ymaws.com/itaaonline.org/resource/resmgr/publications/itaa\\_2015\\_design\\_catalog.pdf](https://cdn.ymaws.com/itaaonline.org/resource/resmgr/publications/itaa_2015_design_catalog.pdf)

Πανωφόρι με εξατομικευμένα εκτυπωμένα κουμπιά MINESOTA.

Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/329341148\\_Exploration\\_of\\_3D\\_printing\\_to\\_create\\_zero-waste\\_sustainable\\_fashion\\_notions\\_and\\_jewelry](https://www.researchgate.net/publication/329341148_Exploration_of_3D_printing_to_create_zero-waste_sustainable_fashion_notions_and_jewelry)

Καθώς όλο και περισσότεροι σχεδιαστές και επωνυμίες αρχίζουν να αναζητούν βιώσιμες μεθόδους για τη δημιουργία των καθημερινών συλλογών τους, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης αποκτά μεγαλύτερη δημοτικότητα στον κόσμο της μόδας. Σε αυτή την καινοτομία βασίστηκε η ισπανική εταιρεία μόδας ZER. Η ZER βασισμένη στον τρισδιάστατο σχεδιασμό και εκτύπωση ενδυμάτων, χρησιμοποιεί μόνο την απαιτούμενη ποσότητα υλικών, μειώνοντας στο ελάχιστο τη σπατάλη.

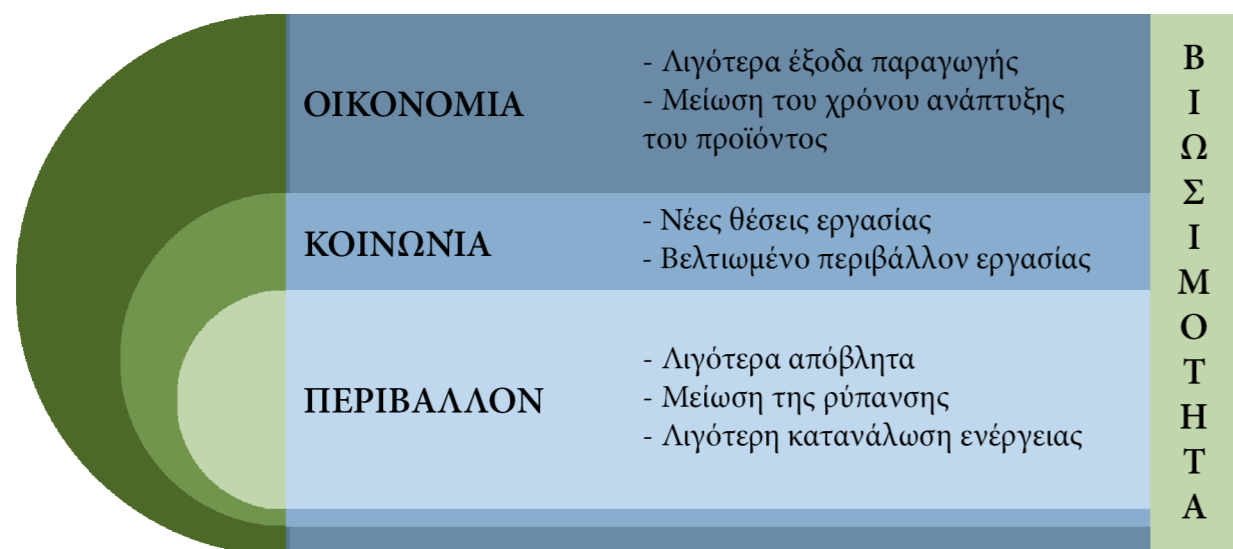


Από τον σχεδιασμό στην υλοποίηση: 3D προσέγγιση από την εταιρεία ZER

Πηγή: <https://www.bcn3d.com/sustainability-in-fashion-through-3d-printing/>

Το Zero-Waste είναι μια φιλοσοφία που επικεντρώνεται στον “σχεδιασμό και διαχείριση προϊόντων και διαδικασιών για τη συστηματική αποφυγή και εξάλειψη του όγκου και της τοξικότητας των αποβλήτων και των υλικών, τη διατήρηση και ανάκτηση όλων των πόρων και όχι την καύση ή θάψιμο τους” (“Zero-waste International Alliance”, 2009). Αν και η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένα βιώσιμο μέσο παραγωγής, η ηθική ευθύνη και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη (Gebler et al., 2014). Οι αναθυμιάσεις και ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία μιας εκτύπωσης μπορεί να επιβαρύνουν το περιβάλλον, αλλά σε πολύ μικρότερη κλίμακα συγκριτικά με την αφαιρετική κατασκευή.

Για την κατασκευή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων και υφασμάτων απαιτείται άφθονο νερό, ενώ σημαντικό ζήτημα σε κολοσσούς παραγωγής υφασμάτων, όπως η Κίνα, αποτελεί και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αντιμετωπίσει πολλά από αυτά τα ζητήματα. Μελλοντικά, καθώς οι τεχνολογίες και τα υλικά της τρισδιάστατης εκτύπωσης βελτιστοποιούνται, οι πόροι μπορούν να μειωθούν ακόμη περισσότερο ξεπερνώντας τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής (Νικολαΐδης, 2018). Επομένως, η τρισδιάστατη τεχνολογία στη βιομηχανία της μόδας μπορεί να συμβάλει στον σχεδιασμό και τη δημιουργία zero-waste προϊόντων που είναι μοναδικά, βιώσιμα και παράγονται κατόπιν ζήτησης (Pasricha & Greeninger, 2018).





“3D printing has the potential to revolutionise the way that we make almost everything,” (Barack Obama, 2013)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, παρόλο που είναι ακόμα στα σπάργανα, είναι μια πρωτοποριακή τεχνολογία έτοιμη να αλλάξει τη δημιουργία και την παραγωγή στη βιομηχανία της μόδας. Το τέταρτο κεφάλαιο συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις που συνοδεύουν τη διαδικασία παραγωγής προϊόντων μόδας με τρισδιάστατη εκτύπωση, προτείνοντας παράλληλα μέτρα για την αντιστάθμιση αυτών των περιορισμών.

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει στους σχεδιαστές να καινοτομούν γρηγορότερα παρέχοντας μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού για τη δημιουργία περίπλοκων και πολύπλοκων σχεδίων (Melnikova et al., 2014) με μεγάλη λεπτομέρεια (Grothe et al., 2020), τα οποία είναι δύσκολο να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι βασίζεται στην ψηφιακή σχεδίαση (CAD). Η χρήση του υπολογιστή συνεπάγεται μεγαλύτερη ταχύτητα και ευκολία, αλλά και περαιτέρω αύξηση της δημιουργικότητας (Shin et al. 2016) χωρίς να επηρεάζεται το κόστος κατασκευής. Ακόμα, η δυνατότητα των σχεδιαστών να σαρώνουν τρισδιάστατα ένα σώμα αποτυπώνοντας με ακρίβεια τις διαστάσεις ενός ατόμου ή μετρώντας χειροκίνητα και εισάγοντας τα δεδομένα σε ένα πρόγραμμα CAD, θα μπορούσε να οδηγήσει στην εξάλειψη της δημιουργίας δειγμάτων. Ακολούθως, ο σχεδιασμός θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί τρισδιάστατα στο εικονικό περίγραμμα του σώματος ή δισδιάστατα στο παραμετροποιημένο ψηφιακό πατρόν. Προσαρμοσμένα ενδύματα, υποδήματα ή αξεσουάρ μπορούν να δημιουργούνται και να εκτυπώνονται έχοντας ακριβή εφαρμογή. Επιπλέον, με τη χρήση λογισμικού και παραμετροποίησης το προϊόν έχει την δυνατότητα να τροποποιείται εύκολα, σύμφωνα με τις ανάγκες του σχεδιαστή ή του εκάστοτε πελάτη. Κατά τον σχεδιασμό εξατομικευμένων προϊόντων, ο σχεδιαστής θα δημιουργεί ένα ψηφιακό τροποποιήσιμο πρωτότυπο, το οποίο θα επεξεργάζεται δεδομένα και θα εξάγει την αντίστοιχη γεωμετρία (Tan et al., 2020), η οποία θα ανταποκρίνεται άμεσα στις απαιτήσεις του πελάτη (Aheleoff et al., 2021). Με αυτήν την τεχνολογία είναι εφικτή η ταχεία επανάληψη και η κατασκευή εύκαμπτων αντικειμένων με βάση άκαμπτο υλικό.

Το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι χαμηλότερο από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής λόγω της απουσίας ποικίλων δαπανηρών μηχανημάτων και εργαλείων (Petrovic et al., 2011), καθιστώντας τη μέθοδο αυτή κατάλληλη για μικρές παραγωγές και γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων. Η εξάλειψη των εργαλείων μειώνει, επίσης, τους χρόνους παράδοσης και το κόστος στα πρώτα στάδια της δημιουργίας προϊόντων, συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με τη ροή χρημάτων. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή κατασκευή, χρησιμοποιείται η απαιτούμενη πρώτη ύλη, χωρίς να γίνεται σπατάλη υλικού και επομένως αποφεύγεται η παραγωγή απορριμμάτων (Sun & Lu, 2015). Επιπλέον, ο κύκλος κατασκευής ενδυμάτων είναι μικρότερος, μειώνοντας το κόστος εργασίας και το απαιτούμενο ανθρώπινο δυναμικό, ενώ ταυτόχρονα το περιστασιακό ανθρώπινο λάθος εξαλείφεται από τη διαδικασία κατασκευής. Επίσης, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα.

Συγκριτικά με πιο παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής, η παραγωγή δεν εξαρτάται από

εξωτερικές αλυσίδες εφοδιασμού. Διαδικασίες όπως η απογραφή, η αποθήκευση, η συσκευασία και η μεταφορά που απαιτούνται για την παραδοσιακή κατασκευή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, εξαλείφονται (Sprahiu et al., 2020). Η μείωση του μήκους της αλυσίδας κατασκευής μπορεί να παρέχει κάποια αντιστάθμιση για το πρόβλημα της τρέχουσας χαμηλής ταχύτητας των εμπορικών τρισδιάστατων εκτυπωτών. Για παράδειγμα, όταν ένα ρούχο δημιουργείται εξολοκλήρου από τρισδιάστατη εκτύπωση, διεργασίες όπως η προετοιμασία των ινών, η ύφανση, η βαφή, το φινίρισμα, η κοπή και το ράψιμο εξαλείφονται. Συνεπώς, ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της ιδέας και του προϊόντος ελαχιστοποιείται (Partsch et al., 2015).

Τέλος, όσον αφορά τα υλικά κατασκευής, η χρήση αυτής της τεχνολογίας δίνει τη δυνατότητα εκτύπωσης προϊόντων από ειδικά προσαρμοσμένα υλικά με επιθυμητές ιδιότητες. Έτσι, για παράδειγμα, μπορούν να δημιουργηθούν προϊόντα με υψηλή αντοχή στη θερμότητα, υδατοαπωθητικά ή με υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

## ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Αν και η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει πολλά πλεονεκτήματα, καμία τεχνολογία ή πρόοδος δεν έρχεται χωρίς τους περιορισμούς της. Λόγω των υλικών που χρησιμοποιεί, διατηρεί άκαμπτα και στατικά μέρη. Επί του παρόντος, τα πλήρως εκτυπωμένα τρισδιάστατα υφάσματα αποτυγχάνουν να προσφέρουν την άνεση και την ευελιξία του παραδοσιακού ενδύματος και δεν αναπνέουν. Οι δυσκολίες σχετικά με το ιξώδες (Sprahiu et al., 2020), όπως λόγου χάρη η ανεπαρκής ευελιξία, άνεση και αντοχή, καθώς και η έλλειψη απαλότητας, ελαστικότητας, υδατοπερατότητας και ελέγχου θερμότητας, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υφάσματα αποτελούν μια αρκετά μεγάλη πρόκληση (Mrofu et al., 2020).

Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας των τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι το μέγεθος της πλατφόρμας εκτύπωσης, καθώς περιορίζει το μέγεθος και το πλήθος των εξαρτημάτων που μπορούν να παραχθούν σε μία επανάληψη. Αυτό έχει ως συνέπεια να χρειάζεται να γίνει τμηματοποίηση του προς εκτύπωση σχεδίου σε διαφορετικά κομμάτια (Yap & Yeong, 2014), τα οποία στη συνέχεια χρειάζονται συναρμολόγηση ή δημιουργία αρθρώσεων.

Η ταχύτητα εκτύπωσης θεωρείται χαμηλή σε σύγκριση με την συμβατική κατασκευή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Ο χρόνος εκτύπωσης και τα στοιχεία που τον καθορίζουν, η ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιείται και η τυχόν μεταγενέστερη επεξεργασία, επηρεάζουν

άμεσα το κόστος του παραγόμενου προϊόντος. Οι παραδοσιακές μέθοδοι παραγωγής είναι οικονομικότερες για μεγαλύτερες σειρές παραγωγής, καθώς όσο μεγαλύτερη γίνεται η παραγωγή τόσο μειώνεται το κόστος ανά μονάδα. Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι, όταν ένα προϊόν μπορεί να κατασκευαστεί τόσο με αφαιρετικές μεθόδους ή χύτευση, όσο και με τρισδιάστατη εκτύπωση, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι λιγότερο αποδοτική άνω των 100 τεμαχίων. Η παραγωγή περιορισμένων τεμαχίων μπορεί να είναι δυνατή, αλλά για μαζική παραγωγή χρειάζεται να εντοπιστούν τα υλικά που θα κάνουν τη διαδικασία εμπορικά βιώσιμη (Abdullah, 2019).

Καθώς η όλη ιδέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτεί λιγότερο εργατικό δυναμικό, η αντικατάσταση της ανθρώπινης εργασίας με μηχανές θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια θέσεων εργασίας σε ορισμένα μέρη του κόσμου.

Όσον αφορά την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, αυτή επηρεάζεται από τον τύπο του μηχανήματος, τη διαδικασία και το υλικό που χρησιμοποιείται. Ενώ ορισμένα μέρη, όπως αυτά που κατασκευάζονται από μέταλλο, έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, πολλά τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα είναι πιο εύθραυστα. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαστρωματική κατασκευή μειώνει την αντοχή κατά 10- 50% .

Ένα ακόμα μείζον ζήτημα είναι ο ποιοτικός έλεγχος, στις περιπτώσεις που οι πελάτες πρόκειται να εκτυπώσουν τα προσωπικά τους αντικείμενα. Οι μεγάλες επωνυμίες ξοδεύουν εκατομμύρια για την διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος και κατ' επέκταση την εικόνα της επωνυμίας της εταιρείας. Επομένως, η διαχείριση και ο έλεγχος του τελικού προϊόντος θα μπορούσε να αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για τις εταιρείες.

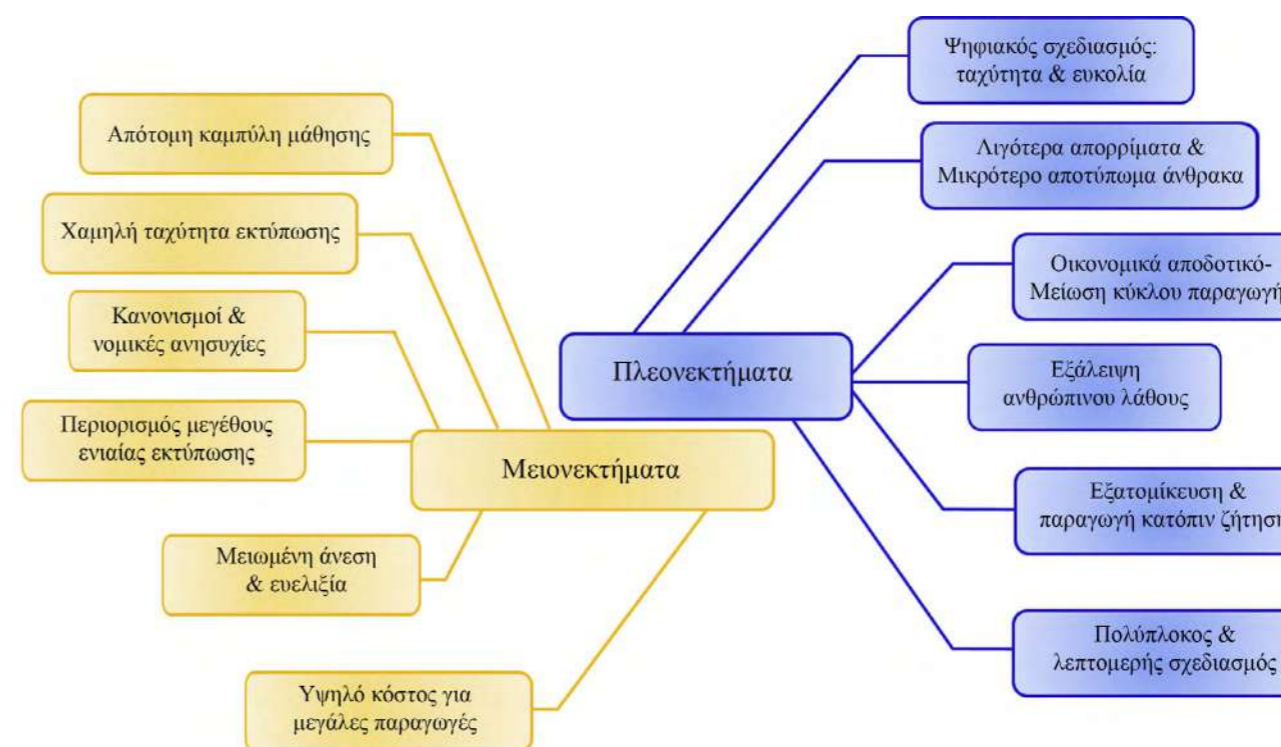
Πρόκληση αποτελούν και τα πνευματικά δικαιώματα. Όπως με την πειρατεία μουσικής και ταινιών, η πειρατεία ψηφιακών σχεδίων μπορεί να επηρεάσει αντιστοίχως τη βιομηχανία της μόδας. Η παράνομη χρήση τους μπορεί να βλάψει τον αρχικό δημιουργό του σχεδίου, ενώ η αυθεντικότητα θεωρείται ως μείζον ζήτημα που θα μπορούσε να επηρεάσει τους καταναλωτές.

Οι κορυφαίες επωνυμίες μόδας βασίζονται επί του παρόντος στην παραγωγή χειροποίητων προϊόντων υψηλής ποιότητας και υψηλής τιμής. Πολλές από τις επωνυμίες απέχουν από τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς ανησυχούν ότι τα σχέδιά τους θα μπορούν να αντιγραφούν εύκολα με υψηλής ποιότητας οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές, παραβιάζοντας με αυτόν τον τρόπο την πνευματική ιδιοκτησία των σχεδίων τους (Bradshaw et al. 2010 ). Ωστόσο, ένας μικρός αριθμός σχεδιαστών επιλέγει να αναλάβει το ρίσκο με αντάλλαγμα μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού για να ξεπεράσει τα όρια των προϊόντων μόδας. Επιλέγουν να αγκαλιάσουν αυτήν τη νέα τεχνολογία και να αναπτύξουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα, για να αντιμετωπίσουν τα ζητήματα πνευματικών δικαιωμάτων στην τρισδιάστατη εκτύπωση (Yap & Yeong, 2014).

Τέλος, αν και οι σχεδιαστές ενδυμάτων και μόδας είναι εξοικειωμένοι στη χρήση δύο και

τριών διαστάσεων με τις τεχνικές που χρησιμοποιούν (πατρόν, moulage, εφαρμογή στο σώμα), δεν σημαίνει απαραίτητα ότι μπορούν να προσαρμοστούν άμεσα στη χρήση της τρισδιάστατης τεχνολογίας (Sun & Lu, 2015). Αν και ορισμένοι σχεδιαστές είναι εξοικειωμένοι με αυτό το είδος τεχνολογίας, οι περισσότεροι αντιμετωπίζουν μια απότομη καμπύλη μάθησης, όταν υιοθετούν την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Συνοψίζοντας, τα κύρια εμπόδια στην εφαρμογή της τεχνολογίας είναι οι περιορισμοί μεγέθους, ο χρόνος παραγωγής, το κόστος, οι κανονισμοί και οι νομικές ανησυχίες. Παρά τους



περιορισμούς που υφίσταται, η τρισδιάστατη εκτύπωση στη βιομηχανία της μόδας δημιουργεί νέες ευκαιρίες και εξακολουθεί να είναι μια πολλά υποσχόμενη πρόταση για το μέλλον. Οι σχεδιαστές επενδύουν στην εκμάθηση της τρισδιάστατης τεχνολογίας, ώστε να είναι σε θέση να δημιουργήσουν πολύπλοκα, βιώσιμα και εξατομικευμένα τρισδιάστατα προϊόντα μόδας (κοσμήματα, αξεσουάρ, υποδήματα, ρούχα) εύκολα και αποδοτικά.

---

## Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

---

“In order to be irreplaceable,  
one must always be different”.

(Coco Chanel)

Το τελευταίο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής έρευνας εμπεριέχει τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από την έρευνα σφαιρικά. Γίνεται μία συνολική κριτική αξιολόγηση των επιτευγμάτων και των προοπτικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης και αναφέρεται το πώς αναμένεται να επηρεάσει το μέλλον της μόδας.

Οι τρισδιάστατες τεχνολογικές εξελίξεις παρέχουν ευκαιρίες για καινοτομία στη βιομηχανία της μόδας, συμβάλλοντας σταδιακά στην απλοποίηση της συνολικής διαδικασίας σχεδιασμού. Σήμερα, τα υλικά και οι τεχνολογίες που τροφοδοτούν την τρισδιάστατη εκτύπωση εξακολουθούν να επηρεάζουν τον σχεδιασμό, αλλά λόγω του ενδιαφέροντος που υπάρχει, συνεχώς βελτιστοποιούνται και οι περιορισμοί τους μειώνονται. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται ταχέως, είναι σημαντική η συνεχής ενημέρωση για τους περιορισμούς και τις νέες δυνατότητες κατά τη διερεύνηση αυτής της τεχνολογίας.

Οι τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα μπορούσαν να προσφέρουν την προοπτική λιγότερο δαπανηρών αλλά πιο εξατομικευμένων προϊόντων. Παρόλο που η τεχνολογία έχει προχωρήσει αρκετά από τότε που πρωτοεμφανίστηκε στη μόδα, χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση σε παραμέτρους όπως η ευελιξία, η άνεση, τα υλικά, το φινίρισμα, η ανθεκτικότητα και το κόστος κατασκευής. Μεταξύ των προκλήσεων βρίσκεται η κατασκευή ολοκληρωμένων τρισδιάστατων ενδυμάτων που απαιτεί πολύ χρόνο για εκτύπωση, ενώ παράλληλα τα εκτυπωμένα ρούχα δεν είναι ικανά να προσφέρουν την ευελιξία των παραδοσιακών υφασμάτων εξαιτίας της ανεπαρκούς ευκαμψίας τους. Η βασική πρόκληση της χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων είναι η παροχή παρόμοιων -αν όχι καλύτερων- χαρακτηριστικών συγκριτικά με τα συμβατικά υφάσματα. Τα μικρότερα αντικείμενα είναι διαφορετική υπόθεση και οι δυνατότητες εκεί είναι μεγάλες. Όσον αφορά τα υλικά, παρόλο που διατίθεται μεγάλη ποικιλία πολυμερών, κεραμικών, μετάλλων και σύνθετων υλικών, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη υλικών με κατάλληλες ιδιότητες για δημιουργία ενδυμάτων. Θα πρέπει να αναπτυχθούν υλικά που να έχουν επαρκή ευελιξία για να εκφράζουν τις καμπύλες και την κίνηση του ανθρώπινου σώματος, έχοντας ταυτόχρονα επαρκή υγροσκοπικότητα και δυνατότητα αναπνοής. Μια άλλη μεγάλη πρόκληση είναι η ανάπτυξη εξειδικευμένων τρισδιάστατων εκτυπωτών που είναι κατάλληλοι για ενδύματα και υφάσματα.

Επιπλέον, οι σημαντικές αλλαγές στο μοτίβο του εργατικού δυναμικού, καθώς και τα κίνητρα που θα παρακινούν και θα διευκολύνουν την δημιουργία επενδύσεων είναι μερικοί κρίσιμοι παράγοντες που πρέπει ακόμη να αντιμετωπιστούν (Ghobakhloo, 2020). Η τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να εξαλείψει την ανάγκη για εκτεταμένη διαδικασία παραγωγής, αλλάζοντας εντελώς τη βιομηχανία της μόδας.

Οι τεχνολογίες εξοικονόμησης χρόνου και κόστους είναι απαιτήσεις του σημερινού κόσμου για τη διασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης. Η βιωσιμότητα που απασχολεί σήμερα όσο ποτέ την κοινωνία είναι πολύ στενά συνδεδεμένη με την τρισδιάστατη τεχνολογία. Δεδομένου ότι η αλυσίδα εφοδιασμού αναμένεται να είναι μικρότερη από την υπάρχουσα, θα εξαρτάται λιγότερο από τις μεταφορές. Η μειωμένη χρήση ενέργειας, η περιορισμένη ζήτηση για πόρους και οι σχετικές μειώσεις στις εκπομπές CO<sub>2</sub> θα μπορούσαν να συμβάλουν στη μείωση της

περιβαλλοντικής επιβάρυνσης στη διαδικασία κατασκευής ρούχων και στην ύπαρξη μίας πιο τοπικής, ψηφιακής αλυσίδας παραγωγής (Gebler et al., 2014). Στην προσπάθεια αυτή, θα μπορούσε να ωφελήσει και η χρήση νημάτων από ανακυκλωμένα υλικά, τα οποία θα εκτυπωθούν στη συνέχεια σε προϊόντα ένδυσης. Με την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι δυνατή η εξάλειψη του 40% των απορριμμάτων που βασίζονται σε πρώτες ύλες και η επίτευξη έως και 95%–98% επαναχρησιμοποίησης υλικών (Petrovic et al., 2011). Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα, στο οποίο μπορεί να συμβάλει η τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι η μείωση της κατανάλωσης του γλυκού νερού. Επιπρόσθετα, η δημιουργία νέων υλικών και η χρήση πλαστικού με πιο υπεύθυνο τρόπο είναι νέοι λόγοι για τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης από εταιρείες μόδας.

Η εκτύπωση τρισδιάστατων στοιχείων σε συμβατικά υφάσματα μπορεί να συντελέσει στη βελτίωση των ήδη υπάρχοντων υφασμάτων δημιουργώντας καινοτόμα και λειτουργικά προϊόντα. Στην περίπτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης απευθείας σε ύφασμα ή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σύνθετων πολλαπλών υλικών, η πρόσφυση μεταξύ των πολυμερών εκτύπωσης και των υφασμάτων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Για τον λόγο αυτό, η πρόσφυση μπορεί να ενισχυθεί με προεπεξεργασία των υφασμάτων, εφαρμόζοντας διαφορετικές επικαλύψεις πολυμερών ή τροποποιώντας την επιφάνεια της ίνας με μηχανικά ή χημικά μέσα και διαμορφώνοντας τις κατάλληλες παραμέτρους εκτύπωσης (ύψος του ακροφυσίου, προσανατολισμός πλήρωσης, πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα) κατά περίπτωση. Η εναπόθεση πολυμερών σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα καλύπτει πτυχές της επιστήμης των υλικών, της συμβατότητας υλικών, της πρόσφυσης πολυμερών-υφασμάτων και της τεχνολογίας εναπόθεσης υλικών. Η κατανόηση των φαινομένων διεπαφής των υφασμάτων με τα πολυμερή αποτελούν μια πρόκληση.

Όπως έχει αποδειχθεί, οι εκτυπώσεις με τη μέθοδο FDM σε βαμβακερά και πολυεστερικά υφάσματα μπορούν να έχουν εξαιρετικές ιδιότητες πρόσφυσης. Η λαμβανόμενη αντοχή πρόσφυσης επηρεάζεται καθοριστικά από τις συνδέσεις του τηγμένου πολυμερούς με το υφασμάτινο υπόστρωμα. Αυτές οι συνδέσεις μπορούν να συμβούν στην επιφάνεια του υφάσματος (αν είναι τραχύ και τριχωτό) και στην ίδια την υφαντική δομή που αντιστοιχεί στον τύπο των νημάτων και της ύφανσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή πρόσφυσης είναι η διαβρεξιμότητα της επιφάνειας του υφάσματος, που μπορεί να ελεγχθεί με το πλύσιμο, το φινίρισμα ή την επεξεργασία του υφάσματος πριν από την εκτύπωση.

Μια άλλη πρόκληση που τίθεται είναι οι διαδικασίες φροντίδας των παραγόμενων προϊόντων. Το πλύσιμο είναι αναπόσπαστο μέρος της φροντίδας των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Μέχρι στιγμής, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που σχετίζονται με τη μείωση της πρόσφυσης των τυπωμένων υφασμάτων, αλλά και την ανθεκτικότητα των εκτυπωμένων υλικών. Για την εξασφάλιση αυτών των ζητημάτων απαιτείται πρόσθετη έρευνα σχετικά με την ικανότητα πλύσης και την ανθεκτικότητα, για την παροχή πληροφοριών σχετικά

με την καταλληλότητα των πρώτων υλών για τελικές χρήσεις. Όταν υιοθετούν τη φιλοσοφία των μηδενικών αποβλήτων, οι βιομηχανίες τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης θα πρέπει να αναπτύξουν μη υδατοδιαλυτά, βιώσιμα νημάτια με εφαρμογή στη βιομηχανία της μόδας.

Αρκετές από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται δεν είναι ανακυκλώσιμες, ενώ άλλες όπως το ABS, τα πολυανθρακικά και τα φωτοπολυμερή μπορεί να περιέχουν τοξικά βαρέα μέταλλα όπως το αντιμόνιο (Taylor, 2021). Η ενσωμάτωση του πλαστικού είτε μόνου του είτε με τη μορφή σύνθετων υλικών με οργανικά υλικά πλήρωσης μπορεί να επιβαρύνει τη ρύπανση, ενώ λόγω των υψηλών θερμοκρασιών ενίοτε απελευθερώνονται τοξικά σωματίδια (Klarmann, 2021). Επομένως, χρειάζεται προσεκτική επιλογή των υλικών. Η συσκευή εκτύπωσης θα μπορούσε επίσης να διαθέτει τη δυνατότητα να ανακυκλώνει το υλικό.

Τα προγράμματα μοντελοποίησης που είναι διαθέσιμα αυτή τη στιγμή δεν είναι εύκολα στον χειρισμό από επαγγελματίες της μόδας. Οι περισσότεροι σχεδιαστές μόδας συνεργάζονται με ειδικούς στη μοντελοποίηση προκειμένου να ψηφιοποιήσουν τα σχέδιά τους. Θα μπορούσε να υπάρχει ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα για τη δημιουργία ρούχων ή αξεσουάρ ικανό να άρει τα εμπόδια για τους επιχειρηματίες ή τους σχεδιαστές. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να υπάρχει στο πρόγραμμα ένας βασικός σκελετός ρούχου που να βασίζεται στην παραμετροποίηση. Ο σχεδιαστής θα μπορούσε να προσθέτει τις μετρήσεις του εκάστοτε πελάτη του που θα προκύπτουν είτε από τρισδιάστατο σκανάρισμα είτε μετρώντας μία-μία τις διαστάσεις του με μεζούρα (όπως περιφέρεια στήθους, μέσης, περιφέρειας, μήκος κορμού κ.λ.π.) και στη συνέχεια να δημιουργεί το σχέδιο που επιθυμεί είτε με χρήση έτοιμων βιβλιοθηκών είτε από την αρχή. Επίσης, η διαδικασία θα ήταν ταχύτερη και ευκολότερη, αν το πρόγραμμα μοντελοποίησης παρείχε τη δυνατότητα επιλογής εκτυπωτή, διαμορφώνοντας αυτόματα τις βέλτιστες επιλογές και τρόπους σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων εκτύπωσης.

Με τη βελτιστοποίηση της μεθόδου και την υιοθέτηση της τρισδιάστατης τεχνολογίας στη βιομηχανία της μόδας, ο κύκλος παραγωγής μπορεί να μειωθεί· ο σχεδιασμός θα γίνεται γρηγορότερα, ενώ δεν θα απαιτούνται δειγματισμοί υλικών και δημιουργία δείγματος ολόκληρου του ρούχου. Η παραγωγή μετά τον σχεδιασμό θα περιορίζεται στην εκτύπωση και ενδεχομένως σε κάποια μεταεπεξεργασία. Αυτό είναι ένα βασικό κίνητρο που ωθεί τους σχεδιαστές να αξιοποιήσουν την τεχνολογία αυτή, περιορίζοντας σε τόπο και αυξάνοντας σε δυνατότητες τον σχεδιασμό και την παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων μόδας.

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι μια αξιοσημείωτη τρέχουσα τεχνολογία που αναπτύσσεται ταχέως και παρέχει απεριόριστη σχεδιαστική ελευθερία έχοντας τεράστιες δυνατότητες στον σχεδιασμό και στη δημιουργία μόδας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο διαφορετικές βιομηχανίες εργάζονται ενεργά για να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία

τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη μείωση του κόστους και την αύξηση της αποτελεσματικότητας. Υπάρχουν πολλές προκλήσεις για την προώθηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο επόμενο στάδιο. Η ταχύτητα και η ανάλυση της εκτύπωσης θα πρέπει να αυξηθούν, ενώ η κατανάλωση της ενέργειας και το κόστος να μειωθούν. Ακόμα, χρειάζεται να εξασφαλιστεί η ακρίβεια στις διαστάσεις του προς εκτύπωση προϊόντος και η ανάπτυξη και χρήση νέων υλικών με ανώτερες ιδιότητες. Τέλος, θα μπορούσε να διερευνηθεί ο συνδυασμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης με άλλες παραδοσιακές τεχνολογίες, ως υβριδική τεχνολογία, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη αποδοτικότητα.

Η πρόοδος στις τεχνικές δυνατότητες στην τρισδιάστατη εκτύπωση και την τρισδιάστατη σάρωση καθώς και η ανάπτυξη διαφορετικών υλικών, καθιστούν δυνατές εξελίξεις που θα έχουν τη δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στην παραγωγή και το εμπόριο στη βιομηχανία της μόδας και της κλωστοϋφαντουργίας. Η τρισδιάστατη τεχνολογία τροποποιεί ολόκληρη την αλυσίδα της βιομηχανίας ένδυσης από τον αρχικό σχεδιασμό έως την παράδοση του τελικού προϊόντος. Το μέγεθος της παραγωγής μπορεί να μεταβάλλεται ανά πάσα στιγμή, χωρίς να επηρεάζεται η γραμμή παραγωγής, οι χρόνοι αναμονής εξαλείφονται και οι παραλλαγές μπορούν να συντελούνται άμεσα χωρίς να επιβαρύνουν απαγορευτικά το κόστος. Αυτό δίνει στην εταιρεία μεγαλύτερη ευελιξία και της επιτρέπει να ανταποκρίνεται άμεσα στις νέες τάσεις προσελκύοντας περισσότερους πελάτες.

Τέλος, με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι σχεδιαστές ή οι επωνυμίες μόδας θα μπορούσαν να πουλήσουν τους κωδικούς του σχεδίου τους, αντί για τα φυσικά ρούχα ή κοσμήματα, έτσι ώστε οι πελάτες να τα εκτυπώσουν χρησιμοποιώντας τους προσωπικούς τους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Επιπλέον, οι πελάτες θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τον κωδικό ώστε να προσαρμόσουν κατάλληλα το προϊόν στο μέγεθός τους και να επιλέξουν το χρώμα ή το σχέδιο που επιθυμούν. Εναλλακτικά, οι σχεδιαστές θα μπορούσαν να συνεργαστούν με παρόχους υπηρεσιών τρισδιάστατης εκτύπωσης για την εκτύπωση των ψηφιακών αρχείων και την παράδοση των προϊόντων απευθείας στους πελάτες. Με αυτόν τον τρόπο, οι σχεδιαστές θα μπορούσαν να πιέσουν τους παρόχους υπηρεσιών ηλεκτρονικής εκτύπωσης να προσφέρουν προστασία πνευματικών δικαιωμάτων για τα σχέδιά τους.

Συμπερασματικά, οι τρισδιάστατες τεχνολογικές εξελίξεις παρέχουν ευκαιρίες για καινοτομία στη βιομηχανία της μόδας, συμβάλλοντας σταδιακά στην απλοποίηση της συνολικής διαδικασίας σχεδιασμού. Αν και τα υλικά και οι τεχνολογίες που τροφοδοτούν την τρισδιάστατη εκτύπωση εξακολουθούν να υπαγορεύουν και να επηρεάζουν το σχεδιασμό των προϊόντων, λόγω του ενδιαφέροντος που υπάρχει βελτιστοποιούνται διαρκώς μειώνοντας τους περιορισμούς. Ο συνδυασμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης με τα έξυπνα υλικά, αναμένεται να προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες στη βιομηχανία της μόδας στο εγγύς μέλλον.

---

## 4D Εκτύπωση

---

“Με την 4D εκτύπωση, δεν περιοριζόμαστε σε στατικές, άκαμπτες δομές. Μπορούμε πλέον να δημιουργήσουμε αντικείμενα που μπορούν να αλλάξουν και να προσαρμοστούν στο περιβάλλον τους.”

(Hod Lipson)

Το τελευταίο κεφάλαιο μελετά την 4D εκτύπωση προσεγγίζοντας τις εξελίξεις που έχουν συντελεστεί ως τώρα, με τρόπο ώστε να είναι κατανοητός στο ευρύ κοινό. Συγκεκριμένα, αποσαφηνίζονται τα έξυπνα υλικά και προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, αποδίδεται η έννοια της 4D εκτύπωσης και η σχέση που έχει με την 3D εκτύπωση. Ακόμα, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την 4D εκτύπωση και ερευνώνται τα υλικά, οι μέθοδοι εκτύπωσης και οι μέθοδοι σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται μέχρις ώρας στην 4D εκτύπωση. Τέλος, η μελέτη επικεντρώνεται στην εφαρμογή της 4D εκτύπωσης στον τομέα της μόδας. Η προσέγγιση του ζητήματος γίνεται με τρόπο ώστε ο σχεδιαστής να είναι σε θέση να σκεφτεί σε εννοιολογικό επίπεδο “πάνω” από αυτό του υλικού ή της τεχνολογίας.

## ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ

“Είναι σαν να δίνουμε στη μη ζωντανή ύλη τα χαρακτηριστικά της ζωντανής ύλης, όπου το ερέθισμα που ανταποκρίνεται είναι εγγενώς προγραμματισμένο στο DNA της οργανικής ύλης”.

(Vinod Baya)

Τα έξυπνα ή ευφυή υλικά είναι πιο ευαίσθητα και πιο έξυπνα σε σχέση με τα συνηθισμένα υλικά. Πρόκειται για μια κατηγορία υλικών που μπορούν να αλλάξουν τις ιδιότητές τους (χρώμα, όγκος, ακαμψία, σχήμα), όταν εκτίθενται σε διαφορετικά εξωτερικά ερεθίσματα (θερμοκρασία, επίπεδα pH, μαγνητισμός, υγρασία και φως). Η προ-προγραμματισμένη απόκριση είναι η βασική δύναμη αυτών των υλικών που ανταποκρίνονται στα ερεθίσματα και είναι η πλέον κατάλληλη για έξυπνη εφαρμογή.

Μελετώνται ανάμεσα στην επιστήμη των υλικών και την επιστήμη της τεχνολογίας και αποτελούν μία νέα, ξεχωριστή κατηγορία σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά. Ξεπερνούν τις τρεις διαστάσεις· είναι τεσσάρων διαστάσεων καθώς εξελίσσονται στο χρόνο ή ακόμα και πέντε διαστάσεων καθώς μεταφέρουν ή μεταδίδουν πληροφορία (Σταυρίδου, 2009). Με τα συστήματα αυτά, η μορφή παύει να είναι στατική· μπορεί να αλλάξει από στιγμή σε στιγμή, αντιδρώντας στα ερεθίσματα που δέχεται.

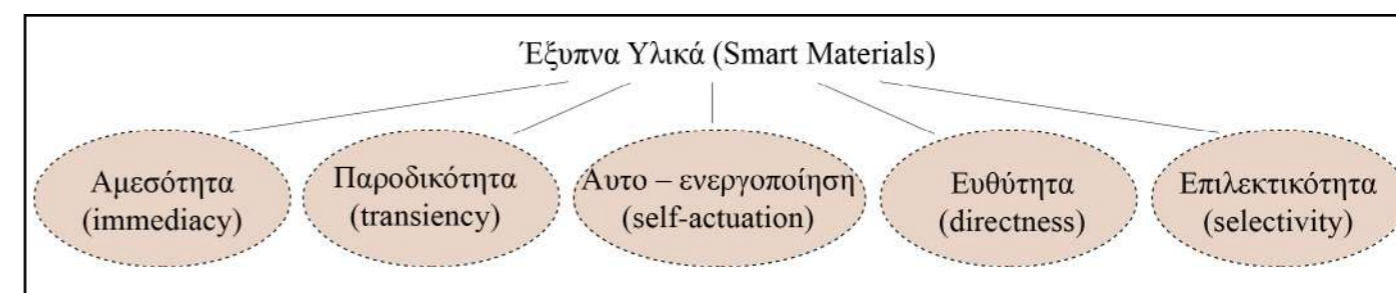
Αν και τα έξυπνα υλικά ερευνώνται ευρέως και χρησιμοποιούνται στην πράξη, εξακολουθεί να υπάρχει διαφωνία ως προς τον ορισμό του τι είναι τα έξυπνα υλικά (Bogue, 2014). Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί ορισμοί σχετικά με το τι ορίζεται ως έξυπνο υλικό, και αυτό είναι απολύτως λογικό λόγω του πλήθους των επιστημονικών τομέων που αφορά αυτή η καινοτομία. Για να δοθεί ο ορισμός του έξυπνου υλικού, πρέπει να γίνει κατανοητή η ιδιότητα της έξυπνης συμπεριφοράς. Η έξυπνη συμπεριφορά εμφανίζεται όταν ένα υλικό δέχεται κάποιο ερέθισμα από το περιβάλλον του και μπορεί να αντιδράσει σε αυτό με χρήσιμο, αξιόπιστο, αναπαραγωγίμο και συνήθως αναστρέψιμο τρόπο (Glynn, 2006).

Σύμφωνα με την encyclopedia of chemical technology, τα έξυπνα υλικά περιγράφονται ως “ανιχνευτές περιβαλλοντικών γεγονότων, που επεξεργάζονται τις αισθητηριακές πληροφορίες και κατόπιν ενεργούν επί του περιβάλλοντός τους” (Wilson Al. R., 2006). Θα μπορούσαν επίσης να οριστούν ως σειρές ενεργειών. Ένας από τους ορισμούς αναφέρει τα έξυπνα υλικά ως υλικά που επιδεικνύουν σύζευξη ή μετατροπή ενέργειας μεταξύ διαφόρων φυσικών τομέων, όπως η

μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο (Leo, 2007). Άλλοι, ορίζουν τα έξυπνα υλικά ως υλικά που αντιλαμβάνονται τις διακυμάνσεις στο εξωτερικό τους περιβάλλον και ανταποκρίνονται σε αυτές είτε αλλάζοντας τις ιδιότητές τους, είτε τις γεωμετρίες τους (Varadan et al., 2006).

Σύμφωνα με τους Addington και Schodek, τα περισσότερα από αυτά τα έξυπνα υλικά έχουν πέντε κοινά χαρακτηριστικά που τα διαχωρίζουν από τα παραδοσιακά υλικά:

1. Αμεσότητα (immediacy) – έχουν άμεση απόκριση στο ερέθισμα
2. Παροδικότητα (transiency) – αποκρίνονται σε περισσότερες από μία περιβαλλοντικές καταστάσεις
3. Αυτο – ενεργοποίηση (self-actuation) – η ευφυΐα τους είναι εγγενής
4. Ευθύτητα (directness) – η απόκρισή τους είναι τοπική σε ένα ενεργοποιημένο γεγονός
5. Επιλεκτικότητα (selectivity) – η απόκρισή τους είναι ξεχωριστή και προβλεπόμενη (Addington & Schodek, 2005).



## ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ- ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Παρά τα κοινά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τα έξυπνα υλικά, μπορούν τα ταξινομηθούν σε επιμέρους κατηγορίες για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων που παρέχουν. Εάν η ταξινόμηση υπό το πρίσμα της επιστήμης των υλικών περιγράφει τον τρόπο σύνθεσης ενός υλικού, υπό το πρίσμα της μηχανικής εξηγεί τι κάνει. Υπάρχει πληθώρα διαφορετικών ταξινομήσεων που προσδιορίζεται με βάση τον επιστημονικό κλάδο, ενώ υπάρχουν ακόμα και βιομηχανίες που έχουν αναπτύξει τα δικά τους συστήματα ταξινόμησης, για να περιορίσουν την επιλογή υλικών σε εκείνα που είναι κατάλληλα για τις δικές τους χρήσεις. Ανεξάρτητα από την πηγή του συστήματος ταξινόμησης, το καθένα επισημαίνει με σαφήνεια ιδιότητες που υποστηρίζουν τη χρήσιμη συμπεριφορά του υλικού.



Μία πρώτη κατηγοριοποίηση αφορά στον τρόπο με τον οποίο το έξυπνο υλικό ανταποκρίνεται σε ένα εξωτερικό ερέθισμα του περιβάλλοντός του. Συνεπώς, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε υλικά με ικανότητα **αλλαγής ιδιότητας** και υλικά με ικανότητα **μετασχηματισμού ενέργειας**.

Στην πρώτη κατηγορία, ο μηχανισμός επηρεάζει την εσωτερική ενέργεια του υλικού, αλλάζοντας τη μοριακή δομή ή τη μικροδομή του, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται μία ή περισσότερες ιδιότητες του υλικού – χημικές, μηχανικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές ή θερμικές. Οι μεταβολές είναι άμεσες και αναστρέψιμες, ενώ δεν υπάρχει ανάγκη εξωτερικού ελεγκτικού συστήματος για να τις προκαλέσει.

Στην δεύτερη κατηγορία, ο μηχανισμός αλλάζει την ενεργειακή κατάσταση του υλικού, αλλά δεν το αλλοιώνει, έχοντας ως αποτέλεσμα την αλλαγή ενέργειας από μία μορφή σε άλλη, άμεσα και αναστρέψιμα. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα υλικά εκπομπής φωτός, τα υλικά μνήμης σχήματος και τα υλικά αμφίδρομης αλλαγής ενέργειας. Τόσο ο μηχανισμός αλλαγής ιδιότητας όσο και ο μηχανισμός αλλαγής ενέργειας, λειτουργούν σε μικροκλίμακα (Addington and Schodek, 2005).

Τα έξυπνα υλικά κατηγοριοποιούνται με βάση το ερέθισμα που δέχονται και το πώς ανταποκρίνονται ως εξής:

**Έξυπνα Υλικά Αλλαγής ιδιότητας**

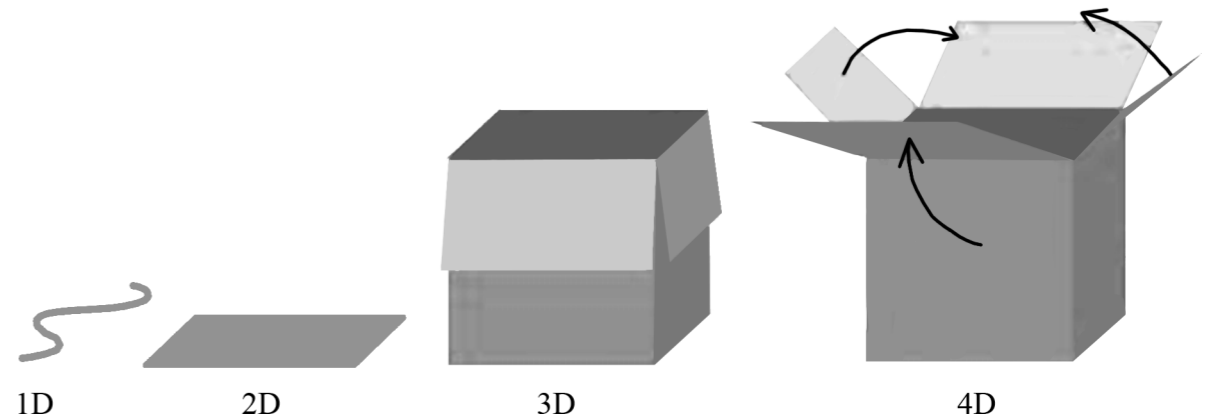
<p><b>Υλικά αλλαγής χρώματος</b>                  Θερμοχρωμικά -thermochromics                  Φωτοχρωμικά -photocromics                  Μηχανοχρωμικά -mechanocromics                  Χημοχρωμικά -chemocromics                  Ηλεκτροχρωμικά -electrocromics                  Υγροί κρύσταλλοι -liquid crystals</p>	<p><b>Gel / Κρύσταλλοι Αλλαγής Σχήματος</b>                  Υδρογέλες -hydrogels</p> <p><b>Υλικά αλλαγής φάσης</b>                  Ηλεκτροροεολογικά -electrorheological                  Μαγνητοροεολογικά -magnetorheological</p>	<p><b>Έξυπνα Αγώγιμα Υλικά</b>                  Ηλεκτροενεργά πολυμερή -electroactive polymers (EAP)                  Ηλεκτροχημικά -electrochemical polymers                  Φωτοαγωγός -photoconductor                  Φωτοαντιστάσεις -photoresistors                  Πυροαγωγοί -pyroconductors                  Μαγνητοαγωγοί -magnetoconductors</p>
--	---	--

**Έξυπνα Υλικά Μετασχηματισμού ενέργειας**

<p><b>Υλικά εκπομπής φωτός</b>                  Ηλεκτροφωταυγή -electroluminescents                  Φωτο-φωταυγή -photoluminescents                  Δίοδοι εκπομπής φωτός -LED                  Φωταυγή -luminescents                  fluorescence, phosphorescence, bioluminescence                  Χημοφωταυγή -chemoluminescents                  Θερμοφωταυγή -thermoluminescents</p>	<p><b>Υλικά μνήμης σχήματος</b>                  Κράματα μνήμης σχήματος -SMA                  Πολυμερή μνήμης σχήματος -SMP                  Κεραμικά μνήμης σχήματος -SMC</p>	<p><b>Υλικά αμφίδρομης ανταλλαγής ενέργειας</b>                  Πιεζοηλεκτρικά -piezoelectric                  Ηλεκτροπεριοριστικά -electrorestrictive                  Πυροηλεκτρικά -pyroelectric                  Θερμοηλεκτρικά -thermoelectric                  Μαγνητοπεριοριστικά -magnetostrictive                  Μαγνητοσταλτικά -magnetostrictive</p>
---	---	--

**ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (3DP) ΣΤΗΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (4DP)**

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια αναπτυσσόμενη βιομηχανία που παρέχει πολλά οφέλη στην προηγμένη βιομηχανία κατασκευής και σχεδιασμού. Μέχρι και σήμερα, σημειώνει πρόοδο στην εκτύπωση πολλαπλών υλικών και στην ανάπτυξη νέων εκτυπώσιμων υλικών. Ωστόσο, τα προϊόντα που εκτυπώνονται τείνουν να είναι στατικά και άκαμπτα. Η έναρξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης πολλαπλών υλικών και ο συνδυασμός έξυπνων υλικών στην εκτύπωση οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας που ονομάζεται “4D εκτύπωση”. Η 4D εκτύπωση θεωρείται ως η περαιτέρω εξέλιξη της 3D εκτύπωσης, με την τέταρτη διάσταση να αναφέρεται στην παράμετρο του χρόνου. Οι δομές που παράγονται από την τεχνολογία 4D εκτύπωσης εξαρτώνται από τον χωροχρόνο και μπορούν να αλλάξουν το σχήμα ή και τις ιδιότητές τους με την πάροδο του χρόνου, όταν εκτίθενται σε διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα όπως θερμοκρασία, φως, υπεριώδεις ακτίνες (UV), pH, μαγνητική ενέργεια, ηλεκτρισμός και υγρασία. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να προσχεδιαστούν και να ελεγχθούν με ακρίβεια.



4D ΕΚΤΥΠΩΣΗ = 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ + ΧΡΟΝΟΣ

Ο όρος της καινοτόμου ιδέας της 4D εκτύπωσης εισήχθη για πρώτη φορά από τον αρχιτέκτονα και επιστήμονα υπολογιστών Skylar Tibbits, το 2013 στο MIT. Πρόκειται για μια νέα τεχνολογία που χρησιμοποιεί τρισδιάστατη εκτύπωση με υλικά που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλονται με προκαθορισμένο τρόπο με την πάροδο του χρόνου, υπό την επίδραση εξωτερικών ερεθισμάτων. Ως αποτέλεσμα εμφανίζονται αλλαγές στο σχήμα, στις φυσικές ιδιότητες ή τη χημική σύσταση (Tibbits, 2014). Η 4D εκτύπωση έχει την προοπτική

να απλοποιήσει τον σχεδιασμό και την κατασκευή διαφόρων προϊόντων και την δυνατότητα αυτοματοποίησης συσκευών ενεργοποίησης που αντιδρούν φυσικά με το περιβάλλον τους, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης αλληλεπίδρασης, μπαταριών, επεξεργαστών, αισθητήρων ή κινητήρων. Τα σύνθετα μηχανικά εξαρτήματα μπορούν να εξαλειφθούν από τα συστήματα ενεργοποίησης ενσωματώνοντας αυτές τις λειτουργίες απευθείας στα υλικά. Αυτό μειώνει τον αριθμό των απαραίτητων εξαρτημάτων, τη δυσκολία συναρμολόγησης και το κόστος παραγωγής.

4D Printing	Κριτήρια	3D Printing
Μη επαρκής	Ανάπτυξη	Επαρκής (4 δεκαετίες)
Δυναμική	Εκτυπωμένη δομή	Στατική
Δύσκολη εκτύπωση	Εκτύπωση σύνθετου σχεδίου	Εύκολη και γρήγορη
Έξυπνα Υλικά	Υλικά	Συμβατικά Υλικά
Έκθεση σε συγκεκριμένο ερέθισμα	Κατασκευαστική προσέγγιση	Διαστρωμάτωση
4D εκτυπωτής/4D λογισμικό	Εκτυπωτής/λογισμικό	3D εκτυπωτής/3D λογισμικό

Σύγκριση 3D- 4D εκτύπωσης με βάση συγκεκριμένα κριτήρια.

### ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Η έννοια της 4D εκτύπωσης εξαρτάται κυρίως από πέντε παράγοντες, οι οποίοι είναι οι μέθοδοι εκτύπωσης, το υλικό που ανταποκρίνεται στα ερεθίσματα, τα ερεθίσματα, ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης και ο σχεδιασμός- μοντελοποίηση.

Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η 4D εκτύπωση.



### -ΜΕΘΟΔΟΙ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Για την 4D εκτύπωση έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που βασίζονται σε μεθόδους φωτοπολυμερισμού (VPP), σύντηξης σκόνης υλικού (PBF), εξώθησης (MEX), εκτόξευσης (MJT/ inkjet) ή κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας (DED), ανάλογα με την περίπτωση και το προς εκτύπωση υλικό (Aldawood, 2023).

Η πρώτη καινοτόμος 4D εκτύπωση έγινε με τη χρήση της μεθόδου επιλεκτικής συσσώατωσης με laser (SLS), και συγκεκριμένα του εκτυπωτή Stratasys Connex. Αυτή η τεχνική, που αποτελεί μία μέθοδο σύντηξης σκόνης (PBF), χρησιμοποιεί λέιζερ και μπορεί να εκτυπώσει διάφορα υλικά σε σκόνη όπως κερί, πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά. Άλλες τεχνικές αυτής της κατηγορίας που έχουν χρησιμοποιηθεί για 4D εκτύπωση και χρησιμοποιούν μεταλλική σκόνη είναι η επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM) και η επιλεκτική τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) (Ahmed et al., 2021).

Η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (DED) είναι ένας άλλος τύπος 4D εκτύπωσης για μεταλλικά εξαρτήματα, πολυμερή ή κεραμικά. Εκτυπωμένες δομές με μνήμη σχήματος έχουν εκτυπωθεί χρησιμοποιώντας DED. Ακόμα, η εκτύπωση με εκτόξευση (inkjet) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην 4D εκτύπωση για τη δημιουργία οικονομικά αποδοτικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και συσκευών με πολυμερικό υπόστρωμα.

Η μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (FDM) και η άμεση γραφή με μελάνη (DIW) είναι οι πιο κατάλληλες διαδικασίες εξώθησης για 4D εκτύπωση. Μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο FDM με υλικά μνήμης σχήματος (SMM), ενώ διεξάγονται έρευνες ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική και συμβατή με νέα υλικά (Ahmed et al., 2021). Έρευνες έχουν χρησιμοποιήσει τη μέθοδο DIW για εκτύπωση πολυμερών με μνήμη σχήματος (SMP) σε συνδυασμό με νανοσύνθετα με μνήμη σχήματος (SMNC). Η εκτύπωση DIW και η μικροστερεολιθογραφία προβολής (PμSL) χρησιμοποιούνται κυρίως για βιοϊατρικές εφαρμογές της 4D εκτύπωσης.

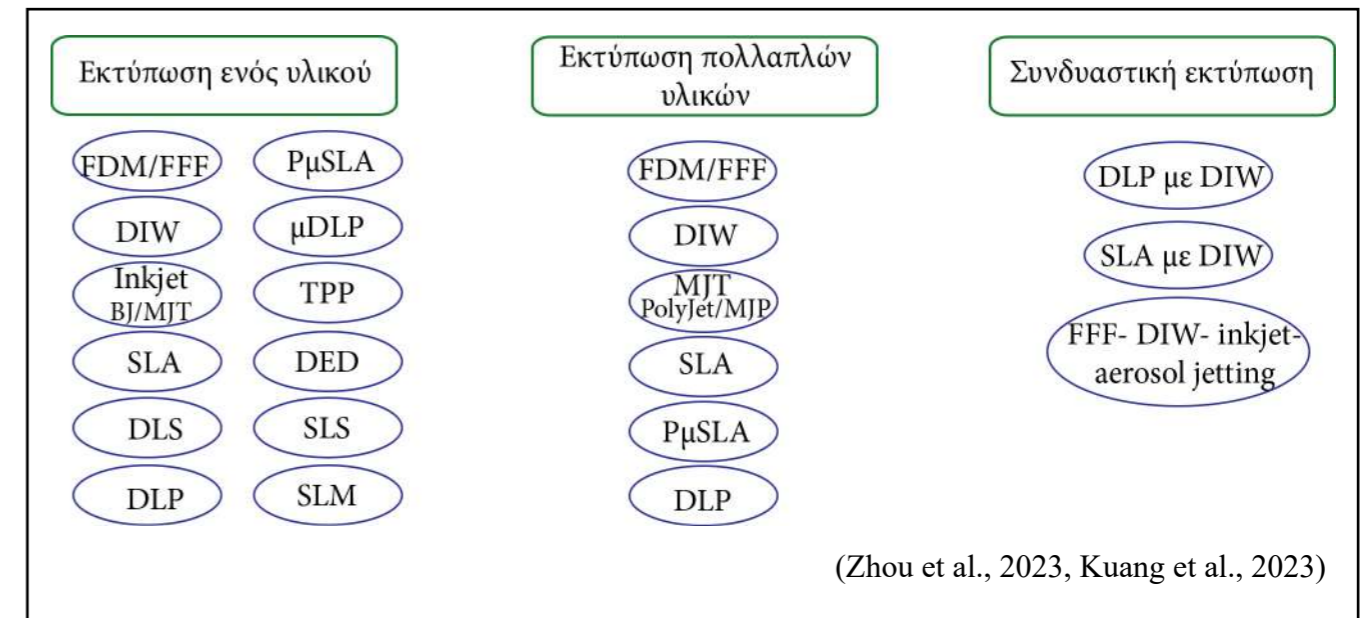
Στις μεθόδους φωτοπολυμερισμού που έχουν χρησιμοποιηθεί στην 4D εκτύπωση εντάσσονται οι μέθοδοι DLP και SLA. Σύμφωνα με έρευνες οι δομές που εκτυπώθηκαν με στερεολιθογραφία έδειξαν γρήγορη ανάκτηση, ανώτερη απόδοση μνήμης σχήματος και καλή επαναφορά, ακολουθούμενη από επαρκή αντοχή (Zafar & Zhao, 2019). Μία άλλη μέθοδος φωτοπολυμερισμού που έχει χρησιμοποιηθεί στην 4D εκτύπωση είναι ο πολυμερισμός 2 φωτονίων (Two-photon polymerization - 2PP/ TPP). Πρόκειται για μια τεχνική εκτύπωσης δομών μικρο- και νανοκλίμακας, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μικροδομών υψηλής ανάλυσης. Αυτή η τεχνολογία, που ονομάζεται επίσης άμεση γραφή με λέιζερ (DLW), χρησιμοποιεί παλμικές ακτίνες λέιζερ υψηλής ενέργειας.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εκτύπωσης DPP (daylight polymer printing) που χρησιμοποιεί οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) για φωτοπολυμερισμό, μπορούν να δημιουργηθούν δομές με μεγάλη επιφάνεια, υψηλή ποιότητα ανάλυσης, υψηλή αναπαραγωγιμότητα και ακρίβεια. Επιπλέον, ο εξοπλισμός είναι λιγότερο περίπλοκος και ο χρόνος κατασκευής μικρότερος σε σύγκριση με άλλες τεχνικές (Kim et al. 2014).

Στην εξέλιξη της 4D εκτύπωσης συνέβαλε η ανάπτυξη της τεχνολογίας PolyJet (Stratasys Ltd) πολλαπλών υλικών. Σύμφωνα με έρευνες, έξυπνα και συμβατικά υλικά μπορούν να εκτυπωθούν με ακρίβεια με τη μέθοδο αυτή, δημιουργώντας περίπλοκες δομές. Οι ερευνητές μπορούν να επωφεληθούν από την ικανότητα του εκτυπωτή Objet500 Connex3 Polyjet, της εταιρείας Stratasys να διανέμει πολλαπλά υλικά για την εκτύπωση μίας στατικής δομής ενός εξαρτήματος, σε συνδυασμό με το προ-προγραμματισμένο υλικό μνήμης σχήματος (Ahmed et al., 2021).

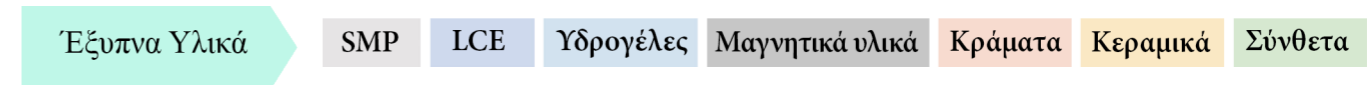
Η ικανότητα του τρισδιάστατου εκτυπωτή να εναποθέτει πολλαπλά υλικά ταυτόχρονα ή διαδοχικά, συνδυάζοντας διαφορετικά υλικά με ποικίλες ιδιότητες, επιτρέπει την δημιουργία αντικειμένων που μπορούν να υποστούν περίπλοκους μετασχηματισμούς. Για παράδειγμα, ένα αντικείμενο 4D εκτύπωσης θα μπορούσε να αποτελείται από ένα άκαμπτο υλικό για δομική υποστήριξη και ένα πολυμερές με μνήμη σχήματος για τις μετασχηματιστικές ιδιότητες. Το FDM έχει αποδειχθεί πρόσφορο για τρισδιάστατη εκτύπωση πολλαπλών υλικών με ξεχωριστή κεφαλή εξώθησης. Πρόσφατα εισάγεται ένα νέο σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης πολλαπλών υλικών με χαμηλό κόστος και υψηλή ανάλυση. Επιπρόσθετα, οι μέθοδοι DIW, SLA και PμSLA έχουν χρησιμοποιηθεί για εκτύπωση πολλαπλών υλικών. Αν και οι τεχνικές αυτές απαιτούν τεχνογνωσία και μπορεί να αποδειχθούν δαπανηρές, με την εξέλιξη της τεχνολογίας οι περιορισμοί που εμφανίζονται στην 4D εκτύπωση πολλαπλών υλικών μπορούν να ξεπεραστούν.

Παρά την αξιοσημείωτη ανάπτυξη των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης, εξακολουθούν να υπάρχουν πολυάριθμοι τεχνικοί περιορισμοί, ιδιαίτερα όσον αφορά τα απαιτούμενα έξυπνα υλικά που μπορούν να εκτυπωθούν, αλλά και την ανάπτυξη νέων μεθόδων και στρατηγικών για την εκτύπωση των διαθέσιμων έξυπνων υλικών. Επί του παρόντος, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνότερα για 4D εκτύπωση είναι οι FDM, DIW, DLP, SLS και SLA (Aldawood, 2023, Lyu et al., 2023). Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, γεγονός που θα μπορούσε να αυξήσει έμμεσα τις απαιτήσεις της αγοράς για την 4D εκτύπωση την επόμενη δεκαετία. Η εξέλιξη της 4D εκτύπωσης και των έξυπνων υλικών, αναμένεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο στους βιομηχανικούς τομείς.



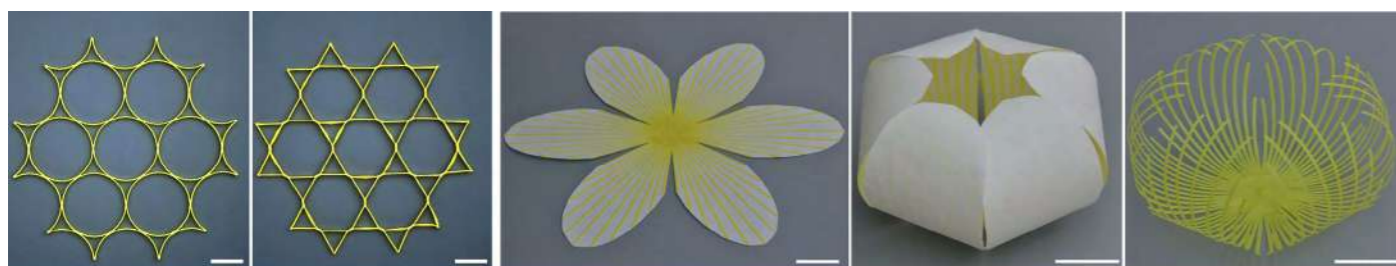
### -ΤΥΠΟΙ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Πέρα από τις μεθόδους εκτύπωσης, η επιλογή και ο σχεδιασμός των υλικών εκτύπωσης αποτελούν την πιο θεμελιώδη απαίτηση για την 4D εκτύπωση. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα για την ανάπτυξη της 4D εκτύπωσης έχει επικεντρωθεί κυρίως στα έξυπνα υλικά. Η επιλογή υλικών για την 4D εκτύπωση είναι κρίσιμη, καθώς τα περισσότερα υλικά που εκτυπώνονται με τρισδιάστατη εκτύπωση έχουν δημιουργηθεί για να παράγουν στατικές δομές. Ωστόσο, υλικά όπως μέταλλα, κεραμικά, πλαστικά, σύνθετα, κράματα, υδρογέλες και πολυμερή έχουν χρησιμοποιηθεί για 4D εκτύπωση, με τα πολυμερή να έχουν εκτενέστερη εφαρμογή λόγω της μοριακής δομής τους, των ιδιοτήτων τους, της οικονομικής τους αποδοτικότητας, της ποικίλης ανταπόκρισής τους σε ερεθίσματα και της μεγάλης παραμόρφωσής τους (Kuang et al., 2023). Τα τρέχοντα και πιο εκτενώς μελετημένα 4D εκτυπώσιμα έξυπνα υλικά περιλαμβάνουν πολυμερή μνήμης σχήματος (SMP), ελαστομερή υγρών κρυστάλλων (LCE), υδρογέλες, μαγνητοενεργά υλικά, κράματα, κεραμικά και σύνθετα υλικά.



### -Πολυμερή μνήμης σχήματος (Shape memory polymers- SMP)

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά στην 4D εκτύπωση είναι τα πολυμερή μνήμης σχήματος (SMP). Πρόκειται για υλικά που αλλάζουν το αρχικό τους (μόνιμο) σχήμα σε μια παραμορφωμένη κατάσταση (προσωρινό σχήμα) και να επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα μετά την ενεργοποίηση από ένα εξωτερικό ερέθισμα, συμπεριλαμβανομένου του νερού, του φωτός ή της θερμότητας. Τέτοιες αλλαγές σχήματος δημιουργούνται είτε μέσω ιδιοδιτάξεων, είτε μέσω άμεσου προγραμματισμού σχήματος. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση έχουν δημιουργηθεί εξαιρετικά πολύπλοκες αλλαγές σχήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα SMP αποτελεί το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το πιο διαδεδομένο υλικό στην τρισδιάστατη εκτύπωση (Καλογεράκης & Κρυφός, 2023). Ακόμα, έχουν δημιουργηθεί εκτυπώσιμες ρητίνες SMP, η παρασκευή των οποίων περιλαμβάνει πολύπλοκη χημική σύνθεση (Lyu et al., 2023). Οι βασικές μέθοδοι εκτύπωσης των SMP είναι οι DLP, SLA και FDM.



Μετασχηματισμός γεωμετρικών μοτίβων από PLA με θέρμανση στους 90°C και λωρίδων PLA (πλάτους 0,8 mm και πάχους 0,2 mm) με θέρμανση στους 105°C. Το σχήμα διατηρείται μέχρι να θερμανθεί ξανά.

Πηγές: <https://www.nature.com/articles/srep08936/figures/1>  
<https://www.nature.com/articles/srep22431/figures/1>

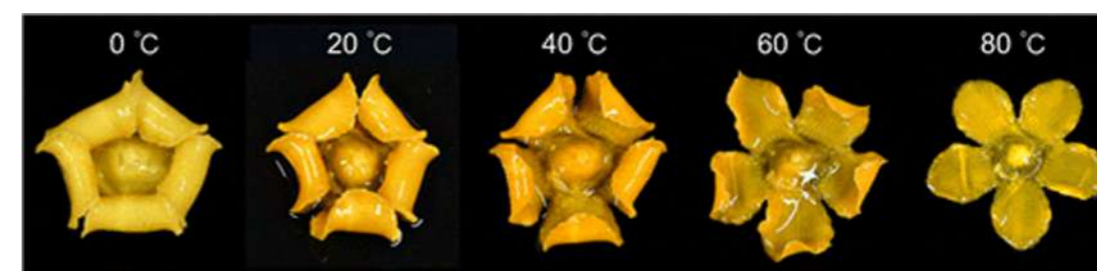
SMP



DLP, SLA, FDM, ΡμSL, TPP, DIW, IJP

### -Ελαστομερή υγρών κρυστάλλων (Liquid crystal elastomers- LCE)

Μια άλλη κατηγορία υλικών που αλλάζουν ιδιότητα, και συγκεκριμένα σχήμα, είναι τα ελαστομερή υγρών κρυστάλλων (LCE). Τα LCE μπορούν να διέρχονται μεταξύ της κρυσταλλικής και της ισοτροπικής τους κατάστασης κατά την έκθεση σε διάφορα ερεθίσματα όπως η θερμοκρασία, το ηλεκτρικό πεδίο, το φως και το μαγνητικό πεδίο. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα LCE έχουν εκτυπωθεί με την τεχνική DIW (Lyu et al., 2023).



Αλλαγή σχήματος εκτυπωμένου LCE με την αλλαγή της θερμοκρασίας

Πηγή: [https://pubs.acs.org/cms/10.1021/acsami.3c10210/asset/images/medium/am3c10210\\_0008.gif](https://pubs.acs.org/cms/10.1021/acsami.3c10210/asset/images/medium/am3c10210_0008.gif)

LCE

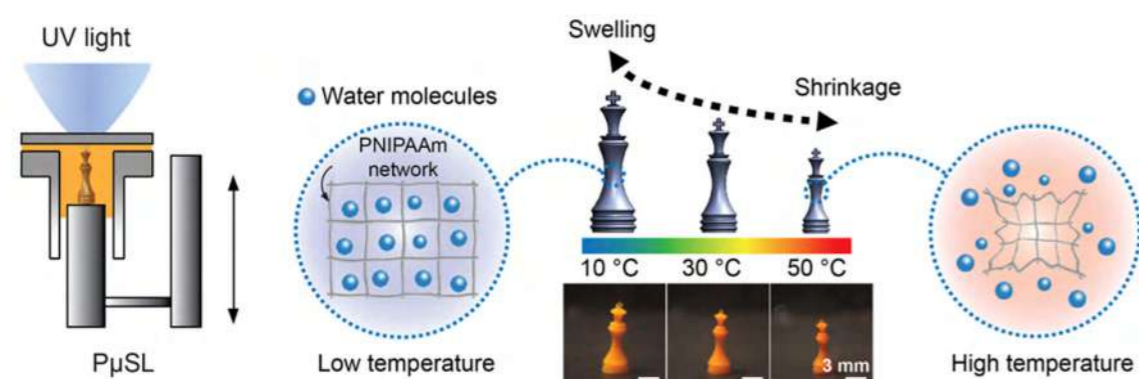


DIW, IJP

### -Υδρογέλες (Hydrogels)

Οι υδρογέλες αποτελούν μία ακόμα επιλογή υλικού για 4D εκτύπωση. Αποτελούνται από δίκτυο πολυμερών αλυσίδων και μπορούν να κατασκευαστούν από μία ποικιλία φυσικών και συνθετικών πολυμερών (PEG, PVA, alginate) (Kantaros et al., 2023). Ανάλογα με την δομή και τη σύνθεσή τους μπορεί να είναι από μαλακές και εύθραυστες έως άκαμπτες και ευαίσθητες. Πρόκειται για υδρόφιλα πολυμερή με σταυροειδείς δεσμούς, ικανά να απορροφούν και να διατηρούν μεγάλες ποσότητες νερού (διαστέλλονται έως 200% του αρχικού τους όγκου). Με μια καλά καθορισμένη δομή τόσο σε ξηρή, όσο και σε διογκωμένη κατάσταση, οι εκτυπώσιμες υδρογέλες μπορούν να αλλάζουν με ελεγχόμενο τρόπο τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες υπό ένα συγκεκριμένο εξωτερικό ερέθισμα.

Παρουσιάζουν γρήγορη απόκριση, διαπερατή δομή και υψηλή ικανότητα εκτύπωσης. Οι περισσότερες υδρογέλες που ανταποκρίνονται σε αλλαγές διόγκωσης- αποδιόγκωσης εκτυπώνονται με τις τεχνικές DIW, DLP ή ΡμSL. Πολλές έξυπνες υδρογέλες μπορούν να ανταποκρίνονται σε διάφορα ερεθίσματα, όπως νερό, pH, διαλύτης, συγκέντρωση ιόντων, φως, θερμοκρασία, μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο (Lyu et al., 2023).



Διόγκωση και συρρίκνωση της 4D εκτυπωμένης δομής από υδρογέλη, με την αλλαγή της θερμοκρασίας  
 Πηγή: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-20385-2>

Υδρογέλες |  | DIW, DLP, PμSL, SLA, IJP, LDW\*

**-Μαγνητικά υλικά**

Τα μαγνητικά υλικά που εκτυπώνονται 4D μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν με απλή ενσωμάτωση μαγνητικών σωματιδίων στο μαλακό πολυμερές, ώστε να επιτευχθούν σύνθετες προγραμματιζόμενες αλλαγές στο σχήμα και στην κίνηση. Η χρησιμοποιούμενη τεχνική εκτύπωσης για αυτά τα υλικά είναι συνήθως η DIW, όπου τα ενσωματωμένα μαγνητικά σωματίδια χρησιμεύουν όχι μόνο ως στοιχείο ανταπόκρισης στο ερέθισμα, αλλά και ως ρεολογικός τροποποιητής, διευκολύνοντας την εξώθηση στην τρισδιάστατη εκτύπωση.



Μαγνητικό υλικό με βάση SMP που λειτουργεί ως δαγκάνα.  
 Πηγή: <https://www.nature.com/articles/srep31110>

Μαγνητικά υλικά |  | DIW

Τα μαγνητικά υλικά είναι κυρίως σύνθετα υλικά με μαγνητικά σωματίδια ενσωματωμένα σε πολυμερείς μήτρες. Τα μαγνητικά υλικά και τα σύνθετα υλικά σε αυτή την ανασκόπηση ταξινομούνται σε δύο είδη ενεργών υλικών με βάση τις διαφορετικές ιδιότητες απόκρισης, δηλαδή (μονόδρομη) μαγνητική ενεργοποίηση για μαγνητικά υλικά, ενώ περισσότερα από ένα ανταποκρινόμενα ερεθίσματα για έξυπνα σύνθετα υλικά με νέες λειτουργίες (Lyu et al., 2023).

**-Κράματα**

Τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA) είναι μια κατηγορία μεταλλικών κραμάτων ικανά να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα κατά την έκθεση σε ορισμένα εξωτερικά ερεθίσματα, όπως η θερμοκρασία και το εφελκυστικό φορτίο (Lee et al., 2017). Ένα από τα πιο κοινά 4D εκτυπωμένα SMA είναι τα κράματα NiTi που αποκρίνεται στην αλλαγή θερμοκρασίας.



Η λειτουργία του SMA σε δομή που ενώ έχει χαλαρή εφαρμογή, εφαρμόζει και στη συνέχεια “σφίγγει” το σώμα.  
 Πηγή: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07233-w/figures/15>

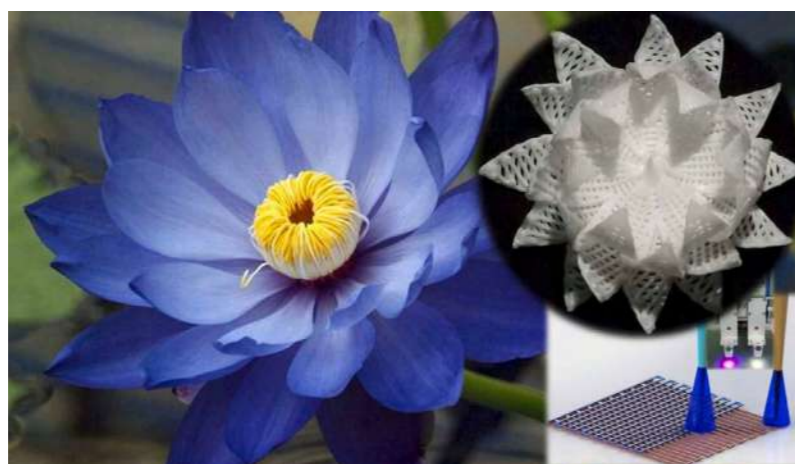
Κράματα |  | SLM, L-PBF, TPP

**-Κεραμικά**

Οι μελέτες για τα 4D εκτυπωμένα κεραμικά υλικά είναι λιγότερες. Μετά από κατάλληλη θερμική επεξεργασία, κατασκευάστηκαν κεραμικά σε περίπλοκα σχήματα προερχόμενα από ελαστομερές με την τεχνική DIW, καθιστώντας δυνατή την εκτύπωση έξυπνων δομών (Lyu et al., 2023). Το φαινόμενο της μνήμης σχήματος παρατηρείται και στα κεραμικά. Τα κεραμικά υλικά ανοίγουν ευκαιρίες για κεραμικά με μνήμη σχήματος (SMC) χάρη στην εξαιρετική τους θερμική σταθερότητα μετά από πυρόλυση στους 1000° C (σχεδόν δεν παρατηρήθηκε συρρίκνωση).

Κεραμικά |  | DIW

\*Laser Deposition Welding. Τρισδιάστατη εκτύπωση κυρίως για μεταλλικά υλικά



Με την εκτύπωση διπλής στρώσης κεραμικού ζirkονίου (ZrO<sub>2</sub>) με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά στο κάτω στρώμα και χαμηλή στο επάνω. Μετά την πυροσυσσώματωση συρρικνώνεται και αλλάζει το του από επίπεδο σε καμπύλο.  
 Πηγή: [https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214860423000246-ga1\\_lrg.jpg](https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214860423000246-ga1_lrg.jpg)

Σύνθετα



DIW, DLP, ILP, FDM κ.ά.

### ΤΥΠΟΙ ΕΡΕΘΙΣΜΑΤΩΝ

Για την ενεργοποίηση των λειτουργιών, των ιδιοτήτων και του σχήματος της τυπωμένης δομής απαιτείται η παρουσία ερεθίσματος. Τα ερεθίσματα μπορούν να χωριστούν σε φυσικά, χημικά και βιολογικά. Τα φυσικά ερεθίσματα αναφέρονται στη θερμοκρασία, την υγρασία, το φως, τον μαγνητισμό και την ηλεκτρική ενέργεια. Χημικά είναι τα ερεθίσματα με βάση το pH, την ιοντική ισχύ και τις χημικές ουσίες, ενώ η γλυκόζη και τα ένζυμα θεωρούνται βιολογικά ερεθίσματα.

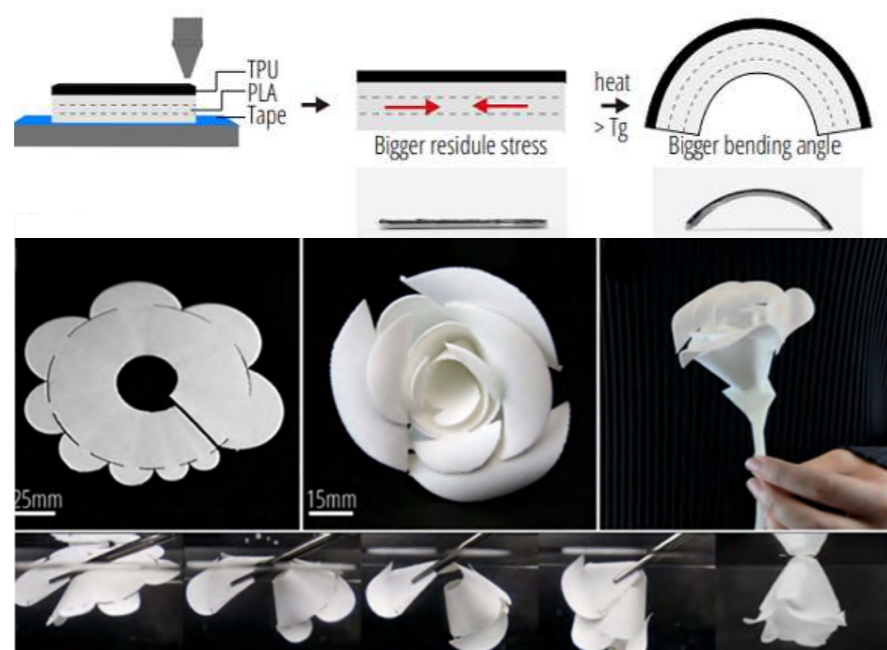
Στην 4D εκτύπωση έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι ερεθισμάτων, για να προκαλέσουν την αντίδραση των εκτυπωμένων υλικών που μπορούν να ταξινομηθούν σε θερμοκρασία (συνήθως θέρμανση), φως (π.χ. UV, NIR), υγρό περιβάλλον (π.χ. νερό, διαλύτης, pH, ιόντα), μηχανική δύναμη, μαγνητικό πεδίο και ηλεκτρικό πεδίο. Γενικά, ένας τύπος έξυπνου υλικού συνήθως ανταποκρίνεται σε ένα μόνο ερέθισμα σύμφωνα με τις φυσικοχημικές του ιδιότητες.

Από την άλλη πλευρά, η πολλαπλή απόκριση στα ερεθίσματα είναι ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό που μπορεί να διευρύνει σημαντικά την πρακτική εφαρμογή. Ένας συνηθισμένος και απλός τρόπος για την επίτευξη 4D εκτύπωσης με απόκριση πολλαπλών ερεθισμάτων είναι η ενσωμάτωση λειτουργικών πληρωτικών σε μια έξυπνη μήτρα, η οποία έχει μεγαλύτερη απόκριση από την αρχική. Ωστόσο, σε αυτό το μονοπάτι, τα περισσότερα από τα σύνθετα υλικά συνήθως μετατρέπουν το φως ή το μαγνητισμό σε θερμότητα και τον ηλεκτρισμό σε οσμωτική πίεση. Επομένως, αυτές οι πολλαπλές αποκρίσεις ερεθισμάτων αποτελούν ουσιαστικά μόνο έναν τύπο διέγερσης.

Ένα άλλο μονοπάτι αφορά την κατασκευή δομών πολλαπλών υλικών μέσω του συνδυασμού δύο (ή περισσότερων) έξυπνων υλικών που ανταποκρίνονται σε διαφορετικά ερεθίσματα. Για παράδειγμα, τα SMP που ανταποκρίνονται στη θερμοκρασία μπορούν να συνδυαστούν με υδρογέλες που ανταποκρίνονται στο νερό και θερμικά αποκρινόμενο διογκωτικό gel με ένα παθητικό θερμικά μη ανταποκρινόμενο gel (Lyu et al., 2023).

### -Σύνθετα

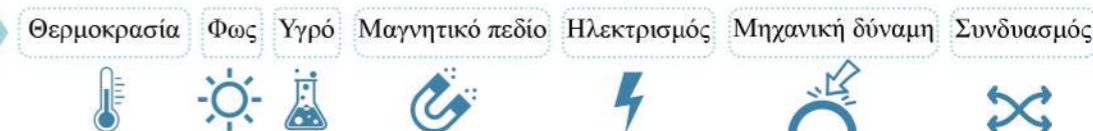
Τα σύνθετα υλικά, που βασίζονται σε πολλαπλά ενεργά υλικά, μπορούν να ενσωματώσουν τα πλεονεκτήματα δύο ή περισσότερων ενεργών υλικών, καθώς και να πραγματοποιήσουν εξελιγμένη συμπεριφορά, ανταποκρινόμενα σε περισσότερα του ενός ερεθίσματα. Επιπροσθέτως, το υλικό πλήρωσης μπορεί να τροποποιήσει τις ρεολογικές ιδιότητες των υλικών, κάνοντάς τα εκτυπώσιμα, ειδικά όσον αφορά την εκτύπωση με εξώθηση.



4D εκτύπωση σύνθετων υλικών 2 στρωμάτων με βάση το SMP (ένα ενεργό στρώμα PLA και ένα παθητικό στρώμα TPU). Το επίπεδα εκτυπωμένο θερμοαποκρινόμενο υλικό (με τη μέθοδο FFF) αυτοδιπλώνεται σε τρισδιάστατο λουλούδι.

Πηγές: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/termousadka-i-4d-pechat-amerikanskie-uchenye-rabotayut-nad-samoskladyvayushchimisy-origami>  
<https://hackaday.com/2018/08/27/self-folding-origami-from-a-3d-printer/>

Τύποι ερεθισμάτων

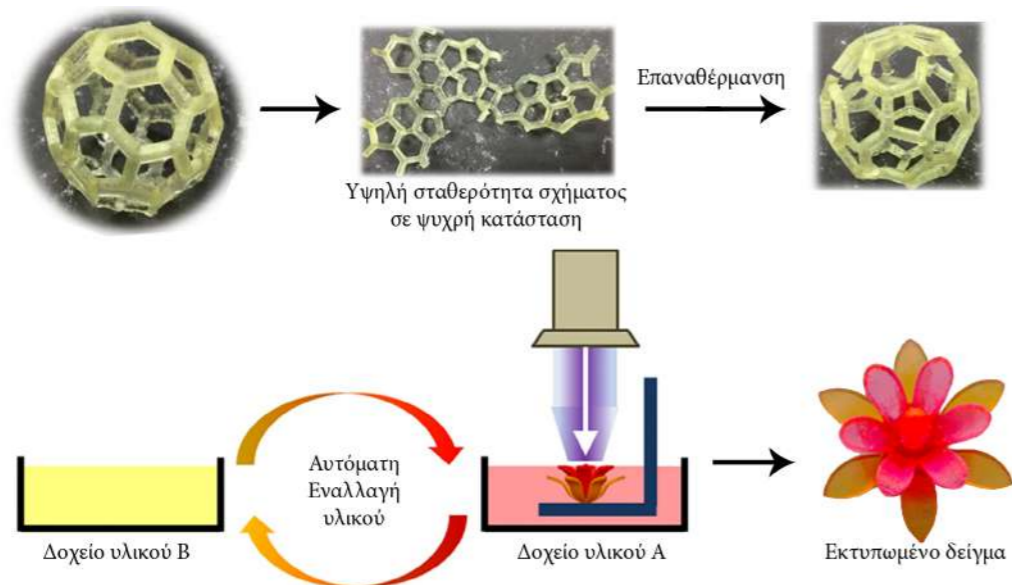


**ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΝΟΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΡΕΘΙΣΜΑΤΑ**



**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

Η θερμοκρασία είναι ένα από τα πιο κοινά ερεθίσματα για πολλά έξυπνα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των SMP, LCE, SMA και υδρογέλης. Τυπικά, ποικίλες μέθοδοι θέρμανσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενεργοποίηση αυτής της διέγερσης, συμπεριλαμβανομένου του ζεστού νερού, του ηλεκτρικού ρεύματος και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Διαφορετικά θερμοανταποκρινόμενα υλικά έχουν διαφορετικούς μηχανισμούς ανταπόκρισης (Lyu et al., 2023).



Εκτυπωμένη μπάλα SMP με τη μέθοδο SLA, που έχει την ικανότητα να αλλάζει το σχήμα της σε επίπεδο και αντίστροφα με αλλαγή της θερμοκρασίας.

Ένα λουλούδι SMP εκτυπωμένο με τη μέθοδο ΡμSL, το οποίο μπορεί να ανθίσει κατά τη θέρμανση.

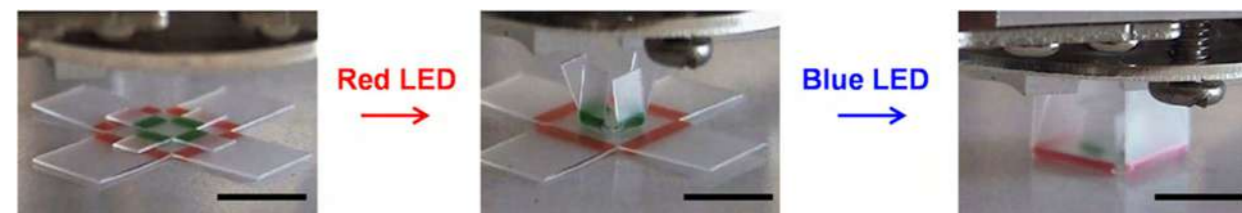
Επίσης, ένα SMP μπορεί να προγραμματιστεί εκ των προτέρων χρησιμοποιώντας θερμοότητα στους εκτυπωτές FDM (Bodaghi et al., 2018).

Πηγές : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517304069>, <https://www.nature.com/articles/srep31110>

**ΦΩΣ**

Το φως αποτελεί ένα ακόμα ερέθισμα στο οποίο ανταποκρίνονται ορισμένες 4D εκτυπωμένες δομές. Τα υλικά ενεργοποιούνται και παρουσιάζουν αλλαγή στο σχήμα ή τις ιδιότητες, την εμφάνιση και το μέγεθός τους ως απόκριση στις συνθήκες φωτός και σκότους, συμπεριλαμβανομένων του υπεριώδους, υπέρυθρου και εγγύς υπέρυθρου φωτός (Sheikh et al., 2023). Οι αλλαγές εξαρτώνται από τα χρώματα του υλικού και την πηγή φωτός (Zhang et al., 2019).

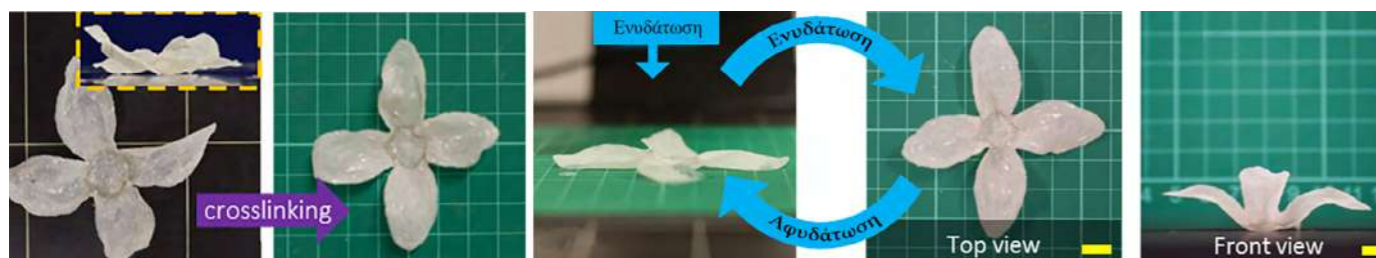
Το φως λειτουργεί, επίσης, ως έμμεσο ερέθισμα για την παραμόρφωση των έξυπνων υλικών. Όταν μια περιοχή ενός έξυπνου υλικού εκτίθεται στο φως, το απορροφά, μετατρέποντάς το σε θερμότητα και προκαλώντας ακολούθως αλλαγή σχήματος. Παράδειγμα αποτελεί μια διαδοχικά αυτοαναδιπλούμενη δομή, που μπορεί να εκτυπωθεί με μεθόδους SLA ή DLP: το φως απορροφάται από τις αρθρώσεις, οι οποίες θερμαίνονται και στη συνέχεια μετασχηματίζονται (Liu et al., 2017).



Διαδοχική αναδίπλωση κουτιών ανάλογα με το χρώμα των μεντεσέδων και το ερέθισμα (χρωματιστό φως).  
 Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/314225347\\_Sequential\\_self-folding\\_of\\_polymer\\_sheets](https://www.researchgate.net/publication/314225347_Sequential_self-folding_of_polymer_sheets)

**ΥΓΡΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα έξυπνα υλικά που μπορούν να ανταποκριθούν σε μία αλλαγή στο υγρό περιβάλλον, το οποίο θα μπορούσε να είναι ο διαλύτης (π.χ. νερό, ακετόνη, οξικός αιθυλεστέρας, ισοπροπυλική αλκοόλη), το pH ή η παρουσία ορισμένων ιόντων. Ως απόκριση μπορούν να υποστούν αλλαγές στο σχήμα και τον όγκο (Liu & Urban, 2010). Το έξυπνο υλικό προσλαμβάνει το υγρό στοιχείο (διόγκωση) και το απελευθερώνει (συρρίκνωση) υπό εξωτερικά ερεθίσματα (Kuang et al., 2023). Ένα υγρό περιβάλλον συνιστά ένα κοινό ερέθισμα κυρίως για υλικά υδρογέλης.

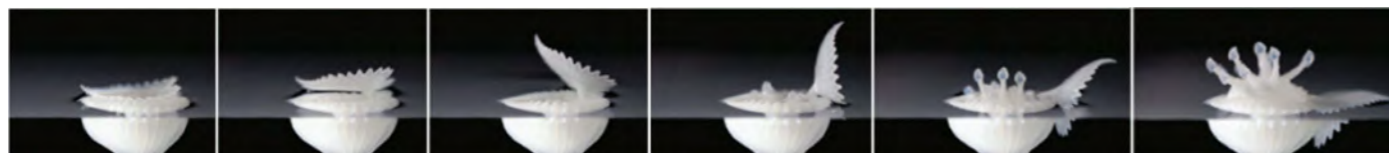


Μετά την 3D εκτύπωση με FDM το λουλούδι από υδρογέλη ξηραίνεται σε θερμοκρασία δωματίου για να ξεκινήσει η μορφοποίηση και ακολουθεί σταυροσύνδεση για μεγιστοποίηση και σταθεροποίηση του τρισδιάστατου σχήματος. Κατά την ενυδάτωση αναπτύσσεται σε επίπεδη διαμόρφωση και κατά τη ξήρανση (αφυδάτωση) ανακάτ το τρισδιάστατο σχήμα του.

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518307032>

### ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

Η μηχανική δύναμη, όπως η πίεση πεπιεσμένου αέρα, η οσμωτική πίεση ή η καταπόνηση (λυγισμός/ συμπίεση), αποτελεί ένα κοινό ερέθισμα για πολλά από τα έξυπνα υλικά. Υδρογέλες και SMP έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στην πίεση πεπιεσμένου αέρα. Παράδειγμα αποτελεί το SMP που μπορεί να μετατραπεί σε ένα σύνθετο τρισδιάστατο σχήμα με ισχυρές μηχανικές ιδιότητες, ανταποκρινόμενο σε αυτό το ερέθισμα (Zhang et al., 2021), αλλά και τα υδρόφυτα, εκτυπωμένα με PolyJet, τα οποία διαστέλλονται μέσω της πίεσης του αέρα (Tee & Tran, 2021).



4D εκτυπωμένο υδρόφυτο το οποίο αποκρίνεται στην πίεση του αέρα.

Πηγή: [https://www.researchgate.net/publication/355678239\\_On\\_bioinspired\\_4d\\_printing\\_materials\\_design\\_and\\_potential\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/355678239_On_bioinspired_4d_printing_materials_design_and_potential_applications)

### ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Το μαγνητικό πεδίο ή η μαγνητική ενέργεια είναι ένα ακόμα ερέθισμα που μπορεί να φέρει παραμόρφωση στα έξυπνα υλικά. Το μαγνητικό πεδίο προσφέρει μια μη παρεμβατική διέγερση, καθώς η μαγνητική ενεργοποίηση δεν χρειάζεται καμία φυσική επαφή. Τα υλικά με μαγνητική απόκριση αναπτύσσονται συνήθως με την ενσωμάτωση σωματιδίων που αποκρίνονται σε μαγνητική ενέργεια σε μια μαλακή μήτρα. Οι 4D εκτυπωμένες δομές, που χρησιμοποιούν υλικά ανταποκρινόμενα στον μαγνητισμό, έχουν τεράστιες δυνατότητες στον τομέα της εκτύπωσης μετάλλων και πολυμερών. Προϋπόθεση αποτελεί το χαμηλό βάρος της εκτύπωσης, ώστε να μπορεί να επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο.



Το σύνθετο υλικό PDMS/Fe "ανοίγει" παρουσία μαγνητικού πεδίου και "κλείνει" με την απομάκρυνσή του.

Πηγή: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.8b12853>

### ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως έναυσμα για απόκριση. Η αλλαγή και η ανάκτηση σχήματος ή ιδιοτήτων των ηλεκτροανταποκρινόμενων υλικών (electroactive) προκαλείται από την επαγόμενη από τον ηλεκτρισμό θερμότητα μετά την εφαρμογή συγκεκριμένης τάσης, η οποία υπερβαίνει τη θερμοκρασία μετάβασης και διεγείρει τα υλικά που ανταποκρίνονται στα ερεθίσματα. Η θερμική αγωγή συμπεριφορά των ηλεκτροανταποκρινόμενων υλικών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη μνήμης σχήματος σε πολύ σύντομο διάστημα με γρήγορη επαναφορά (Sheikh et al., 2023).

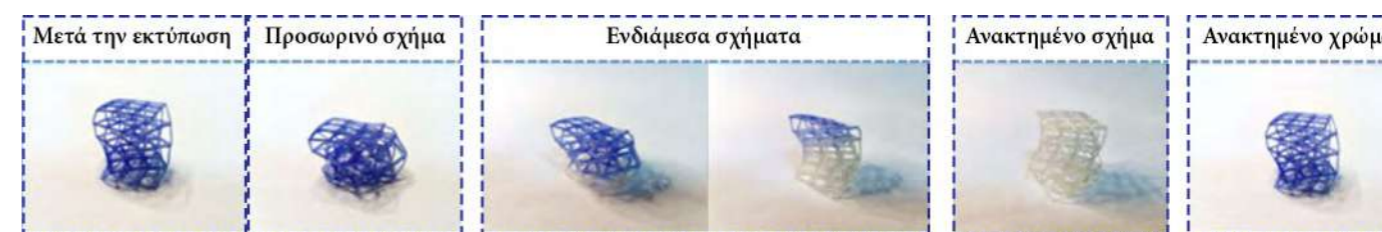


Οι 4D δομές από PLA και νανოსύρματα αργύρου (Ag-NW) παραμορφώνονται ανάλογα την τάση. Το λουλούδι σχεδιάστηκε με πέντε πέταλα, τα οποία μπορούν να επεκταθούν μεμονωμένα ή και μαζί, με ταυτόχρονη εφαρμογή της τάσης.

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431620301139>

### ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ

Τέλος, η εκτυπωμένη δομή μπορεί να αντιδρά σε περισσότερα του ενός ερεθίσματα, ανάλογα με τη σύνθεση και τον προγραμματισμό της.



Διαδικασία μνήμης σχήματος-χρώματος τρισδιάστατων εκτυπωμένων πολύπλοκων δομών

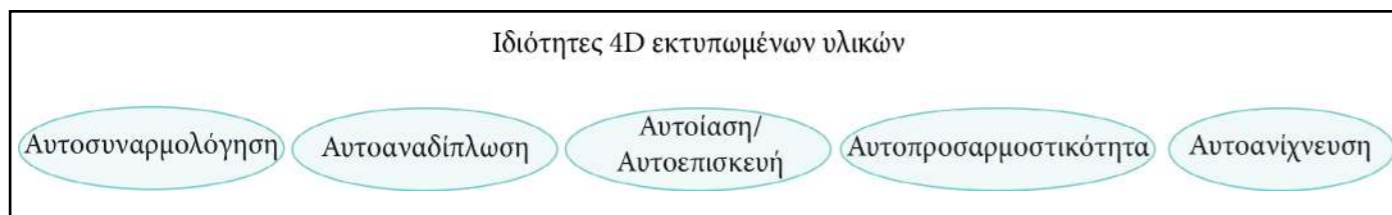
Πηγή: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.1c02656>



**ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ 4D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Σε μία προσέγγιση βασισμένη στον σχεδιασμό, το επίκεντρο θα μπορούσε να μετατοπιστεί στην προβλεπόμενη απόκριση των 4D εκτυπώσιμων υλικών στα εξωτερικά ερεθίσματα, απαντώντας στο ερώτημα τι θέλουμε να κάνει ένα υλικό. Ομοίως και στον τομέα της μόδας θα μπορούσαμε να κατηγοριοποιήσουμε τα έξυπνα υλικά με όρους δράσης. Αυτή η προσέγγιση είναι πολύ χρήσιμη στον σχεδιαστή, όταν αξιολογεί τη χρήση των έξυπνων υλικών σε σχέση με το περιβάλλον τους.

Προσεγγίζοντας, λοιπόν, τα έξυπνα υλικά με όρους δράσης, η πλειοψηφία των υλικών που ανταποκρίνονται στα ερεθίσματα παρουσιάζουν αλλαγές στο σχήμα, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες. Το αποτέλεσμα της ανταπόκρισης πάνω στο ίδιο το υλικό μπορεί να οδηγήσει σε αυτοσυναρμολόγηση, αυτοαναδίπλωση, αυτοϊαση, αυτοπροσαρμοστικότητα και αυτοανίχνευση (Sheikh et al., 2023). Η βασική δύναμη αυτών των υλικών που ανταποκρίνονται στα ερεθίσματα είναι η προ-προγραμματισμένη απόκρισή τους, καθιστώντας τα ιδανικά για έξυπνες εφαρμογές (Zafar & Zhao, 2020).

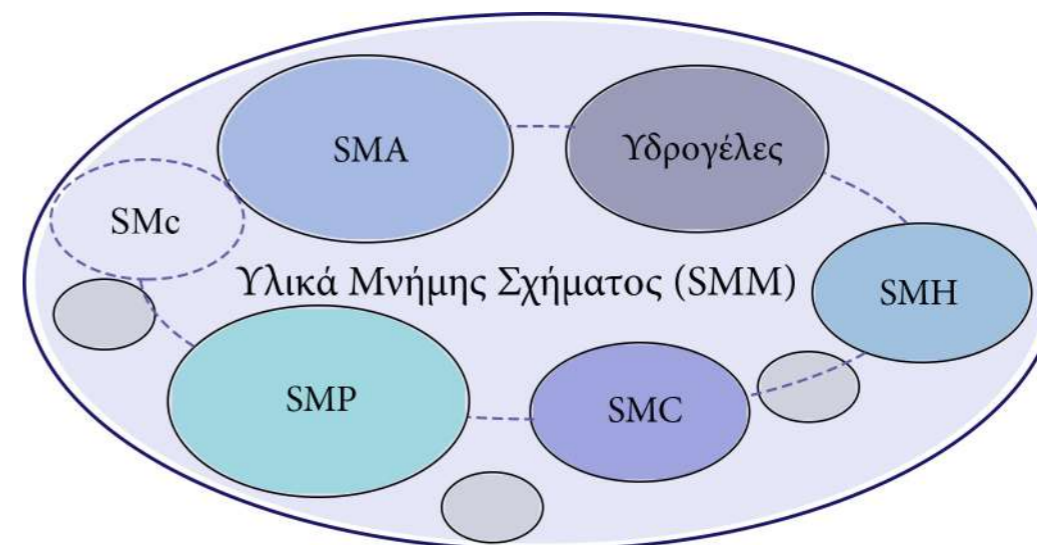


Αυτοσυναρμολόγηση κατά την ανακίνηση της φιάλης.  
 Το ενεργό origami ενεργοποιείται με τη θερμοκρασία και αποκτά 3D δομή από "Digital SMP".  
 Αυτοθεραπεία που πραγματοποιείται με θέρμανση στους 80° για 20 λεπτά, και ψύξη στον αέρα.  
 Πηγές: <https://metropolismag.com/viewpoints/skylar-tibbits-materials-science/>  
<https://metropolismag.com/viewpoints/skylar-tibbits-materials-science/>  
[https://www.frontiersin.org/files/Articles/873453/fbioe-10-873453-HTML/image\\_m/fbioe-10-873453-g003.jpg](https://www.frontiersin.org/files/Articles/873453/fbioe-10-873453-HTML/image_m/fbioe-10-873453-g003.jpg)

**ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SHAPE MEMORY EFFECT - SME)**

Η δυνατότητα ενός υλικού να ανακτήσει το πρωτεύον μέγεθος και σχήμα του υπό ορισμένες συνθήκες μετά από σημαντική παραμόρφωση ονομάζεται φαινόμενο μνήμης σχήματος (SME). Το φαινόμενο επιτρέπει στα υλικά να λαμβάνουν και να διατηρούν ένα επιθυμητό, προσωρινό σχήμα, έως ότου εφαρμοστεί ένα συγκεκριμένο εξωτερικό ερέθισμα για να ενεργοποιηθεί η ανάκτηση του αρχικού, μόνιμου σχήματος. Το φαινόμενο της μνήμης σχήματος δεν είναι μια εγγενής ιδιότητα του υλικού που μπορεί αυτόνομα να αλλάξει σχήμα χωρίς εξωτερική βοήθεια, αλλά μπορεί να ενσωματωθεί σε αυτό μέσω συνθετικού σχεδιασμού και επιλεκτικών προσθέτων. Η σταθερότητα και η ανάκτηση σχήματος είναι οι παράμετροι για την εκτίμηση της απόδοσης της μνήμης σχήματος. Τα τυπικά ερεθίσματα για την ενεργοποίηση της μνήμης σχήματος περιλαμβάνουν την αλλαγή θερμοκρασίας, το φως, τα χημικά (π.χ. νερό/υγρασία, αιθανόλη, αλλαγή pH), τη μηχανική τάση, τα μαγνητικά πεδία (Yu et al., 2015)

Τα έξυπνα υλικά που χαρακτηρίζονται από εφέ μνήμης σχήματος που τους επιτρέπει να ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα αφού παραμορφωθούν, ονομάζονται υλικά μνήμης σχήματος (Shape memory materials- SMM) (Zafar & Zhao, 2020). Τα υλικά μνήμης σχήματος ταξινομούνται ως πολυμερή μνήμης σχήματος (SMP), κράματα μνήμης σχήματος (SMA), κεραμικά με μνήμη σχήματος (SMC), υβρίδια μνήμης σχήματος (SMH), τζελ μνήμης σχήματος (SMG) (Momeni et al., 2019) και σύνθετα υλικά μνήμης σχήματος (SMc). Τα SMA και τα SMP είναι τα πιο διαδεδομένα, λόγω της εξαιρετικής μνήμης σχήματος και των χαρακτηριστικών ανάκτησης σχήματος.



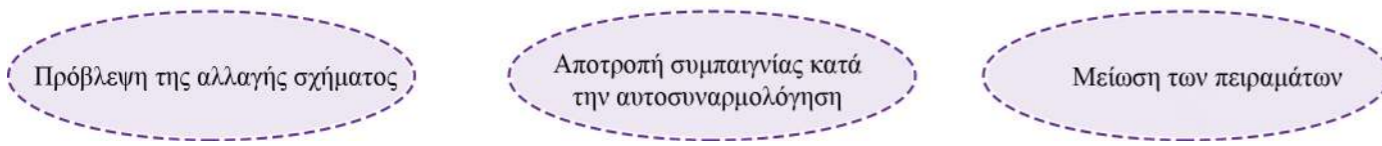
**ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

Μετά την επιλογή του υλικού, το λογισμικό διαδραματίζει βασικό ρόλο στην διαδικασία της εκτύπωσης. Η 4D εκτύπωση απαιτεί περαιτέρω εξέλιξη του λογισμικού μοντελοποίησης σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Ο σχεδιασμός είναι πολύ σημαντικός, καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο στον μετασχηματισμό των 4D δομών.

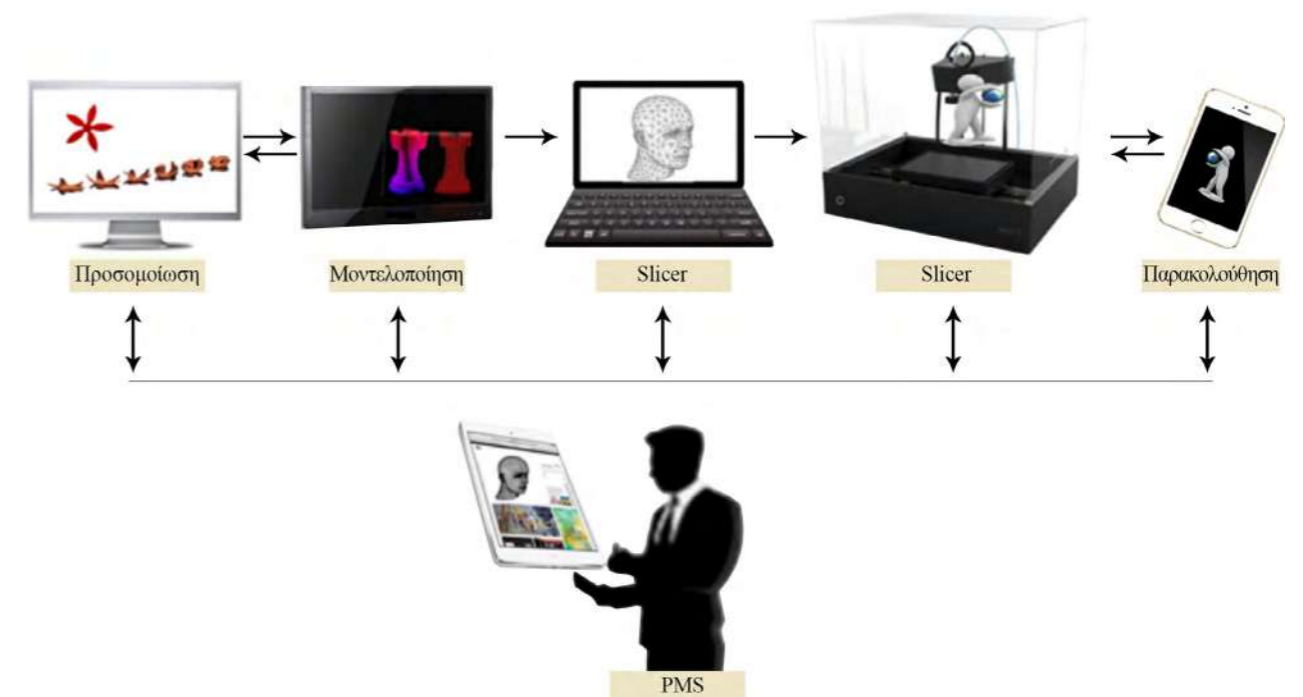
Μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η 4D εκτύπωση είναι η έλλειψη γνώσης της συμπεριφοράς των 4D εκτυπωμένων εξαρτημάτων (Ahmed et al., 2021). Προκειμένου να δημιουργηθούν 4D δομές που ανταποκρίνονται σε κάποιο ερέθισμα, χρειάζεται να κατανοηθεί εις βάθος το υλικό και οι ιδιότητές του, αλλά και οι διαδικασίες κατασκευής. Κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να επιτευχθεί από τους χρήστες της 4D εκτύπωσης, ιδίως για νέα υλικά με περιορισμένη εφαρμογή. Επιπλέον, η διαδικασία είναι αρκετά περίπλοκη δεδομένου ότι μπορεί να συντελούνται θερμικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές, χημικές, φωτοχημικές αντιδράσεις ή συνδυασμός αυτών. Ο σχεδιασμός που βασίζεται στη διαίσθηση είναι κουραστικός και το εύρος των δυνατοτήτων κάθε σχεδίου μεγάλο, λόγω των πολλών παραμέτρων που πρέπει να ρυθμιστούν (Kuang et al., 2023).

Για τον λόγο αυτό, χρειάζεται ένα λογισμικό σχεδίασης, το οποίο θα είναι σε θέση να προβλέπει τη συμπεριφορά του υλικού και μέσω επαναληπτικών προσομοιώσεων να προτείνει τη βέλτιστη λύση. Επομένως, το 4D λογισμικό θα πρέπει να συνδεθεί με τη μαθηματική μοντελοποίηση και την πρόβλεψη συμπεριφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εξελεγμένων μοντέλων και τοπολογικών μετασχηματισμών για την αντιμετώπιση των περιορισμών κατασκευής και υλικού (Vatanparast et al., 2023). Όταν υπάρχουν πολλαπλά υλικά (ενεργά και παθητικά) η μαθηματική μοντελοποίηση συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού προσδιορίζοντας τη θέση των υλικών στη δομή, ώστε να προβλέπεται η χρονικά εξαρτώμενη αλλαγή σχήματος, να αποτρέπεται η σύμπτωση μεταξύ εξαρτημάτων κατά την αυτοσυναρμολόγηση και να μειώνονται τα πολυάριθμα πειράματα.

**Μαθηματική μοντελοποίηση στην 4D εκτύπωση**



Σε αυτή την κατεύθυνση προτάθηκε η χρήση διαφορετικών λογισμικών που θα αφορούν διαφορετικά στάδια της 4D εκτύπωσης: Προσομοίωση, Μοντελοποίηση, Slicer, Υλικολογισμικό (firmware), Παρακολούθηση και διαχείριση εκτύπωσης (PMS). Αρχικά, το λογισμικό προσομοίωσης θα μειώσει τον κίνδυνο αστοχίας πριν από την πραγματική ανάπτυξη του προϊόντος. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, χρειάζεται λογισμικό μοντελοποίησης για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση του αντικειμένου. Στη συνέχεια, απαιτείται λογισμικό slicer για την εξαγωγή του αρχείου G-code, το οποίο είναι αναγνώσιμο από τους εκτυπωτές. Μόλις καθοριστεί η τρισδιάστατη διαδικασία παραγωγής, το λογισμικό κεντρικού υπολογιστή στρωματοποιεί το πραγματικό αντικείμενο σύμφωνα με το G-code. Κατά την διάρκεια που το 4D προϊόν δημιουργείται από την τρισδιάστατη εκτύπωση με την πάροδο του χρόνου, το λογισμικό παρακολούθησης παρατηρεί τη διαδικασία αυτομετασχηματισμού και πραγματοποιεί τις κατάλληλες ενέργειες, εάν χρειάζεται. Ταυτόχρονα, όλα τα λογισμικά ελέγχονται από έναν χρήστη μέσω του λογισμικού διαχείρισης εκτύπωσης (printing management software- PMS) που είναι συνδεδεμένο στο λογισμικό κάθε σταδίου για την παρακολούθηση όλων των διαδικασιών (Chung et al., 2017).

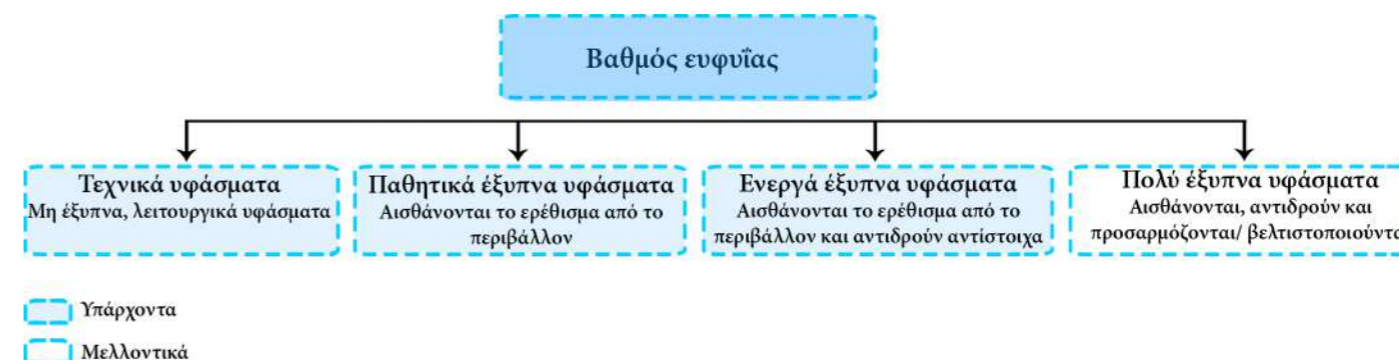


Τα διαφορετικά λογισμικά της 4D εκτύπωσης (Εικόνα ιδιόχειρης επεξεργασίας)

## Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ 4D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΛΩΣΤΟΥΨΑΝΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΜΟΔΑ

Οι εφαρμογές της 4D εκτύπωσης έχουν επεκταθεί και στις βιομηχανίες της μόδας και της κλωστοϋφαντουργίας. Τα προϊόντα σχεδιάζονται ώστε να ανταποκρίνονται στο περιβάλλον τους και επιπλέον στον σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη οι επιθυμίες του χρήστη (π.χ. προγραμματισμός προσωρινού σχήματος). Έχουν γίνει προσπάθειες δημιουργίας δυναμικών προϊόντων μόδας, αφού μελετήθηκαν και εξασφαλίστηκαν οι βέλτιστες συνθήκες 4D εκτύπωσης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την 4D εκτύπωση, έχουν δημιουργηθεί ενδύματα, υποδήματα και κοσμήματα τα οποία ανταποκρίνονται στο περιβάλλον τους.

Τα υφάσματα θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την ευφυΐα τους, όπως φαίνεται παρακάτω (Van Langenhove et al., 2007, Wu & Li, 2019):



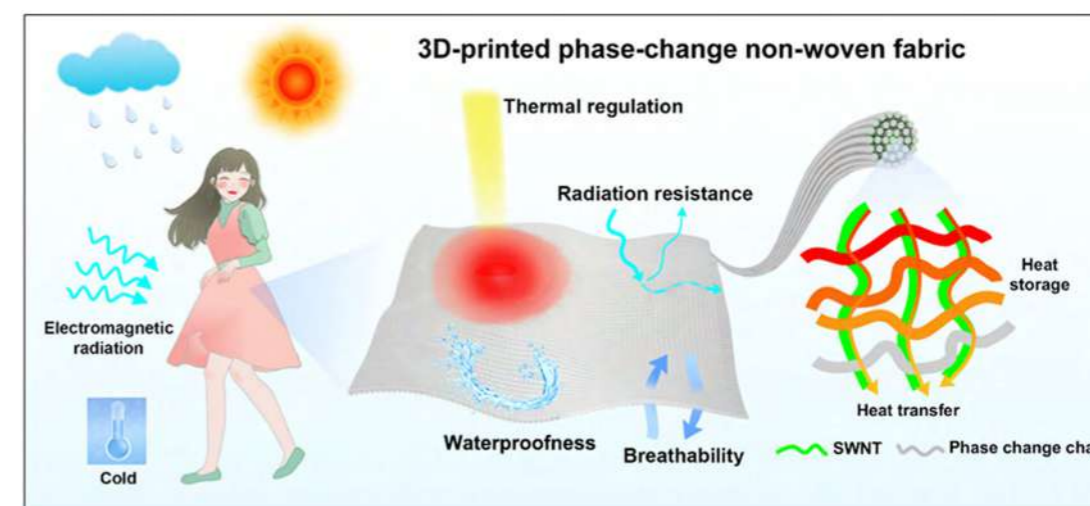
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

### Η ΥΠΕΡΒΑΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΩΣΤΟΥΨΑΝΤΟΥΡΓΙΑ

Στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας, η έρευνα επικεντρώνεται στη δημιουργία έξυπνων υφασμάτων. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM: D8248-20, το έξυπνο ύφασμα (smart textile, intelligent textile, intelligent textile system, smart textile system) αναφέρεται σε μια ίνα, νήμα, ύφασμα ή τελικό προϊόν με μία ή περισσότερες ιδιότητες που αλλάζουν ανάλογα με τον σχεδιασμό ως απόκριση σε ερεθίσματα, όπως μηχανικές, θερμικές, χημικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές ή άλλες πηγές (ASTM, 2000). Τα έξυπνα υφάσματα γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ διαδραστικότητας και διασυνδεσιμότητας, αντιδρούν σε εξωτερικά ερεθίσματα, αλλά δεν φέρουν απαραίτητα κάποιο ηλεκτρονικό εξάρτημα. Συνεπώς, έχουν εισάγει τη διάσταση του χρόνου, ξεπερνώντας τη διδιάστατη ή την τρισδιάστατη δομή τους.

Τα τεχνικά υφάσματα (technical textile) είναι ένας ευρύς όρος για ίνες, νήματα, ύφασμα ή τελικό προϊόν που χρησιμοποιείται για εφαρμογές όπου η λειτουργική απόδοση είναι πρωταρχικής σημασίας. Στην κατηγορία αυτή, το ύφασμα παρέχει λειτουργικότητα λόγω εγγενών ιδιοτήτων υλικού ή/και εφαρμοσμένης επεξεργασίας. Τα έξυπνα υφάσματα διαφέρουν από τα τεχνικά υφάσματα στο ότι οι ιδιότητες του υφάσματος αλλάζουν ως απόκριση σε ένα ερέθισμα. Για παράδειγμα, ένα θερμοχρωμικό ύφασμα που αλλάζει χρώμα ως απόκριση στη θερμότητα είναι ένα έξυπνο ύφασμα. Αντίθετα, τα υδατοαποθητικά, τα ανθεκτικά στη φλόγα και τα αντιμικροβιακά υφάσματα που παρέχουν λειτουργική απόδοση έναντι συγκεκριμένων ερεθισμάτων, χωρίς να μεταβάλλονται οι ιδιότητες του υφάσματος, είναι τεχνικά υφάσματα (ASTM, 2000).

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει επιτευχθεί η δημιουργία τρισδιάστατα εκτυπωμένων λειτουργικών ενδυμάτων (Eom et al., 2019, Hong & Lee, 2020). Μελετητές δημιούργησαν ένα ύφασμα PCNF (φωσφορυλιωμένη ίνα κυτταρίνης) με ομοιόμορφα διασκορπισμένους SWNT (νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος) με την τεχνολογία FDM. Το τρισδιάστατα εκτυπωμένο ύφασμα που προέκυψε αναπνέει, είναι στεγανό και εξαιρετικά ανθεκτικό, ενώ μπορεί να συλλέξει αποτελεσματικά θερμότητα και να την αποθηκεύσει. Ακόμα, είναι εύκολο να απορροφηθούν και να ανακλαστούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, για να επιτευχθεί ηλεκτρομαγνητική θωράκιση, η οποία οδηγεί σε εξαιρετική θερμική προσαρμογή και αντίσταση στην ακτινοβολία των υφασμάτων ενδυμάτων από PCNF (Yang et al., 2022).

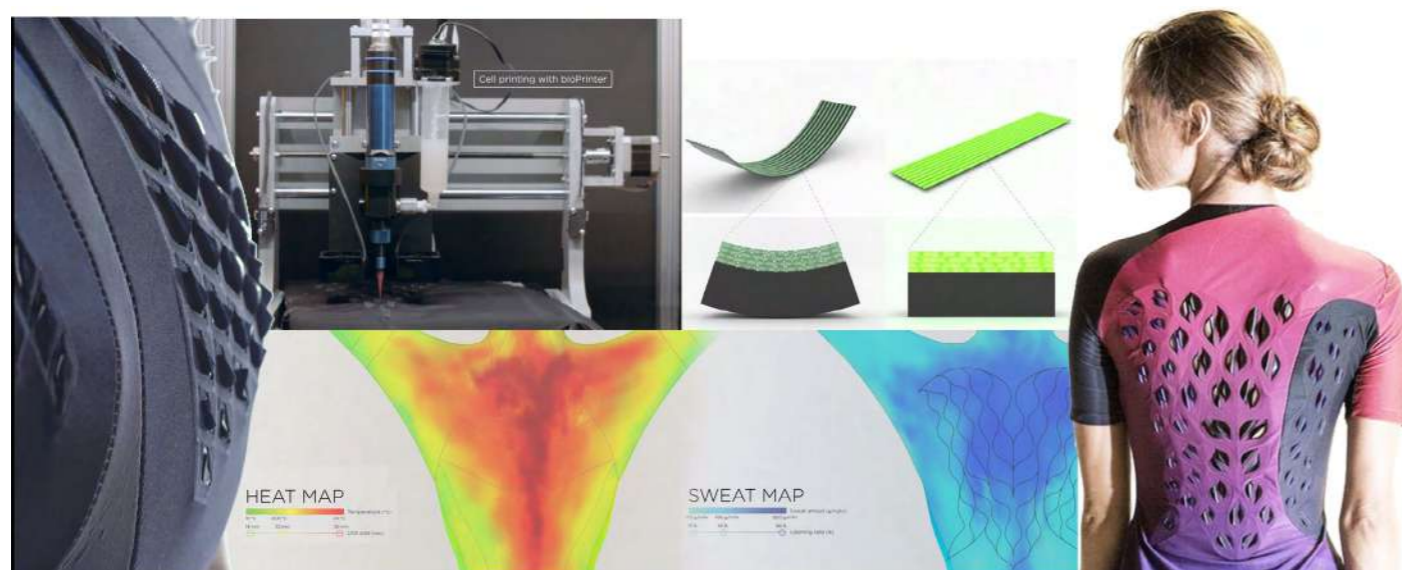


Τρισδιάστατα εκτυπωμένο ύφασμα αλλαγής φάσης.  
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.1c21778>

Μια άλλη ομάδα ερευνητών σχεδίασε ένα ρούχο προπόνησης που αναπνέει. Τα πτερύγια αερισμού που διαθέτει ανοίγουν, όταν ένας αθλητής ιδρώνει και κλείνουν, όταν το σώμα έχει κρυώσει. Τα πτερύγια έχουν κυμαινόμενο μέγεθος και είναι επενδεδυμένα με ζωντανά μικροβιακά κύτταρα που συρρικνώνονται και διαστέλλονται ως απόκριση στις αλλαγές της υγρασίας. Τα κύτταρα λειτουργούν ως μικροσκοπικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές, οδηγώντας στην μεταβολή της θέσης των πτερυγίων. Τα ευαίσθητα στην υγρασία κύτταρα είναι ασφαλή για το σώμα και μπορούν με τα νέα εργαλεία γενετικής μηχανικής να συμπεριλάβουν και άλλες λειτουργίες, όπως ο φωτισμός σε συνθήκες υγρασίας.

Για τη διαδικασία ανέπτυξαν μια μέθοδο κυτταρικής εκτύπωσης με βιοεκτυπωτή και εκτύπωσαν *E. coli* σε φύλλα ακατέργαστου, φυσικού λατέξ. Μετά από πολλαπλή έκθεση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες υγρασίας, δεν παρουσιάστηκε δραματική υποβάθμιση στην απόδοση.

Το μέγεθος και ο βαθμός στον οποίο ανοίγει κάθε πτερύγιο προέκυψε μετά από ανάλυση για το πού και σε τι βαθμό το σώμα παράγει θερμότητα και ιδρώτα. Κατά την προπόνηση, το άνοιγμα των πτερυγίων αφαίρεσε αποτελεσματικά τον ιδρώτα από το σώμα μειώνοντας τη θερμοκρασία του δέρματος (Chu, 2017).



Ρούχο που ανταποκρίνεται στη θερμότητα και τον ιδρώτα του σώματος. Η αναστρέψιμη συμπεριφορά κάμψης των πτερυγίων στο βιοϋβριδικό ύφασμα διπλής στρώσης προκαλείται από την εφίδρωση και τη θερμότητα του σώματος.

Πηγή: <https://news.mit.edu/2017/moisture-responsive-workout-suit-0519>

Η 4D εκτύπωση έχει εφαρμοστεί και στη δημιουργία υποδημάτων. Παράδειγμα αποτελεί το τρισδιάστατο εκτυπωμένο τακούνι από SMP με χρήση της μεθόδου DLP. Το πολυλειτουργικό παπούτσι έχει σχεδιαστεί για να έχει ένα τακούνι που θα προσαρμόζει το ύψος του. Το έξυπνο υλικό είναι προσαρτημένο κοντά στη φτέρνα πάνω από το στρώμα επαφής με το δάπεδο, ώστε να μην παρεμβαίνει στο βάδισμα. Όταν ο χρήστης θέλει να υψώσει το τακούνι, θερμαίνει το έξυπνο υλικό με ένα τυπικό στεγνωτήριο χεριών. Στο παράδειγμα αυτό το παπούτσι έχει εκτυπωθεί εξολοκλήρου τρισδιάστατα, ενώ μόνο το τακούνι τυπώθηκε με έξυπνα θερμοαποκρινόμενα υλικά, τονίζοντας την ευελιξία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Zarek et al., 2016).



Τρισδιάστατο εκτυπωμένο παπούτσι με προσάρτημα φτέρνας, το οποίο μεταρπέεται σε τακούνι. Η σχεδίαση έγινε σε Solidworks  
Πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2016.1244085>

Επιπλέον, έχουν κατασκευαστεί κοσμημάτα που προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, χρησιμοποιώντας τεχνικές 4D εκτύπωση. Παράδειγμα εφαρμογής αποτελούν τα εξατομικευμένα δυναμικά δακτυλίδια από SMP με τη μέθοδο DLP (Zarek et al., 2016). Αυτά, ανταποκρίνονται στη θερμοκρασία “ανθίζοντας” όταν θερμαίνονται πάνω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του πολυμερούς. Τα δακτυλίδια εκτυπώθηκαν, συναρμολογήθηκαν, δέχτηκαν επεξεργασία και απέκτησαν το προσωρινό τους σχήμα. Κατά την έκθεση στη θερμότητα τα πέταλα των λουλουδιών ανοίγουν επιστρέφοντας στο αρχικό τους σχήμα τους.



4D εκτυπωμένα δακτυλίδια από SMP εμπνευσμένα από τα λουλούδια. Η πάνω σειρά απεικονίζει το μόνιμο σχήμα ενώ η κάτω το προσωρινό. Όταν θερμαίνονται πάνω από τη θερμοκρασία τήξης, οι δομές που διαθέτουν μνήμη σχήματος ανακτούν το μόνιμο σχήμα τους. Η σχεδίαση έγινε σε Rhino3D (Zarek et al., 2016).

Πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2016.1244085>

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

Συμπερασματικά, η 4D εκτύπωση είναι μια τεχνολογία αιχμής που συνδυάζει τα έξυπνα υλικά και την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη δημιουργία δυναμικών μορφών. Πρόκειται για μια ανώτερη τεχνολογία σε σύγκριση με την παραδοσιακή διαδικασία παραγωγής όσον αφορά την ποιότητα και την απόδοση του προϊόντος, ενώ παρέχει αυξημένη συνέπεια και αξιοπιστία ως συμπλήρωμα της 3D εκτύπωσης.

Τα 4D εκτυπωμένα προϊόντα μπορούν να επηρεάσουν εκπληκτικά την καθημερινή ζωή των ανθρώπων, καθώς έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Η εκτύπωση τεσσάρων διαστάσεων επιτρέπει τη δημιουργία έξυπνων προγραμματιζόμενων δομών με λειτουργίες όπως αυτοανίχνευση, αυτοσυναρμολόγηση, αυτομορφοποίηση, αυτοθεραπεία, αυτόματη αναδίπλωση και αυτοανάκτηση.

Η τρέχουσα εφαρμογή της 4D εκτύπωσης επικεντρώνεται κυρίως στην ικανότητά της να αλλάζει σχήμα, αλλά στο μέλλον μπορούν να ανακαλυφθούν διάφορες άλλες λειτουργίες των 4D εκτυπωμένων δομών. Η ποικιλόμορφη απόκριση των 4D εκτυπωμένων υλικών στα ερεθίσματα, που έχει αρχίσει ήδη να κάνει την εμφάνισή της, μπορεί να οδηγήσει επίσης σε πολυλειτουργικές εφαρμογές.

Για την 4D εκτύπωση χρησιμοποιούνται κυρίως οι τεχνικές SLA, DIW, FDM, SLS και inkjet. Με αυτές, μπορούν να κατασκευαστούν 4D δομές από πολλαπλά υλικά, μεμονωμένα ενεργά υλικά και μη ενεργά υλικά. Περαιτέρω τροποποίηση στις τεχνικές εκτύπωσης μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία πιο σύνθετων δομών με καλύτερους χρόνους εκτύπωσης, γρήγορη απόκριση στα ερεθίσματα και πλήρη αναστρεψιμότητα. Πρόκειται για έναν τομέα ο οποίος έχει κερδίσει το ενδιαφέρον σχεδιαστών, ερευνητών, μηχανικών και επιστημόνων υλικών, ενώ ο πειραματισμός στα διαφορετικά ερεθίσματα, στα υλικά και στις μεθόδους εκτύπωσης έχει ανοίξει το δρόμο σε διάφορα πεδία εφαρμογής.

Επιπλέον, η 4D εκτύπωση μπορεί να βοηθήσει στην απλοποίηση του σχεδιασμού των τρισδιάστατα εκτυπωμένων προϊόντων. Παράδειγμα αποτελούν οι τυπωμένες ενεργές δομές origami. Αυτές θα μπορούσαν να εκτυπωθούν σε επίπεδο σχήμα για την ευκολία μεταφοράς σε περιορισμένο χώρο, προτού ενεργοποιηθούν στον καθορισμένο χρόνο και τοποθεσία. Ως εκ τούτου, το κόστος υλικοτεχνικής υποστήριξης θα μειωθεί, καθώς τα εκτυπωμένα προϊόντα θα αποθηκεύονται όσο το δυνατόν πιο συμπαγή πριν ενεργοποιηθούν σε πλήρη όγκο και

λειτουργικότητα. Αυτό μπορεί να είναι πολλά υποσχόμενο και για ρούχα που αντιδρούν σε ακραία περιβάλλοντα και απελευθερώνουν προϊόντα που μπορεί να προστατεύουν τους χρήστες από επικίνδυνα περιβάλλοντα.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η 4D εκτύπωση είναι μια σχετικά νέα ερευνητική περιοχή και επομένως οι διεπιστημονικές πτυχές της σχέσης υλικού-σχεδιασμού-λειτουργικότητας δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως. Αυτή η έλλειψη εμποδίζει τον ορθολογικό σχεδιασμό των επιθυμητών 4D εκτυπωμένων δομών και τις ευρύτερες εφαρμογές τους, από την κατάλληλη επιλογή τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης και έξυπνων υλικών μέχρι τον σχεδιασμό και τα χρησιμοποιούμενα ερεθίσματα. Καθώς τα έξυπνα υλικά αποτελούν το επίκεντρο της 4D εκτύπωσης, χρειάζεται να γίνει περισσότερη έρευνα στη βελτίωση των υπαρχόντων υλικών, αλλά και στη δημιουργία νέων, που θα είναι σε θέση να εκτυπωθούν τρισδιάστατα συμβάλλοντας στην ανακάλυψη ατελείωτων δυνατοτήτων σε άγνωστες, μέχρι ώρας, περιοχές.

Επίσης, οι 4D δομές είναι πολύπλοκες και απαιτητικές στον σχεδιασμό. Τα μη ολοκληρωμένα σχεδιαστικά προγράμματα, που δεν είναι ικανά να ανταποκριθούν σε κάθε έξυπνο υλικό και να προβλέψουν την απόκρισή τους σε συγκεκριμένο εξωτερικό ερέθισμα, σε συνδυασμό με την έλλειψη σφαιρικών γνώσεων, περιορίζουν το κοινό που θα χρησιμοποιήσει αυτή την τεχνολογία. Ένας ακόμα περιοριστικός παράγοντας για όσους επιθυμούν να ασχοληθούν με την 4D εκτύπωση, είναι το υψηλό κόστος.

Τέλος, η 4D εκτύπωση έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον και στη βιομηχανία της μόδας. Τα τρισδιάστατα αυτοματοποιημένα προϊόντα μόδας έχουν αρχίσει να ενσωματώνουν νέες λειτουργίες, ανταποκρινόμενα δυναμικά στις εκάστοτε συνθήκες σε πραγματικό χρόνο και επεκτείνοντας σημαντικά τις δυνατότητες των παραδοσιακών και τρισδιάστατα εκτυπωμένων προϊόντων. Υλικά που έχουν την ικανότητα να αλλάζουν σχήμα, χρώμα, σκληρότητα ή διαφάνεια και αυτοθεραπευόμενα υλικά, που μπορούν να επουλώσουν κατεστραμμένα μέρη, όταν εκτίθενται σε συγκεκριμένα ερεθίσματα, αναμένεται να έχουν σημαντική θέση στη μόδα, βελτιώνοντας τη μορφή, τη λειτουργικότητα και την διάρκεια ζωής των προϊόντων μόδας. Η τεχνολογία 4D εκτύπωσης έχει τη δυνατότητα να παράγει ένα ευρύ φάσμα προϊόντων, όπως “έξυπνα” παπούτσια, ενδύματα και κοσμήματα, ενώ ήδη αρκετά 4D εκτυπωμένα προϊόντα μόδας εμφανίζονται σε εμπορικούς ιστότοπους επιχειρήσεων (Nachtigall et al., 2018).

Η συνεχής πρόοδος της 4D εκτύπωσης μπορεί ακόμη και να μετατοπίσει το επίκεντρο της έρευνας, καθώς οι τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες επικεντρώνονται κυρίως στις αλλαγές σχήματος των εκτυπωμένων προϊόντων. Με τις πρόσθετες λειτουργίες, τα προς εκτύπωση προϊόντα μόδας, μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να αναδιαρθρώνονται συνεχώς, ώστε να ταιριάζουν στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον και όχι απλώς

για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Συνοψίζοντας, το μέλλον της 4D εκτύπωσης έγκειται στη δυνατότητα ελέγχου της συμπεριφοράς των εκτυπωμένων προϊόντων, στην αυτοματοποίηση των αντιδράσεών τους- χωρίς να χρειάζεται η ανθρώπινη αλληλεπίδραση-, στην επέκταση των ερεθισμάτων ενεργοποίησης των έξυπνων υλικών, στη δημιουργία νέων έξυπνων υλικών και στη δημιουργία λογισμικού μοντελοποίησης και προσομοίωσης μεταβαλλόμενου σχήματος. Μολονότι έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος, υπάρχει ακόμη πολλή ερευνητική δουλειά που πρέπει να γίνει προκειμένου να ξεπεραστούν οι διάφορες προκλήσεις.

Η τεχνολογία 4D εκτύπωσης απαιτεί πολυεπιστημονική γνώση. Η αυξημένη ζήτηση για τεχνολογική πρόοδο αναμένεται να βελτιώσει ταχύτατα την 4D εκτύπωση σε αυτό το ταχέως εξελισσόμενο κλίμα, λόγω των μοναδικών πλεονεκτημάτων που μπορεί να παρέχει. Σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες διεπιστημονικές συνεργασίες της, εκτιμάται ότι θα επιτύχει πρωτοποριακές καινοτομίες. Καθώς πρόκειται για μία τεχνολογία αιχμής που τώρα αναδύεται, δεν υπάρχουν ακόμη παγκόσμια πρότυπα που σχετίζονται με έξυπνα υλικά και τρισδιάστατη εκτύπωση. Ωστόσο, ένα πράγμα που μπορούμε να περιμένουμε στο εγγύς μέλλον είναι ότι η γκάμα και η ποικιλία των εκτυπώσιμων έξυπνων υλικών θα αυξηθεί, και οι ιδιότητες των τυπωμένων εξαρτημάτων θα βελτιωθούν.

Ξεκινώντας από τις ανάγκες των χρηστών και λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες του κλάδου, μια ολιστική, ανθρωποκεντρική προοπτική είναι το κλειδί για την ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων. Αναμένεται ότι με βάση τη διεπιστημονική ολοκλήρωση και την πλήρη συνεργασία επιστήμης και τεχνολογίας, οι έξυπνες τεχνολογίες και τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα θα επιτύχουν ταχύτερη και καλύτερη ανάπτυξη, προωθώντας έτσι τη βιώσιμη ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού.

Η δεύτερη ενότητα συνιστά την πρακτική εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Με βάση τα διαθέσιμα μέσα σχεδιάζονται και εκτυπώνονται τρισδιάστατα προϊόντα μόδας.

# B

# ΕΝΟΤΗΤΑ

---

## Πρακτική εφαρμογή

---

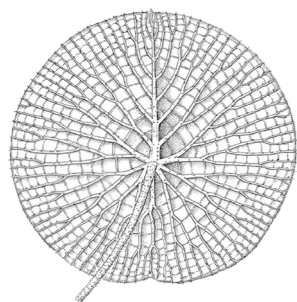
“The marriage of technology and fashion through 3D printing is transforming the way we design, produce, and experience clothing.”



Το τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αφορά το εγχείρημα δημιουργίας προϊόντων μόδας χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη εκτύπωση. Με έμπνευση από τη φύση και με τη χρήση παραμετρικού σχεδιασμού δημιουργούνται εξατομικευμένα, τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα μόδας.



## ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



“Δεν προσπαθώ να αντιγράψω τη φύση, προσπαθώ να βρω τις αρχές που χρησιμοποιεί”.

Buckminster Fuller

Η φύση αποτέλεσε και αποτελεί πηγή έμπνευσης και πεδίο έρευνας για την δημιουργία έξυπνων υλικών και δομών που μιμούνται τους φυσικούς οργανισμούς (βιομίμηση), προκειμένου να δώσουν λύσεις σε σχεδιαστικά προβλήματα. Στην προκειμένη μελέτη παραμετρικά μοτίβα σχεδιασμού εμπνευσμένα από δομή που υπάρχει στην φύση, αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για τη δημιουργία ενδυμάτων (2 ρούχα) και αξεσουάρ (2 κοσμήματα και μία ζώνη). Η σχεδιαστική πορεία ακολούθησε μία πολυεπίπεδη παραμετρική προσέγγιση.

## Αρχική ιδέα-Βιομίμηση

Στην πρακτική εφαρμογή αντικείμενο έμπνευσης αποτέλεσε το φύλλο του λωτού “Victoria Amazonica” της οικογένειας nymphaeacea και πιο συγκεκριμένα οι διακλαδώσεις που σχηματίζονται στην κάτω πλευρά του. Οι νευρώσεις που ξεκινούν από το κέντρο του φύλλου, λειτουργούν ως δομικό στοιχείο, στηρίζοντας το “γιγαντιαίο νούφαρο”, όπως αλλιώς είναι γνωστό.



Victoria Amazonica.

Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/imageo/6091912909>

Το φύλλο μπορεί να επεκταθεί έως 3m, ενώ το περίπλοκο δικτυωτό σύστημα συμβάλλει στην ομοιόμορφη κατανομή του βάρους του φυτού, επιτρέποντάς του να αντέξει βάρος έως 45 κιλά.

Αφού μελετήθηκε λεπτομερώς το σχέδιο διακλάδωσης, δημιουργήθηκε ο κανόνας του. Παρόλο που το κάθε νούφαρο είναι μοναδικό, όλα ακολουθούν το ίδιο μοτίβο διακλάδωσης. Ξεκινώντας από το κέντρο, οι “φλέβες” επεκτείνονται προς την περίμετρο του κύκλου αυξάνοντας συνολικά τις διακλαδώσεις τους, με βάση τον κανόνα:

$$\text{(διακλαδώσεις)} = 2 * (\text{αριθμός κύκλου}) - 2$$

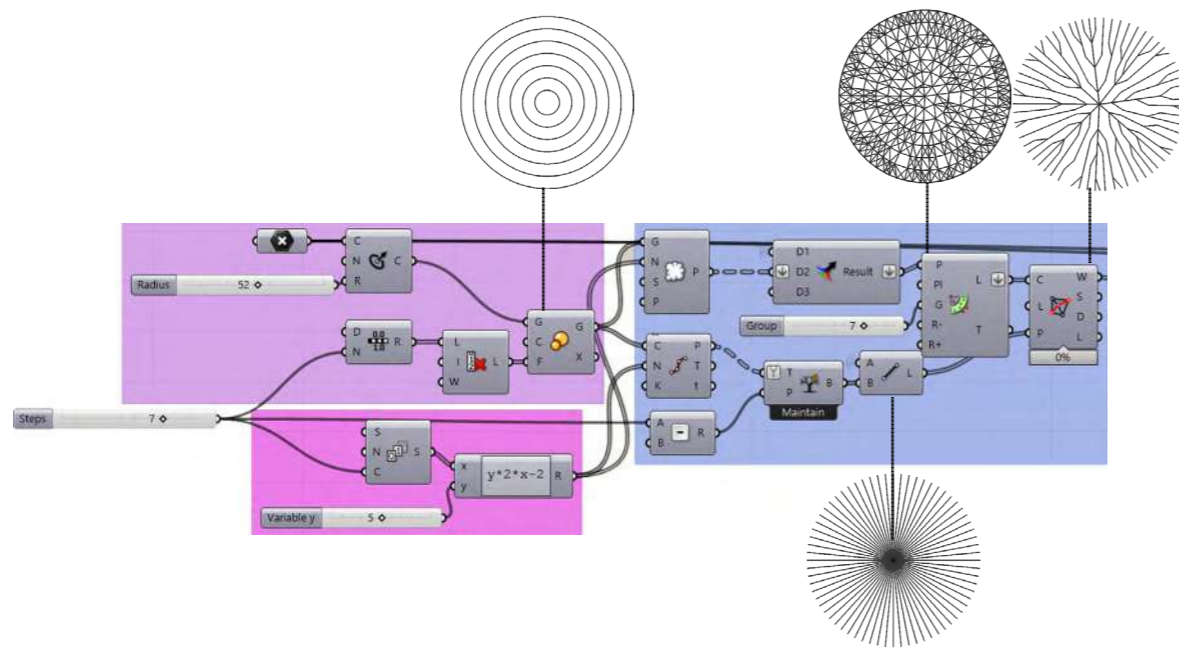
Συμπληρωματικά, όσον αφορά το πάχος τους, στα κεντρικά στελέχη κυμαίνεται γύρω στα 5 cm, ενώ σταδιακά μειώνεται καθώς απομακρύνονται από το κέντρο. Τέλος, προκειμένου να εξασφαλίσει τη μέγιστη σταθερότητα του φύλλου, οι διακλαδώσεις αυτές τέμνονται κάθετα από άλλες νευρώσεις .

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η συλλογιστική πορεία και ο παραμετρικός σχεδιασμός των διακλαδώσεων στο φύλλο του φυτού Victoria Amazonica. Αφού ολοκληρώθηκε η μελέτη του κανόνα, παραμετροποιήθηκε με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος Grasshopper (Rhino 3D). Το Rhinoceros 6.0 μαζί με το Grasshopper χρησιμοποιήθηκαν για μοντελοποίηση. Το Rhinoceros είναι ένα πρόγραμμα που βασίζεται στο NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) (Cheng 2014), ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται συνήθως στους τομείς της μόδας και του βιομηχανικού σχεδιασμού για τη φυσική του εμφάνιση στην έκφραση των καμπυλών. Το Grasshopper είναι ένα πρόγραμμα που ελέγχει την ποσότητα, τη θέση και το σχήμα που εμφανίζεται στο Rhinoceros μέσω της προσέγγισης ποσοτικοποίησης.

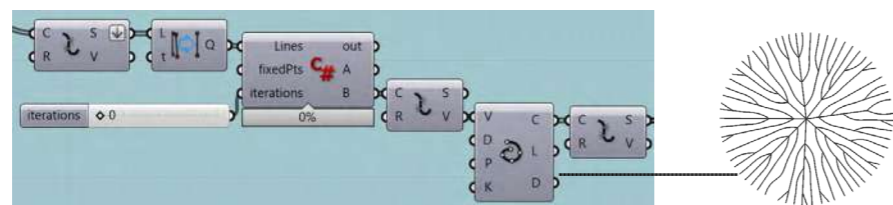
Δημιουργία κώδικα

“Το μέλλον της μόδας είναι ο κώδικας, όχι η ραπτική”.  
(Francis Bitonti, σχ.μόδας)

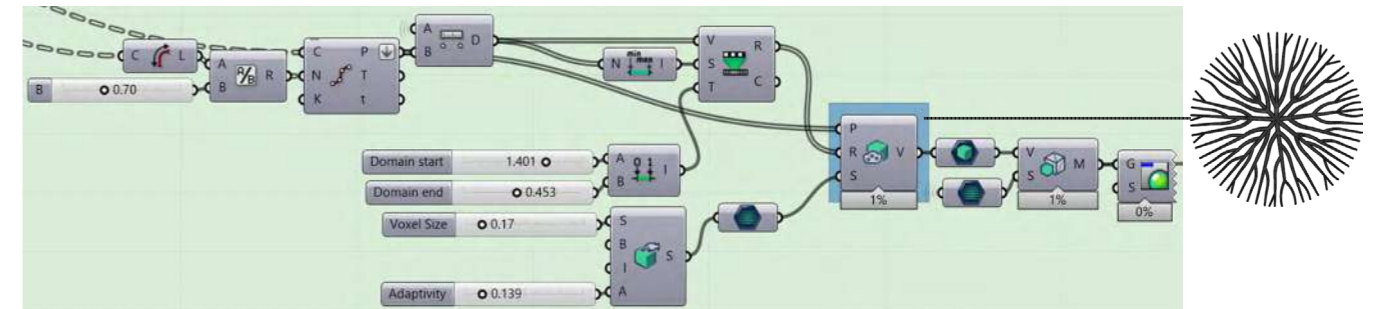
1. Δημιουργία ομόκεντρων κύκλων.
2. Διαίρεση των κύκλων με βάση τον κανόνα  $y=2*x-2$ , όπου x είναι ο ομόκεντρος κύκλος (με αύξουσα ακτίνα) και y ο αριθμός των διακλαδώσεων που τέμνουν τον κάθε κύκλο, και δημιουργία μία δεύτερης ομάδας σημείων με βάση αυτό τον κανόνα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι διακλαδώσεις δεν σχηματίζονται με απόλυτη συμμετρία, ανά ίσες αποστάσεις μεταξύ τους.
3. Δημιουργία ακτινών κύκλου.
4. Δημιουργία δικτύου διακλαδώσεων ανάμεσα σε εγγύτητα δύο σημείων μίας λίστας σημείων.
5. Εύρεση την κοντινότερης διαδρομής μεταξύ τους.



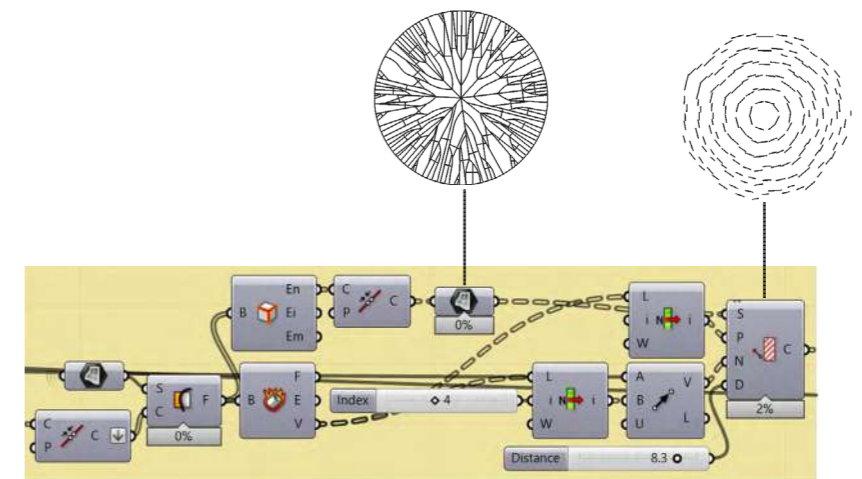
6. Βελτιστοποίηση του δικτύου με αφαίρεση παρόμοιων γραμμών και προσθήκη καμπυλότητας στις διακλαδώσεις.



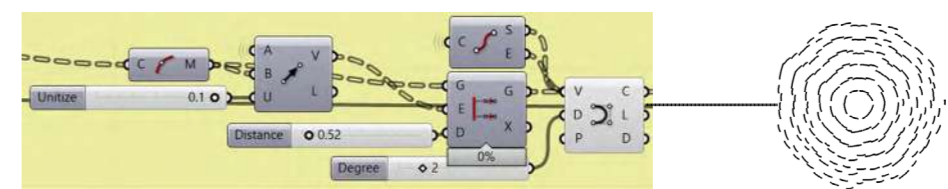
7. Διαμόρφωση του πάχους των διακλαδώσεων. Το πάχος είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης των σημείων τους από το κέντρο του κύκλου.



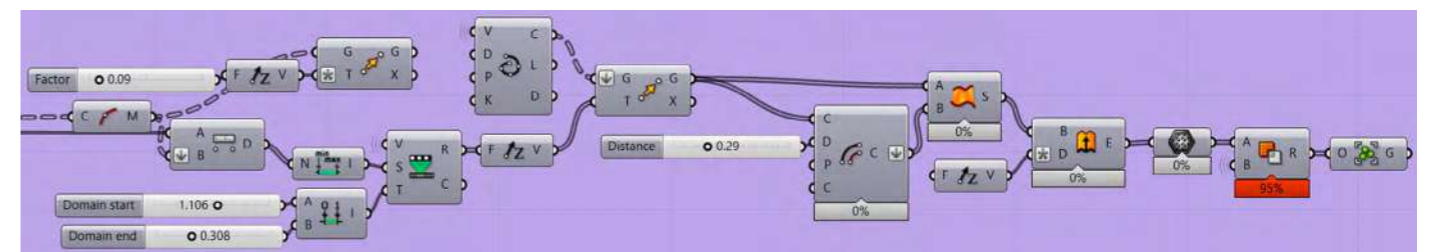
8. Διαχωρισμός συνολικής επιφάνειας με βάση τις διακλαδώσεις σε επιμέρους επιφάνειες.
9. Δημιουργία ισοϋψών καμπύλων (contour lines) με δεδομένη απόσταση μεταξύ τους.



10. Απόδοση μικρής καμπυλότητας στις διαχωριστικές γραμμές.

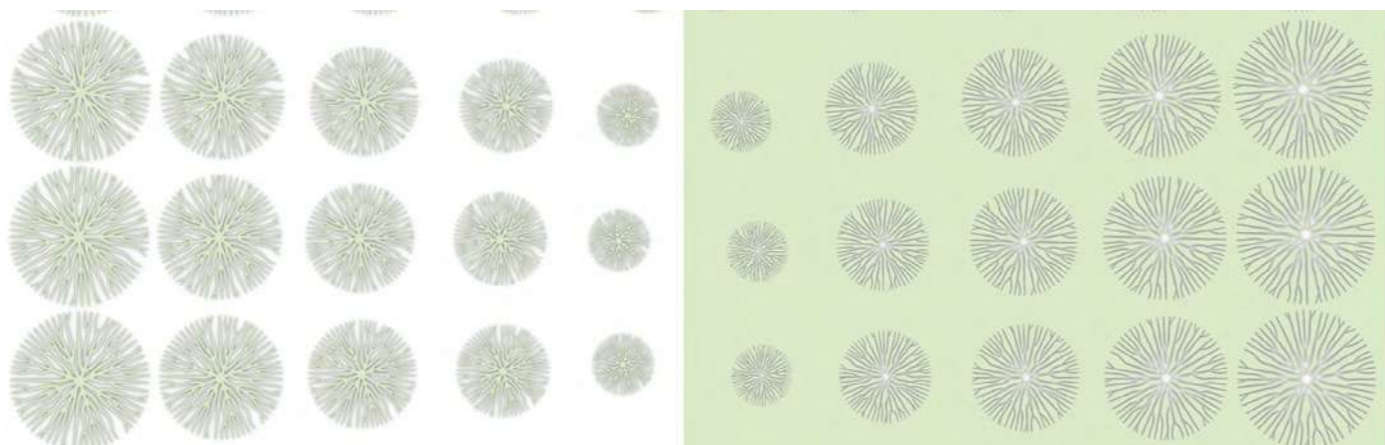


11. Προσθήκη ύψους ανάλογα με την απόστασή τους από το κέντρο.

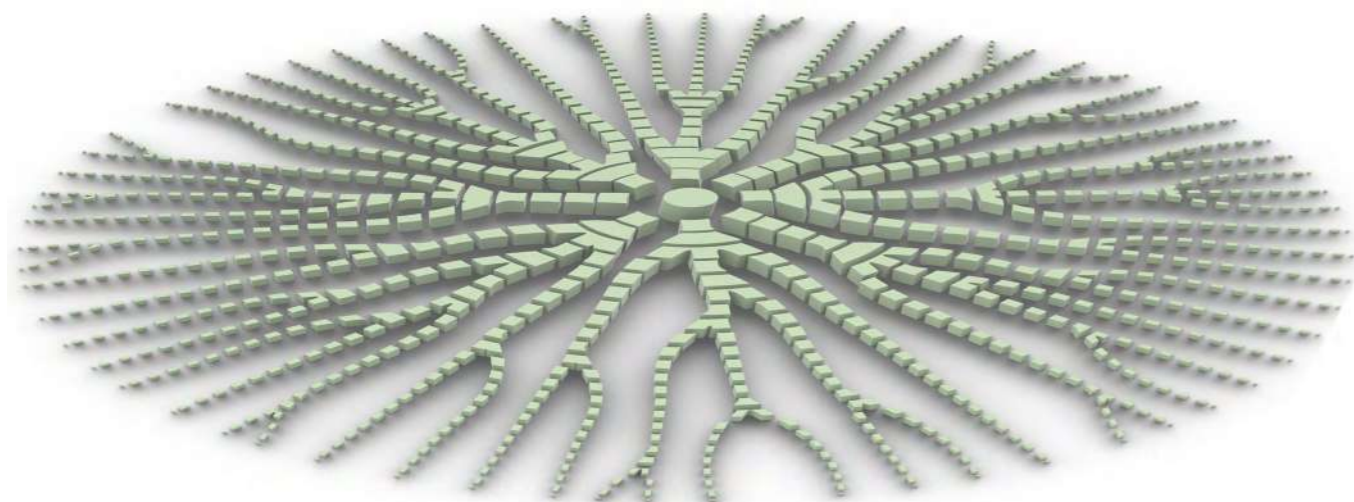


**Επεξεργασία του “κανόνα”**

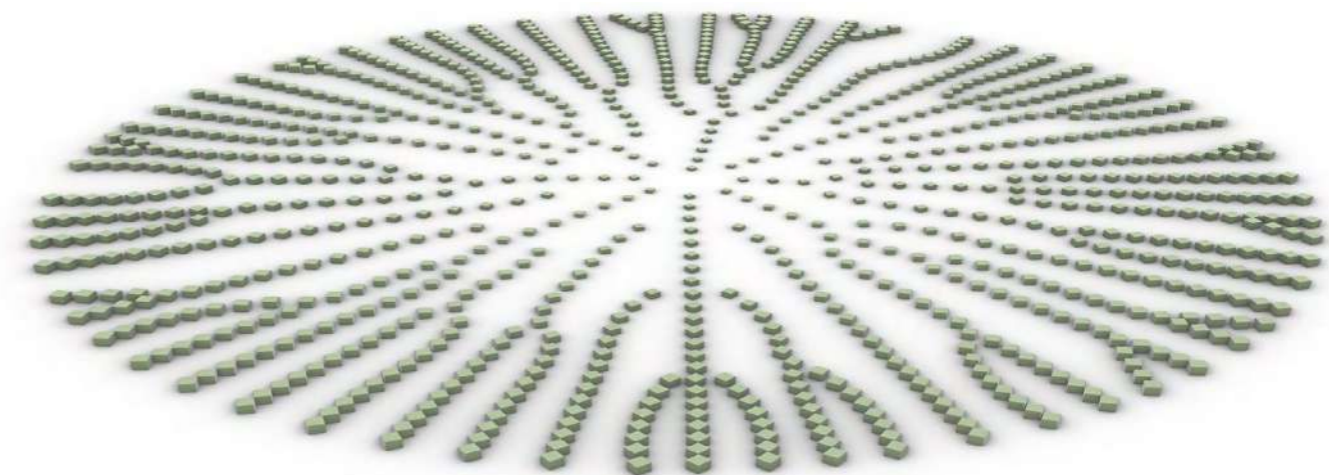
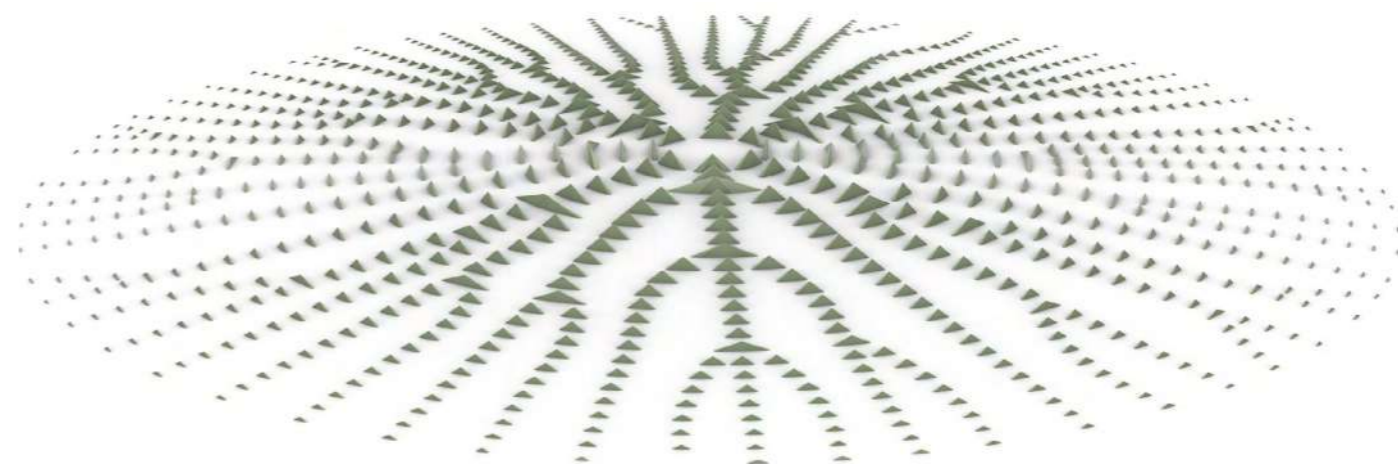
Κατόπιν, δημιουργήθηκαν πρωτότυπα βιομιμητικά μοτίβα και φόρμες, με στόχο την εφαρμογή τους σε προϊόντα μόδας. Η δημιουργία τους επιτεύχθηκε παραμετρικά, με επεξεργασία του κώδικα που δημιουργήθηκε στο πρώτο στάδιο (χρήση του προγράμματος Grasshopper). Μερικά παραδείγματα από τον πειραματισμό παρουσιάζονται παρακάτω.



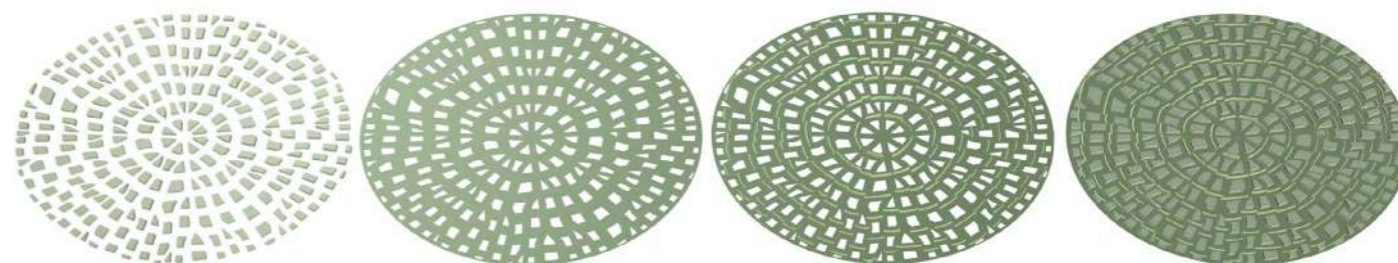
Δημιουργία επαναλαμβανόμενων μοτίβων που περιστρέφονται (άξονας y) και αλλάζουν το μέγεθός τους (άξονας x). Τα μοτίβα συνθέτουν ξεχωριστές επιφάνειες (αριστερά) ή αφαιρούνται από μία ενιαία επιφάνεια (δεξιά).



Οι διακλαδώσεις μετατρέπονται σε επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια τέμνεται από ομόκεντρους κύκλους σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις. Στη συνέχεια οι επιμέρους επιφάνειες εξωθούνται σε ύψος αντιστρόφως ανάλογο της απόστασής τους από το κέντρο.



Οι διακλαδώσεις μετατρέπονται σε επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια τέμνεται από ομόκεντρους κύκλους σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις. Στο μέσο κάθε τεμνόμενης γραμμής των κύκλων που βρίσκεται εντός της επιφάνειας των διακλαδώσεων, δημιουργείται ένα σχήμα (π.χ. τετράγωνο ή πεταλοειδής επιφάνεια). Έπειτα αποκτά όγκο, ανάλογα ή αντιστρόφως ανάλογα της απόστασής του από το κέντρο του κύκλου.



Δημιουργία επίπεδων ή τρισδιάστατων σχημάτων που προκύπτουν μετά από τη διαίρεση της επιφάνειας του κύκλου από τις διακλαδώσεις. Γίνεται σμίκρυνση στις επιμέρους επιφάνειες με βάση το κέντρο βάρους τους και στη συνέχεια εξωθούνται (α), αφαιρούνται από την επιφάνεια του κύκλου (β), προστίθενται οι ισοϋψείς καμπύλες (που έχουν αποκτήσει πάχος και ύψος) (γ) ή όλα από τα παραπάνω (δ).

## Δημιουργία προϊόντων μόδας

Στη συνέχεια, ο σχεδιασμός επικεντρώθηκε στη δημιουργία προϊόντων μόδας. Συγκεκριμένα σχεδιάστηκαν με παραμετρική προσέγγιση ένα γυναικείο ρούχο (bustier) και μερικά κοσμήματα. Όσον αφορά τα κοσμήματα, όπου απαιτούνταν, προστέθηκε η παράμετρος του μεγέθους. Για παράδειγμα τα δαχτυλίδια εμπεριέχουν τη μεταβλητή της περιμέτρου του δακτύλου ενώ στα βραχιόλια το μέγεθος του πήχη. Αυτά τα δεδομένα θα μπορούσαν να προκύψουν είτε από μετρήσεις, είτε από τρισδιάστατη σάρωση. Ακόμα, ανάλογα με το προσωπικό γούστο και τις επιθυμίες του χρήστη μπορούν να μεταβληθούν το πάχος, το ύψος και η μορφή του δαχτυλιδιού.

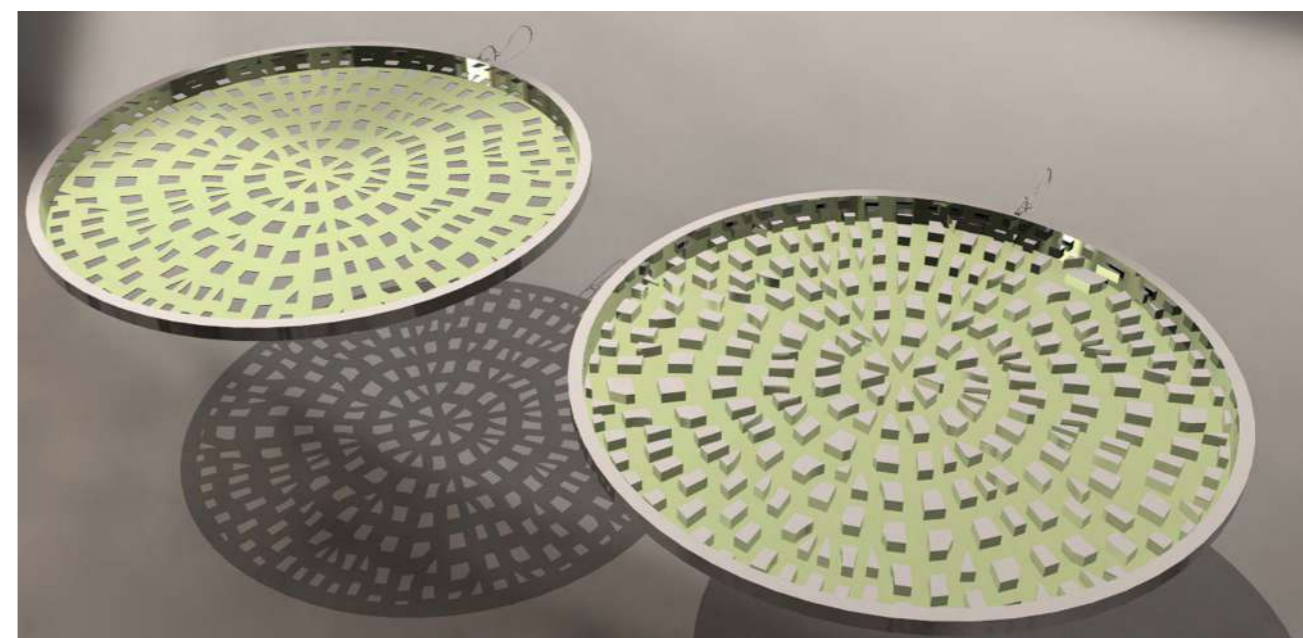
Όσον αφορά το ρούχο, παραμετροποιήθηκε το πατρόν του με βάση μία μέθοδο δημιουργίας πατρόν sur mesure. Οι βασικές παράμετροι του ανθρώπινου σώματος όπως για παράδειγμα η περίμετρος του στήθους και της μέσης, καθώς και το ύψος του κορμού, μπορούν να προσαρμόζονται σύμφωνα με τις διαστάσεις κάθε ανθρώπου. Αλλάζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους με βάση τις μετρήσεις του σώματος, το πατρόν μεταβάλλεται ώστε να προσαρμόζεται στο σώμα του εκάστοτε χρήστη.

## Κοσμήματα

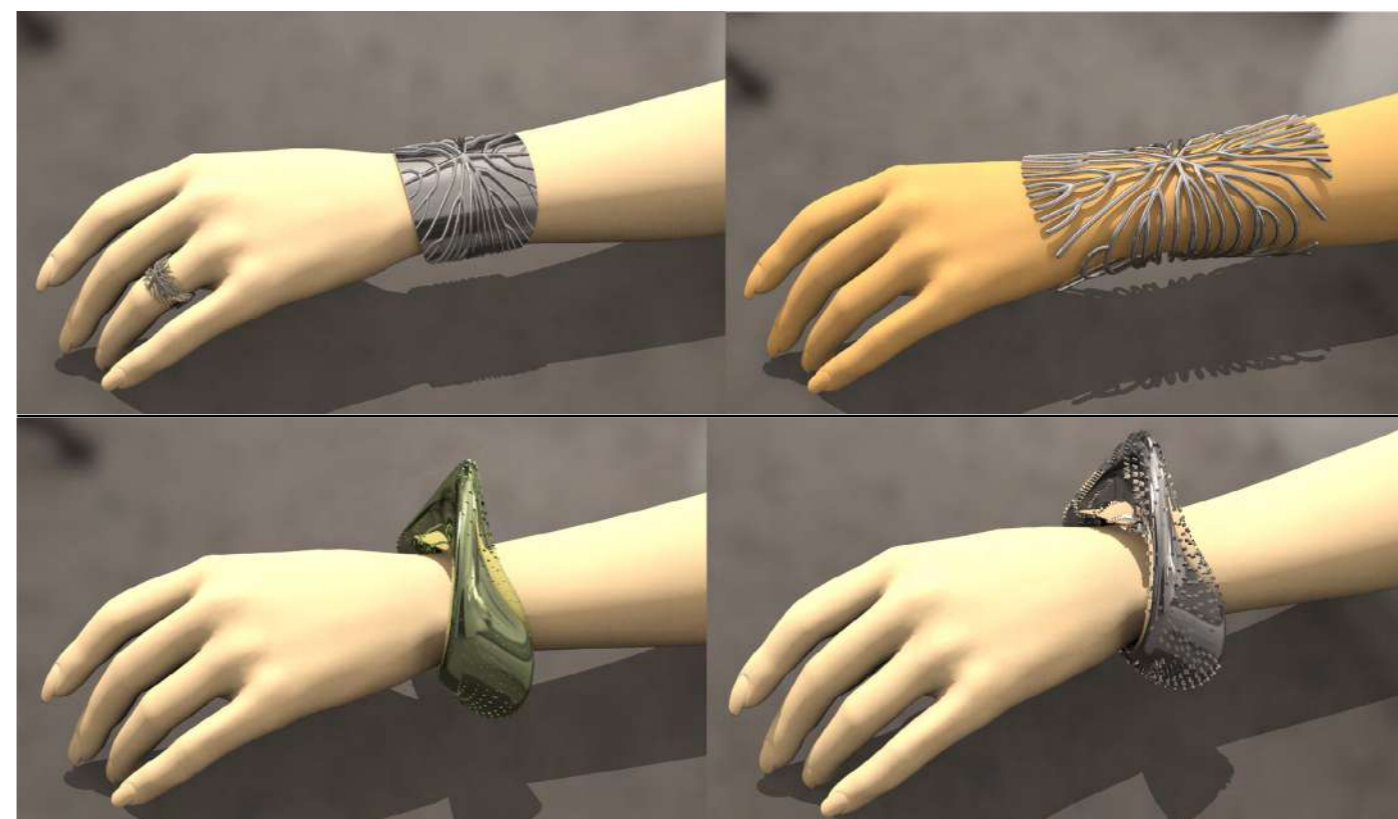
Οι δυνατότητες στη δημιουργία διαφορετικών δομών είναι απεριόριστες. Μερικά από τα κοσμήματα που σχεδιάστηκαν με χρήση του προγράμματος Grasshopper φαίνονται παρακάτω.



Παραλλαγές δαχτυλιδιών που απορρέουν από τον ίδιο κώδικα. Η βάση του δαχτυλιδιού, στην οποία “χαράσσεται” το όνομα του φυτού, αλλάζει το πάχος της σε συγκεκριμένα σημεία. Πάνω από τη βάση προστίθενται οι διακλαδώσεις καλύπτοντας ολόκληρη την εξωτερική επιφάνειά της ή μέρος αυτής.



Σκουλαρίκια στην επιφάνεια των οποίων προστίθενται ή αφαιρούνται οι διαβαθμισμένες επιφάνειες, δημιουργώντας ένα συμπαγές ή ένα διάτρητο μοτίβο.



Τέλος, δημιουργήθηκαν βραχιόλια με προβολή καμπύλων γραμμών ή τρισδιάστατων σχημάτων σε διαφορετικές επιφάνειες, ακολουθώντας το κατάλληλο παραμετρικό εργαλείο σε κάθε περίπτωση.

## Ένδυμα

Η δημιουργία του πατρόν έγινε στο Grasshopper, ενώ για να μπορέσει να γίνει προσομοίωση και αξιολόγησή του, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3D μοντελοποίησης CLO 3D. Ακολούθως, η μορφοποίηση του πατρόν βασιζόμενη στη βιομίμηση ολοκληρώθηκε παραμετρικά δημιουργώντας το τελικό σχέδιο του ρούχου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στη συνέχεια.

### Παραμετροποίηση πατρόν

Το πατρόν που δημιουργήθηκε παραμετρικά δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει τις προσωπικές του μετρήσεις, ώστε να λάβει το εξατομικευμένο για αυτόν αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, απαιτούνται οι εξής βασικές μετρήσεις:

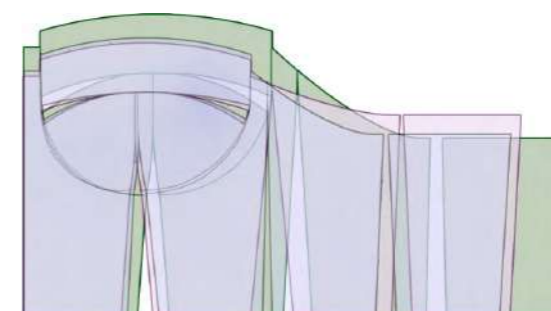
#### Κατακόρυφα:

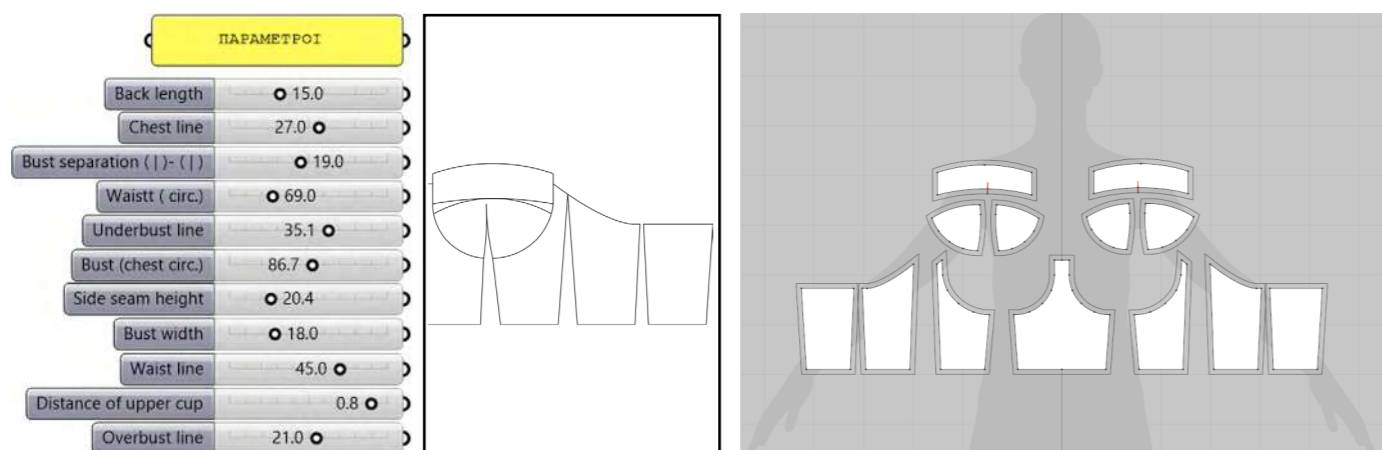
- Απόσταση από τον ώμο μέχρι το κέντρο του στήθους (chest line)
- Απόσταση από τον ώμο μέχρι κάτω από το στήθος (underbust line)
- Απόσταση από τον ώμο μέχρι κάτω πάνω από το στήθος (overbust line)
- Απόσταση από τον ώμο μέχρι τη μέση (waist line)
- Απόσταση πλαϊνής ραφής (από το σημείο που θέλουμε να ξεκινά μέχρι τη μέση) (side seam)

#### Οριζόντια:

- Περιφέρεια στήθους (chest circ.)
- Περιφέρεια μέσης (waist circ.)
- Απόσταση από το κέντρο του στήθους (bust separation)
- Πλάτος στήθους (bust width)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πατρόν που προκύπτει από τη σχεδίαση, ανάλογα με τις μετρήσεις που εισάγουμε καθώς και οι διαφορές που παρουσιάζουν τα πατρόν με τις τρεις διαφορετικές ομάδες μετρήσεων.





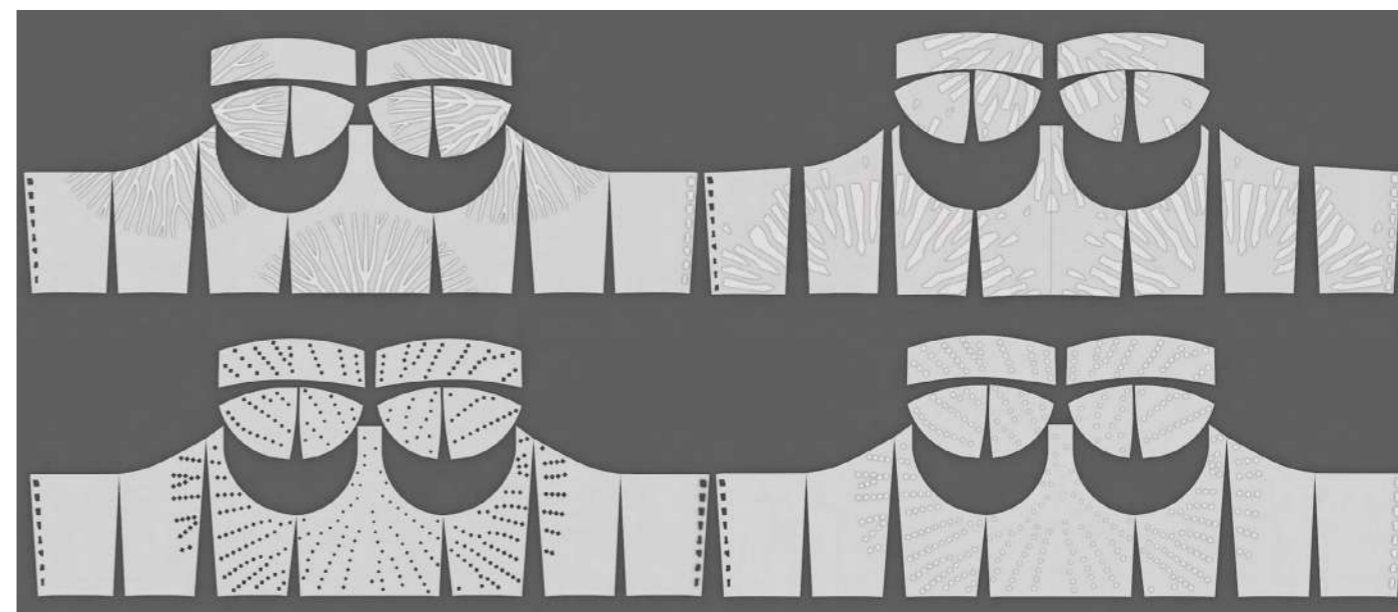
Grasshopper → Export to .pdf from Rhino → Import to CLO 3D

### Μοντελοποίηση

Στο πατρόν που προέκυψε από το Rhino (Grasshopper) αφού προστέθηκαν οι επιθυμητές διαστάσεις, έγινε εξαγωγή του αρχείου σε τύπο .pdf. Κατόπιν το αρχείο εισήχθη στο CLO 3D για να γίνει η μοντελοποίηση, ώστε να επιτευχθεί μία οπτικοποίηση του τελικού ρούχου. Οι διαστάσεις που δόθηκαν στο μοντέλο (avatar) ήταν ίδιες με τις διαστάσεις των παραμέτρων του πατρόν στο Grasshopper. Παρατηρήθηκε όμως ότι το μοντέλο δε διέθετε κάποιες βασικές μετρήσεις οι οποίες χρειάζονται για αυτό το πατρόν (όπως bust separation και bust width). Αυτό λήφθηκε υπόψιν κατά την προσομοίωση και τον έλεγχο της εφαρμογής. Ακόμα, σαν υλικό κατασκευής επιλέχθηκε ένα πλαστικό υλικό, ώστε να προσεγγίζει το υλικό της 3D εκτύπωσης.

### Μορφοποίηση- Τελικό σχέδιο

Εφόσον η εφαρμογή του πατρόν ήταν άρτια, ο σχεδιασμός συνεχίστηκε στο Grasshopper και το Rhino, προκειμένου το βασικό πατρόν του ρούχου να αποκτήσει μία νέα μορφή, βασισμένη στη βιομίμηση. Διαφορετικά βιομιμητικά μοτίβα και φόρμες που είχαν αναπτυχθεί προηγουμένως εφαρμόστηκαν στο πατρόν, δημιουργώντας επιφάνειες είτε με αφαίρεση από τις επιμέρους επιφάνειες, είτε με προσθήκη.

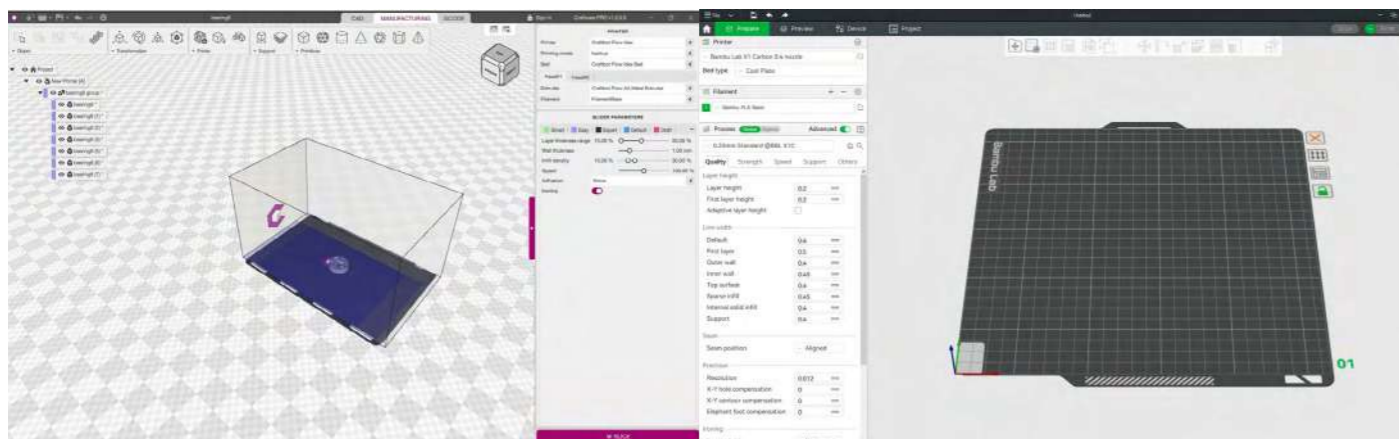


Αποψη της μπροστινής και της πίσω όψης του ρούχου.

## ΑΠΟ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

## Προετοιμασία εκτύπωσης

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός και επιλέχθηκαν ποια από τα σχεδιασμένα προϊόντα μόδας επρόκειτο να εκτυπωθούν, τα προς εκτύπωση μοντέλα εξήχθησαν σε τύπο αρχείου .stl και κατόπιν εισήχθησαν σε πρόγραμμα μετατροπής. Ως λογισμικό τεμαχισμού (slicer) για την προετοιμασία και την προεπισκόπηση της εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκαν το CraftWare και το Bambu studio. Αν και η διαδικασία προσομοίωσης της εκτύπωσης έχει μεγάλο ποσοστό επιτυχίας, ωστόσο ορισμένες φορές εμφανίζονται σφάλματα κατά την πραγματική διαδικασία εκτύπωσης τα οποία δεν εμφανίζονται στη φάση της προσομοίωσης, ενώ ο χρόνος εκτύπωσης μπορεί να παρουσιάσει μικρές διακυμάνσεις. Με βάση την προηγούμενη εμπειρία, την εμπειρία που αποκτήθηκε από τη μελέτη ποικίλων περιπτώσεων εφαρμογής και το χρησιμοποιούμενο υλικό, έγινε έλεγχος και κατάλληλος προσδιορισμός των παραμέτρων προκειμένου να αντληθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Ρυθμίσεις της εκτύπωσης όπως η θερμοκρασία εξώθησης και η ταχύτητα διατηρήθηκαν σταθερές, ενώ άλλες όπως η ποσότητα πλήρωσης, το ύψος του στρώματος και η πυκνότητα εκτύπωσης τροποποιήθηκαν κατάλληλα.



Λογισμικά τεμαχισμού CraftWare και Bambu studio.

## Οι εκτυπωτές

Όσον αφορά την εκτύπωση, επιλέχθηκε η μέθοδος μοντελοποίησης συντηγμένης Εναπόθεσης (FDM) καθώς είναι η πιο άμεση και προσιτή τεχνολογία συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές CraftBot XL και Bambu Lab X1 Carbon.

Ο CraftBot XL είναι ένας εκτυπωτής με διευρυμένο όγκο και ύψος κατασκευής που παρέχει αθόρυβη και ακριβή εκτύπωση. Τα προς εκτύπωση αρχεία εισάγονται με μονάδα USB απευθείας στον εκτυπωτή, ενώ ο εκτυπωτής διαθέτει επίσης συνδεσιμότητα Wi-Fi. Μέσω της οθόνη αφής LCD μπορεί να γίνει τροποποίηση των παραμέτρων εκτύπωσης ανά πάσα στιγμή ακόμη και κατά τη διάρκεια εκτύπωσης. Τέλος, ο CraftBot XL είναι εξοπλισμένος με λογισμικό τεμαχισμού CraftWare που διαθέτει προηγμένο αλγόριθμο τεμαχισμού, εξασφαλίζοντας ταχύτερες μετατροπές και καλύτερα αποτελέσματα, και είναι φιλικό προς το χρήστη.

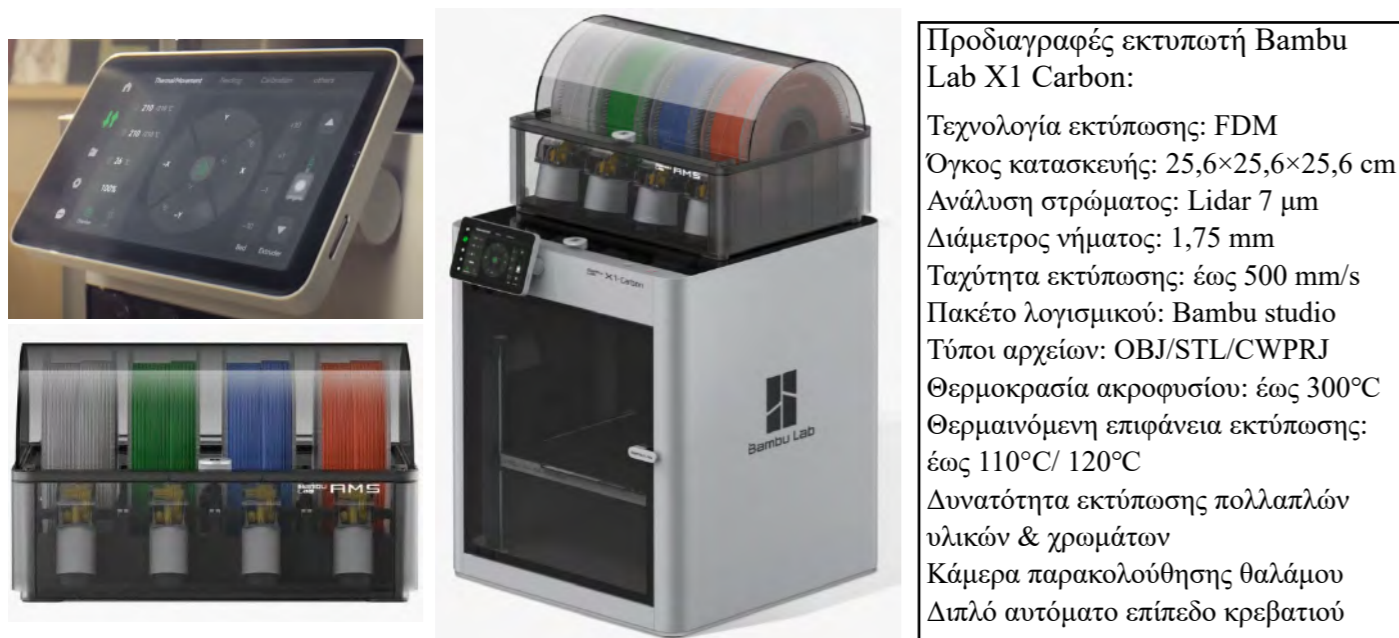


Προδιαγραφές εκτυπωτή CraftBot XL:  
 Τεχνολογία εκτύπωσης: FFF  
 Όγκος κατασκευής: 30x20x44 cm  
 Ανάλυση στρώματος: 50 micron  
 Διάμετρος νήματος: 1,75 mm  
 Ταχύτητα εκτύπωσης: 50-200 mm/s  
 Πακέτο λογισμικού: CraftWare  
 Τύποι αρχείων: OBJ/STL/CWPRJ  
 Θερμοκρασία ακροφυσίου: 180-260 °C  
 Θερμαινόμενη επιφάνεια εκτύπωσης: 50-110°C

Η οθόνη αφής του CraftBot XL, ο εκτυπωτής και οι προδιαγραφές του.

Ο εκτυπωτής Bambu Lab X1 Carbon είναι ένας εκτυπωτής που προσφέρει υψηλή ακρίβεια, ταχύτητα και ευελιξία. Διαθέτει υψηλής ποιότητας κατασκευή από ανθρακονήματα και οι διαστάσεις του είναι 38,9×38,9×45,7 cm. Μπορεί να εκτυπώσει διάφορα υλικά όπως PLA, PETG, TPU, ABS, ASA, PVA, PET και είναι ιδανικός για PA, PC και πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα/γυαλιού. Ακόμα, στο εσωτερικό έχει τοποθετηθεί μία κάμερα για απομακρυσμένο έλεγχο και παρακολούθησης της εκτύπωσης. Επιπλέον, διαθέτει οθόνη αφής με ρυθμιζόμενη κλίση, μία θύρα για SD card που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση αρχείων, καθώς και για την αποθήκευση των time-lapse βίντεο που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, ενώ παρέχει και τη δυνατότητα σύνδεσης με WiFi. Ακόμα η διπλή επιφάνεια εκτύπωσης (Cold plate και Engineering Plate) χρησιμοποιείται ανάλογα, με βάση το υλικό εκτύπωσης.

Η ύπαρξη ενός συστήματος κίνησης CoreXY επιτρέπει στο X1 να εκτυπώνει πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με έναν παραδοσιακό εκτυπωτή. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του εν λόγω εκτυπωτή είναι ότι διαθέτει το Bambu Lab AMS (Automatic Material System), το οποίο προσφέρει την δυνατότητα τοποθέτησης έως και τεσσάρων διαφορετικών ειδών και χρώματος νήματα, ενώ μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα για συνολικά 16 διαφορετικά χρώματα. Τέλος, καθώς κάθε γνήσιο ρολό διαθέτει συσκευή ανάγνωσης RFID, το AMS μπορεί να το διαβάσει ενημερώνοντας τον εκτυπωτή για τις πληροφορίες του νήματος που έχει εγκατασταθεί (τύπος και χρώμα) ώστε να το εμφανίσει αυτόματα στο υλικολογισμικό του εκτυπωτή (bambulab).



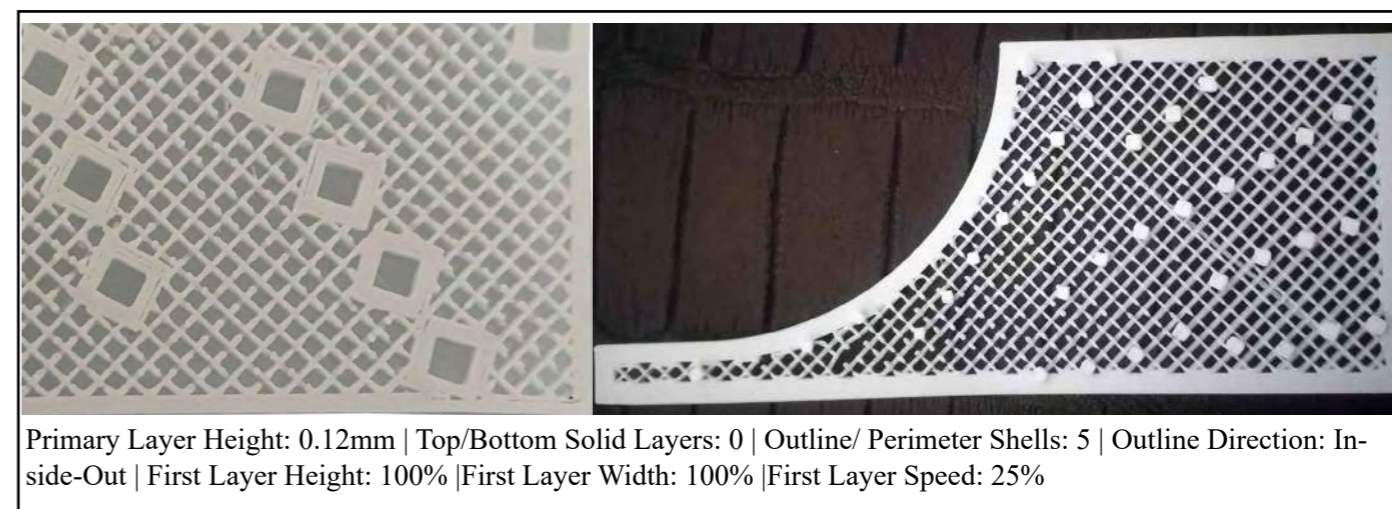
Η οθόνη αφής και το σύστημα AMS του Bambu Lab X1 Carbon, ο εκτυπωτής και οι προδιαγραφές του.

## Επιλογή υλικών

Στην παρούσα ερευνητική εργασία επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά υλικά: το ένα για τη δημιουργία κοσμημάτων και το άλλο για τη δημιουργία του ρούχου. Όσον αφορά τα κοσμήματα επιλέχθηκε το υλικό PLA. Το νήμα πολυγαλακτικού οξέος (PLA) είναι το πιο δημοφιλές λόγω του ότι είναι βιοδιασπώμενο υπό ορισμένες συνθήκες και όχι τόσο εύθραυστο όσο για παράδειγμα το ABS. Πρόκειται για έναν ανακυκλώσιμο, φυσικό θερμοπλαστικό πολυεστέρα που προέρχεται από ανανεώσιμους πόρους όπως το άμυλο καλαμποκιού ή το ζαχαροκάλαμο. Το PLA είναι εύκολο στη χρήση, δεν είναι τοξικό, είναι σχετικά οικονομικό και μπορεί να προσφέρει υψηλής ποιότητας εκτυπώσεις.

Συγκεκριμένα στην παρούσα ερευνητική εργασία χρησιμοποιήθηκε λευκό PLA της εταιρείας Craft (made by Herz) με διάμετρο 1.75mm και θερμοκρασία εξώθησης 210°C- 230°C.

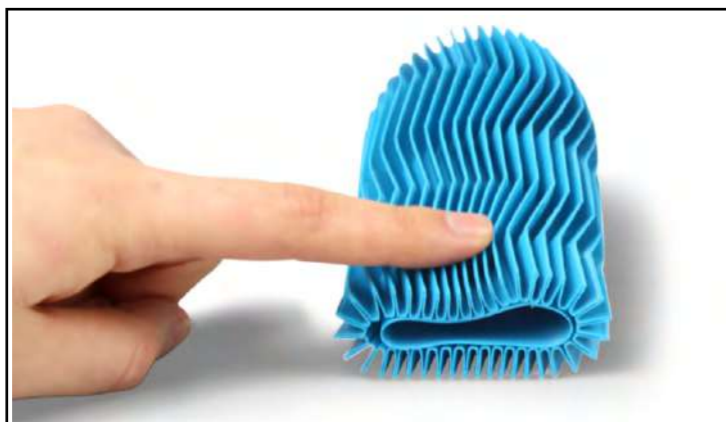
Όσον αφορά την εκτύπωση του ρούχου, έγιναν αρχικά κάποιες δοκιμαστικές εκτυπώσεις με νήμα PLA. Παρατηρήθηκε πως αν και τα εκτυπωμένα αντικείμενα είχαν μία ευελιξία, λόγω της δομής του το υλικό δεν ήταν το κατάλληλο για τη δημιουργία ρούχου. Το PLA είναι αρκετά σκληρό για να χρησιμοποιηθεί σε τυπικές εφαρμογές υφασμάτων, όπως ρούχα.



Δοκιμαστικές εκτυπώσεις μέρους του ρούχου σε PLA με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν.

Αναζητήθηκε επομένως ένα υλικό με μεγαλύτερη ελαστικότητα. Μετά από έρευνα και με βάση τα διαθέσιμα στην Ελλάδα υλικά, ως υλικό εκτύπωσης επιλέχθηκε το Fiberflex 40D της εταιρείας Fiberflex με διάμετρο 1.75mm. Το υλικό αυτό θεωρήθηκε καταλληλότερο για τη δημιουργία ρούχων λόγω της ελαστικότητας και της υφής του.





Η ελαστικότητα που παρέχει το S-Flex 90A

Πηγή: <https://www.3dqube.com/product-page/fiberflex-40d-fiberlogy-0-85kg-1-75mm>

Το είναι ένα εύκαμπτο υλικό με σκληρότητα Shore 40D, που εξωθείται σε θερμοκρασίες 200-220°C παράγοντας προϊόντα υψηλής ποιότητας με γυαλιστερή επιφάνεια. Επίσης τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κρούση, αντοχή σε χαμηλή θερμοκρασία, αντοχή σε χημικά και τριβή. Το Fiberflex 40D μπορεί να εκτυπωθεί με ταχύτητα 45 mm/s χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα εκτύπωσης. Πρόκειται για ένα θερμοπλαστικό συμπολυεστερικό ελαστομερές με προσθήκη χρωστικών παραγόντων και δεν περιέχει συστατικά που ταξινομούνται ως επικίνδυνα για το περιβάλλον. Αυτό το υλικό είναι κατάλληλο για προϊόντα που απαιτούν εύκαμπτη κίνηση, καθώς διατηρεί την ελαστικότητά του ακόμα και μετά τη σκλήρυνση, ενώ μπορεί να επιμηκυνθεί χωρίς να σπάσει (fiberlogy).



Τα filament PLA και S-Flex 90A αντίστοιχα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτύπωση.

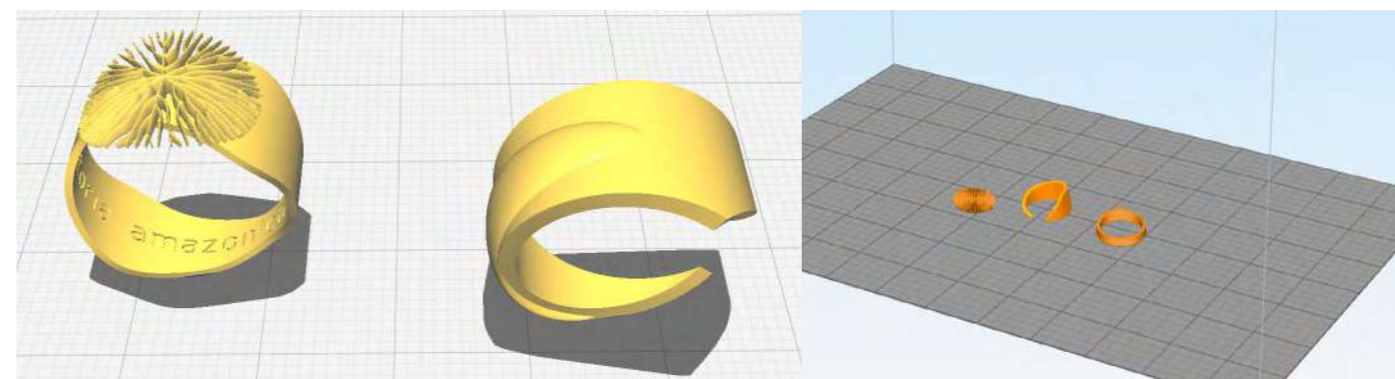
### Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς και οι παράμετροι εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν.

### Τρισδιάστατη εκτύπωση κοσμημάτων

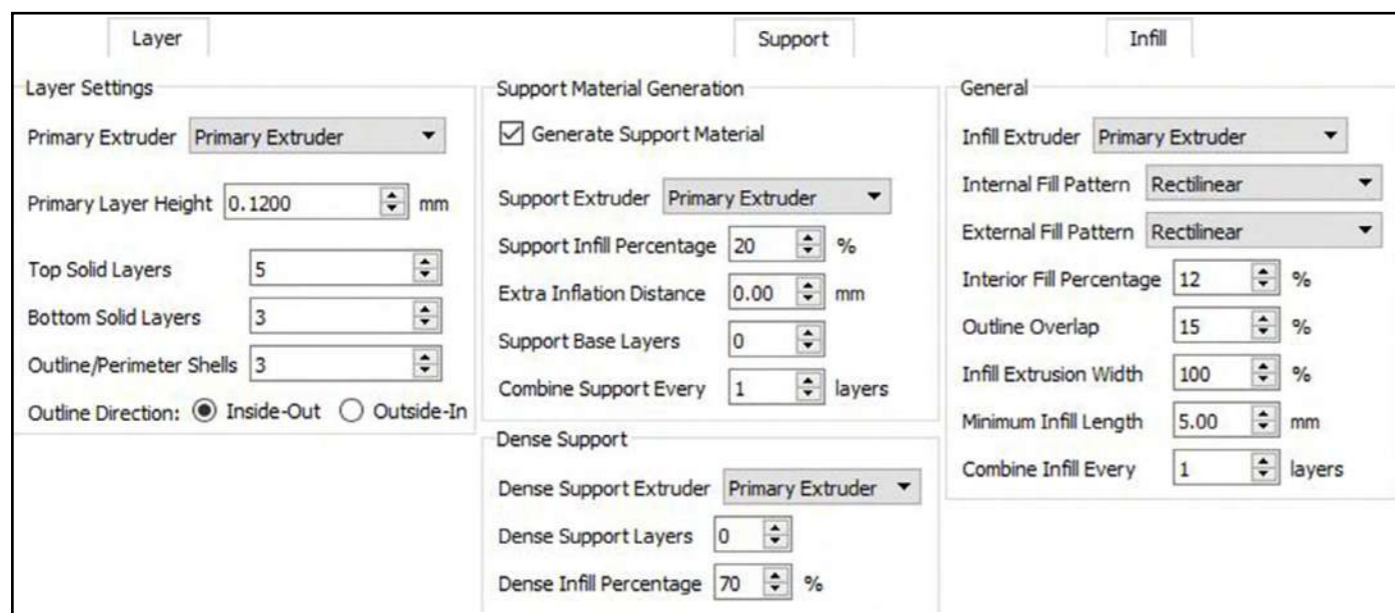
Όσον αφορά την τρισδιάστατη εκτύπωση κοσμημάτων, επιλέχθηκαν να εκτυπωθούν ένα ζευγάρι σκουλαρίκια και δύο διαφορετικά δαχτυλίδια με το υλικό PLA. Για τη δημιουργία χρησιμοποιήθηκαν το slicer CraftWare και ο τρισδιάστατος εκτυπωτής CraftBot XL (η εκτύπωση έγινε στο PreLab).

Για τον καλύτερο έλεγχο επιλέχθηκε να γίνουν δύο διαφορετικές εκτυπώσεις. Η μία αφορούσε τα δαχτυλίδια και η άλλη τα σκουλαρίκια.



Τα δαχτυλίδια που επιλέχθηκαν να εκτυπωθούν και η τοποθέτησή τους πριν την εκτύπωση.

Για τη διευκόλυνση της εκτύπωσης και για την αποφυγή στηριγμάτων, τα δαχτυλίδια εκτυπώθηκαν επίπεδα. Ακόμα, το διακοσμητικό που είχε στην πάνω πλευρά του το δαχτυλίδι, εκτυπώθηκε ξεχωριστά. Παρόλα αυτά, όπως παρατηρήθηκε και κατά την προσομοίωση της εκτύπωσης δεν ήταν δυνατόν να εκτυπωθεί επιτυχώς λόγω των πολύ μικρών διατομών και του μικρού πάχους που διέθετε. Πράγματι, ο εκτυπωτής κατάφερε να εκτυπώσει μόνο μερικές κουκίδες, ενώ το σχήμα δε διαφαινόταν. Επομένως, το δαχτυλίδι αυτό εκτυπώθηκε χωρίς το διακοσμητικό του στοιχείο.



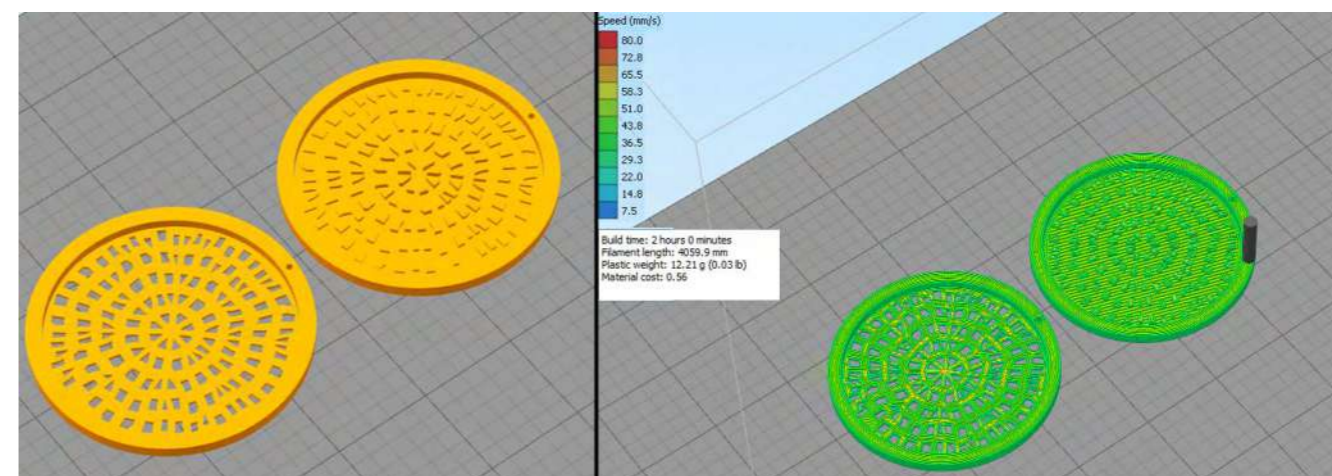
Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτύπωση.



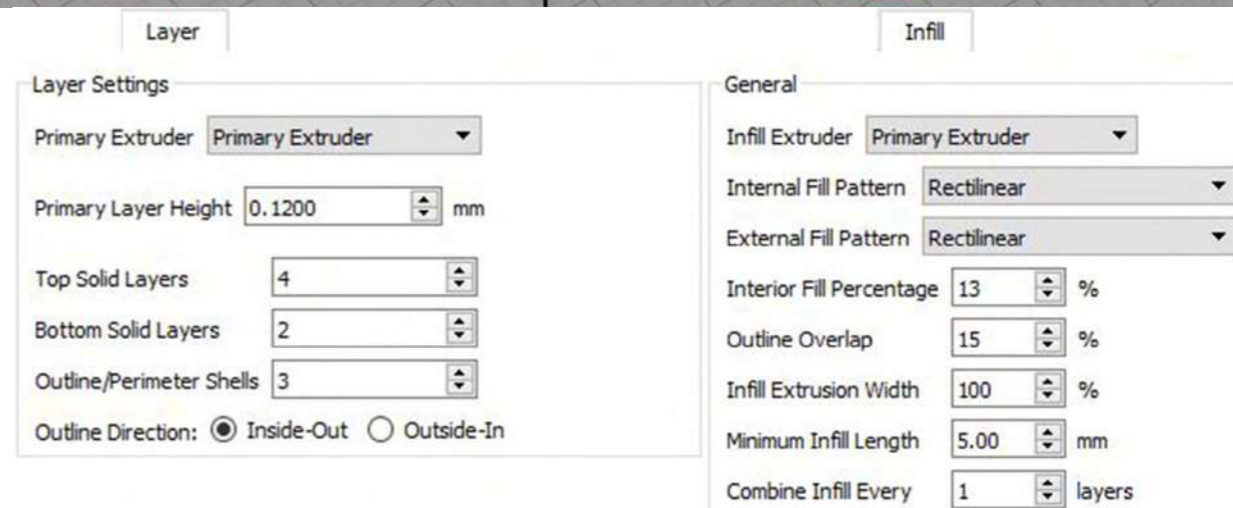
Τα τελικά εκτυπωμένα δαχτυλίδια.

Όσον αφορά τη δεύτερη εκτύπωση, αυτή των σκουλαρικών, πραγματοποιήθηκε χωρίς τη χρήση βάσεων στήριξης, καθώς τα σχήματα ήταν επίπεδα και είχαν μεγάλη επαφή στήριξης στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Η εκτύπωση διήρκεσε 2 ώρες και 9 λεπτά και χρησιμοποιήθηκαν 4.054m νήματος υλικού.

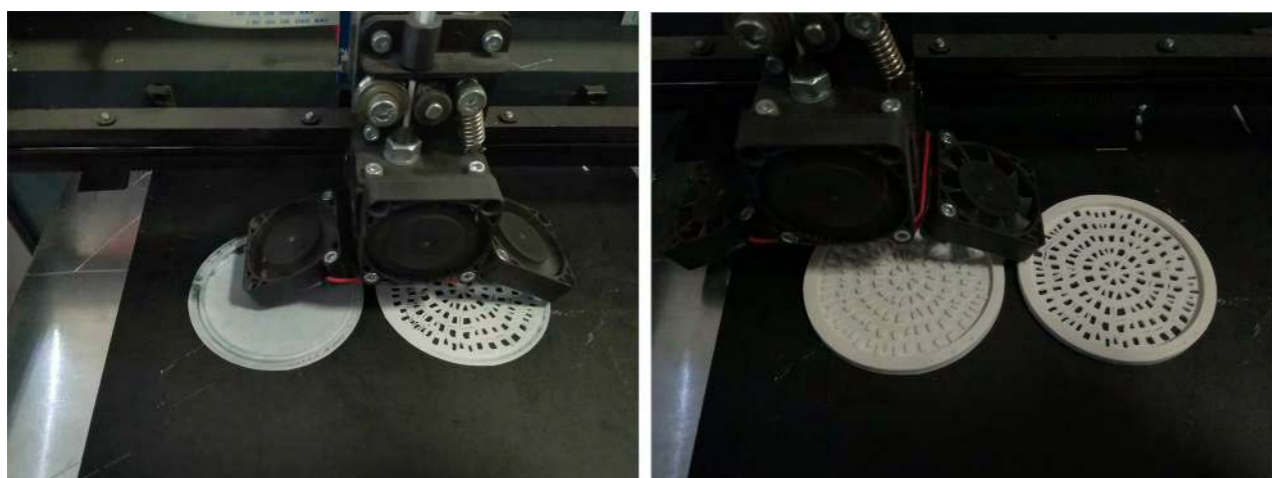
Για την καλύτερη εκτύπωση μαζί με τα δαχτυλίδια εκτυπώθηκαν και βάσεις στήριξης. Η εκτύπωση διήρκεσε 28 λεπτά και 34 δευτερόλεπτα και χρησιμοποιήθηκε 0.397m νήματος υλικού PLA. Τα δαχτυλίδια χρειάστηκαν τρίψιμο με γυαλόχαρτο προκειμένου να αποκτήσουν μία πιο λεία επιφάνεια στις ακμές τους. Κατόπιν θα μπορούσαν να βαφτούν με σπρέι ή ακρυλικό, όμως επιλέχθηκε να μείνουν με την εκτυπωμένη μορφή τους σε λευκό χρώμα.



Στιγμιότυπα κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.



Τα σκουλαρίκια κατά την προσομοίωσή τους πριν την εκτύπωση και οι παράμετροι εκτύπωσης.



Στιγμιότυπα κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.

Αφού ολοκληρώθηκε η εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε ελάχιστο υλικό πλήρωσης στα σημεία που ήταν απαραίτητο ώστε να προϊόντα να είναι έτοιμα για βάνιμο ή τελική χρήση.



Τα τελικά εκτυπωμένα σκουλαρίκια.

Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε πως για αντικείμενα που διαθέτουν υψηλή λεπτομέρεια και απαιτούν μεγάλη ακρίβεια χρειάζονται πιο εξελιγμένα μηχανήματα εξώθησης. Διαφορετικά, θα πρέπει να επιλεγεί μία άλλη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως για παράδειγμα η SLA που μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα σε αυτές τις απαιτήσεις. Για τις μεγαλύτερες επιφάνειες, η μέθοδος καθώς και το υλικό λειτούργησαν άρτια, παράγοντας προϊόντα που χρειάζονται μικρή επεξεργασία πριν την τελική τους χρήση.

### Τρισδιάστατη εκτύπωση ρούχου (bustier)

Το τελευταίο τρισδιάστατα εκτυπωμένο προϊόν μόδας που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης ερευνητικής, αφορά το bustier. Σε αντίθεση με προηγούμενες ερευνητικές εργασίες και παραδείγματα εφαρμογής, πρόκειται για ένα εφαρμοστό ρούχο το οποίο επιχειρείται να εκτυπωθεί τρισδιάστατα. Από τις διαφορετικά μορφολογικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν κατά το στάδιο του σχεδιασμού, επιλέχθηκε να εκτυπωθεί αυτό που περιλαμβάνει βιομημητικά μοτίβα που εκφράζονται μέσω αφαίρεσης από τις επιμέρους επιφάνειες.

Όσον αφορά τη σχεδίαση, προς εξυπηρέτηση της εκτύπωσης και της συναρμολόγησης, κάποια μέρη ενώθηκαν, ενώ άλλα σχεδιάστηκαν τρισδιάστατα. Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό προβλέφθηκε ο τρόπος με τον οποίον τα επιμέρους μέρη θα μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τρύπες κατά μήκος των όλων των κάθετων ακμών του ρούχου, εκτός από αυτές που βρίσκονται στο πίσω μέρος, οι οποίες κατόπιν θα συνδέονταν με ελαστικό νήμα. Στο πίσω μέρος σχεδιάστηκαν κουμπώματα τα οποία προέρχονται από τα βιομημητικά μοτίβα, προσθέτοντας ένα ακόμα μορφολογικό χαρακτηριστικό στο ρούχο.



Τελικά μέρη του bustier για την εκτύπωση.

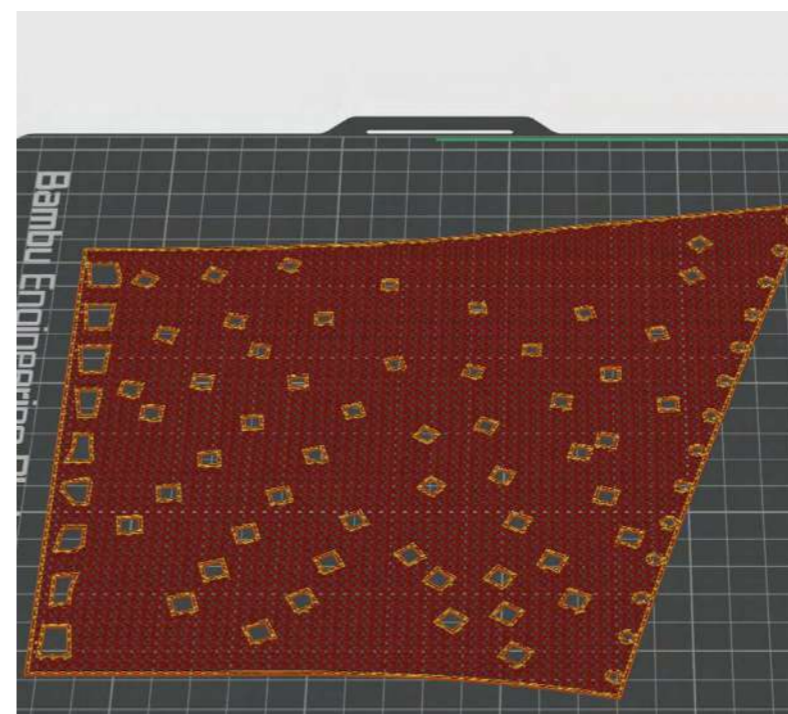
Η εκτύπωση επιτεύχθηκε με χρήση του εκτυπωτή Bambu Lab X1 Carbon και του slicer Bambu studio (η εκτύπωση έγινε στο thes3d). Για την εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε το υλικό Fiberflex 40D της Fiberlogy.

Κατά μέσο όρο η εκτύπωση κάθε επίπεδου κομματιού 1 ώρα και 10 λεπτά ενώ η εκτύπωση των μη επίπεδων μερών, 5 ώρες και 14 λεπτά. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν περίπου 68m νήματος Fiberflex 40D.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις της εκτύπωσης καθώς και η προσομοίωση της εκτύπωσης στο περιβάλλον του Bambu studio.

<b>Strength</b>		<b>Quality</b>	
Top surface pattern	Monotonic ...	<b>Layer height</b>	
Top shell layers	0	Layer height	0.1 mm
Top shell thickness	1 mm	Initial layer height	0.1 mm
Bottom surface pattern	Monotonic	<b>Line width</b>	
Bottom shell layers	0	Default	0.42 mm
Bottom shell thickness	0 mm	Initial layer	0.5 mm
Internal solid infill pattern	Rectilinear	Outer wall	0.42 mm
<b>Sparse infill</b>		Inner wall	0.45 mm
Sparse infill density	35 %	Top surface	0.42 mm
Sparse infill pattern	Gyroid	Sparse infill	0.45 mm
Length of sparse infill anchor	400% mm or %	Internal solid infill	0.42 mm
Maximum length of sparse infill anchor	20 mm or %	Support	0.42 mm
<b>Advanced</b>		<b>Seam</b>	
Infill/Wall overlap	15 %	Seam position	Aligned
Infill direction	45 °	<b>Precision</b>	
Bridge direction	0 °	Slice gap closing radius	0.049 mm
Minimum sparse infill threshold	15 mm²	Resolution	0.012 mm
		Arc fitting	<input checked="" type="checkbox"/>

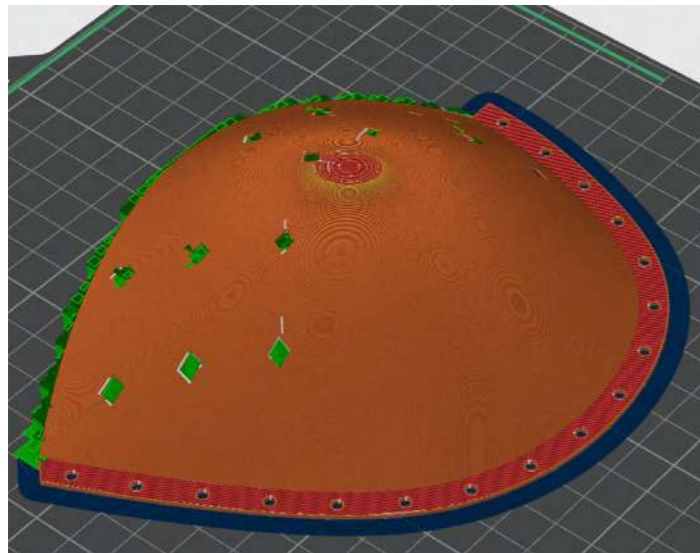
Οι ρυθμίσεις της εκτύπωσης των επίπεδων σχημάτων.



Από την προσομοίωση (slicer) στην εκτύπωση.

<b>Strength</b>		<b>Support</b>	
<b>Walls</b>		<b>Support</b>	
Wall loops	3	Enable support	<input checked="" type="checkbox"/>
Detect thin wall	<input type="checkbox"/>	Type	normal(auto)
<b>Top/bottom shells</b>		Style	Default
Top surface pattern	Monotonic ...	Threshold angle	35 °
Top shell layers	3	On build plate only	<input type="checkbox"/>
Top shell thickness	1 mm	Remove small overhangs	<input checked="" type="checkbox"/>
Bottom surface pattern	Monotonic	<b>Raft</b>	
Bottom shell layers	3	Raft layers	0 layers
Bottom shell thickness	0 mm	<b>Filament for Supports</b>	
Internal solid infill pattern	Rectilinear	Support/raft base	Default
		Support/raft interface	Default

Οι ρυθμίσεις της εκτύπωσης των μη επίπεδων σχημάτων. Προκειμένου να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η εκτύπωση προστέθηκαν βάσεις στήριξης.



Προσομοίωση του μη επίπεδου σχήματος στο Bambu studio και εκτύπωση.



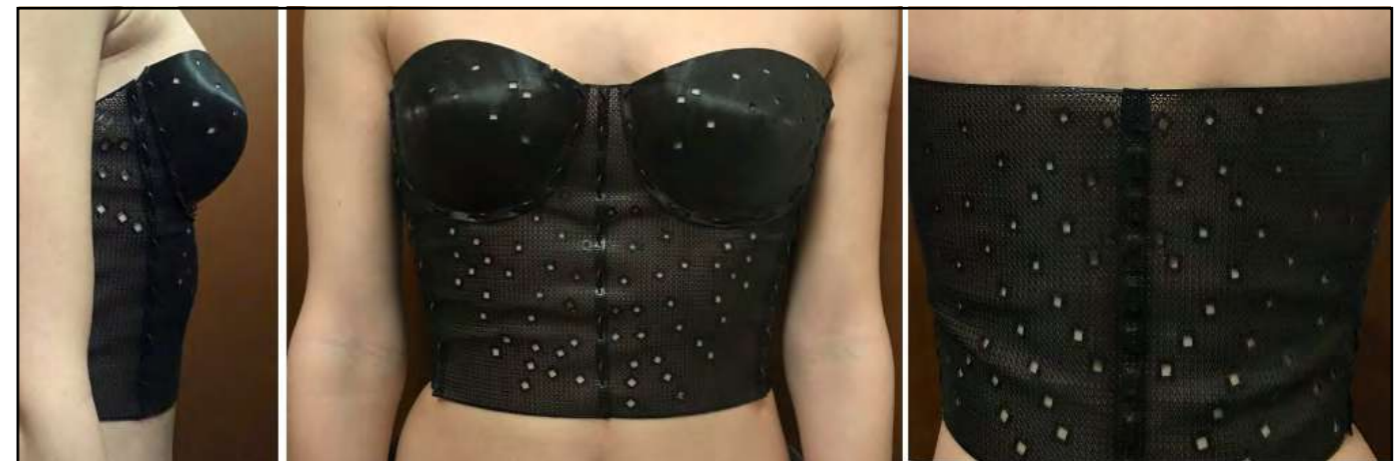
Η τελική μορφή του bustier μετά τη συναρμολόγηση.



Τα εκτυπωμένα μέρη του bustier πριν τη συναρμολόγησή τους.



Λεπτομέρειες σύνδεσης (κούμπωμα και ελαστικό νήμα) και ελαστικότητα του “υφάσματος”.



Η εφαρμογή του bustier.

Τέλος, αφού ολοκληρώθηκε η εκτύπωση όλων των κομματιών συνδέθηκαν με ελαστικό νήμα προκειμένου το ρούχο να λάβει την τελική μορφή του και να μπορεί να φορεθεί.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πρακτική έρευνα στοχεύει στον πειραματισμό και την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε προϊόντα μόδας. Συνδυάζει τις γνώσεις της παραδοσιακής δημιουργίας ρούχων και κοσμημάτων με τις σύγχρονες μεθόδους της ψηφιακής σχεδίασης, της μοντελοποίησης του παραμετρικού σχεδιασμού και της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συνεπώς πρόκειται για ένα εγχείρημα που απαιτεί πολυεπίπεδη σκέψη δημιουργώντας προϊόντα τελικής χρήσης και επιλύοντας προβλήματα που προκύπτουν σε διάφορα στάδια της δημιουργίας επηρεάζοντας διαφορετικούς τομείς.

Τα αντικείμενα σε αυτή την εργασία σχεδιάστηκαν με μία zero waste προσέγγιση, αποφεύγοντας την εκτύπωση ανομοιομορφων ή με έντονη γωνία επιφανειών που θα χρειαζόνταν επιπλέον στηρίγματα. Στηρίγματα τοποθετήθηκαν μόνο όπου ήταν απαραίτητο ώστε να επιτύχει η εκτύπωση. Ακόμα, ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού το ρούχο, το οποίο διέθετε και τα μεγαλύτερα προς εκτύπωση μέρη, διαιρέθηκε με τρόπο, ώστε να εξυπηρετείται τόσο η γεωμετρία και η εφαρμογή του ρούχου όσο και η τρισδιάστατη εκτύπωσή του. Επιπλέον, λήφθηκε υπόψη το πάχος και το ύψος των τυπωμένων λεπτομερειών κάθε σχεδίου, ούτως ώστε να μπορεί να εκτυπωθεί χωρίς να επηρεάζεται η συνολική ελαστικότητα ή η ανθεκτικότητα της κατασκευής.

Σκουλαρίκια, δαχτυλίδια και ένα bustier εκτυπώθηκαν με βάση με την τεχνική εξώθησης FDM. Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκαν υλικά εκτύπωσης που διατίθενται στην αγορά με βάση την προέλευσή τους (PLA) και την ευκαμψία τους (Fiberflex 40D). Το φινίρισμα της εκτύπωσης ήταν αρκετά λείο και για το λόγο αυτό δε χρειάστηκε κάποια μεταεπεξεργασία, παραμόνο σε ορισμένα σημεία.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη ήταν επιτραπέζιου τύπου, με περιορισμούς μεγέθους και χρόνου. Αυτοί οι περιορισμοί οδηγούν σε αυξήσεις τόσο στον αριθμό των εκρών όσο και στον χρόνο παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα τρισδιάστατης εκτύπωσης στον εκτυπωτή CraftBot XL ήταν σχετικά χαμηλή. Για παράδειγμα, η εκτύπωση μιας μεμονωμένης μικρής μονάδας διήρκεσε τουλάχιστον 20 λεπτά. Ο πιο σύγχρονος εκτυπωτής Bambu Lab X1 Carbon ήταν αρκετά ταχύτερος και παρείχε ποιοτικότερη εκτύπωση, γεγονός που επιβεβαιώνει την οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης βελτιώνονται ταχύτατα, μειώνοντας τους χρόνους κατασκευής και αυξάνοντας την ποιότητα και την ευελιξία.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία, που πραγματοποιείται στα πλαίσια του πειραματισμού και της έρευνας, προσδοκάται ότι θα αποτελέσει το έναυσμα για περισσότερες δημιουργικές κατασκευές στον τομέα της μόδας και όχι μόνο. Διαπιστώθηκε πως με τα κατάλληλα υλικά και

τα αντίστοιχα μηχανήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα ψηφιακά σχεδιασμένα προϊόντα μόδας μπορούν να αποκτήσουν την τρισδιάστατη, φυσική μορφή τους καλύπτοντας μορφολογικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Σε συνδυασμό με τις επιταχυνόμενες τεχνολογικές εξελίξεις και την πιο εύκολη πρόσβαση σε αυτή την τεχνολογία τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα μόδας αναμένεται να αποτελέσουν μέρος της καθημερινότητάς μας.

## ΑΝΤΙ ΕΠΙΛΟΓΟΥ

Η ψηφιακή σχεδίαση, ο παραμετρικός σχεδιασμός και η εκτύπωση σε τρεις ή τέσσερις διαστάσεις, βρίσκονται στο επίκεντρο των εξελίξεων. Τα σύγχρονα αυτά εργαλεία, παρόλο που άργησαν να εισαχθούν, αποκτούν όλο και μεγαλύτερη δημοτικότητα στη βιομηχανία της μόδας. Πλέον, τα όρια μεταξύ σχεδιασμού, προγραμματισμού, χειροποίητου και ψηφιακά παραγόμενου έχουν γίνει ασαφή και η δημιουργία γίνεται μέσω της σύγκλισης και της συνεργασίας.

Με επιταχυνόμενους ρυθμούς, τα σχεδιαστικά εργαλεία και οι διαθέσιμοι εκτυπωτές συμμορφώνονται με τις ταχέως μεταβαλλόμενες ανάγκες της βιομηχανίας της μόδας, δημιουργώντας εξειδικευμένα συστήματα που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των σχεδιαστών. Αυτά μπορούν να προσφέρουν προσαρμόσιμα σχέδια στους καταναλωτές, αυξάνοντας τη δυνατότητα πραγματοποίησης αμέτρητων διαφορετικών σχεδίων με μία μόνο μεταβλητή προσαρμογή, εξασφαλίζοντας την προσαρμογή και την εξατομίκευση σε σταθερά ή ακόμα και μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά τα προϊόντα μόδας, αξίζει να αξιολογηθεί η ανάπτυξη υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης με διαφορετικές υφές και ποιότητες που θα εξασφαλίζουν και θα ξεπερνούν ακόμα αυτές των παραδοσιακών προϊόντων. Το εύρος δυνατοτήτων που ανοίγεται με την εισχώρηση των σύγχρονων εργαλείων είναι αδιαμφισβήτητο. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να συμβαδίζει με όλα τα απαραίτητα συνθετικά συστατικά, ώστε κάθε δημιουργία να υλοποιείται εύκολα, αποδοτικά και βιώσιμα, προωθώντας τη βιομηχανία της μόδας στο επόμενο επίπεδο.

Η τεχνολογία προχωρά πιο γρήγορα από ποτέ. Η υιοθέτηση και η χρήση της στον τομέα της μόδας πρέπει να τεθεί άμεσα σε εφαρμογή προς όφελος των δημιουργών, των καταναλωτών αλλά και του περιβάλλοντος. Το περιβάλλον διαβίωσης παρουσιάζει διαρκώς φθίνουσες ποιότητες. Οι περιβαλλοντικές πιέσεις των τελευταίων ετών, που έχουν προκύψει ως απόρροια της ανθρωπογενούς δράσης και σχετίζονται με τον τομέα της μόδας, απαιτούν κριτική αξιολόγηση αλλά και ενεργό συμμετοχή. Επιπτώσεις όπως η αυξημένη χρήση του νερού, η ρύπανση των υδάτων και η αύξηση των απορριμμάτων που προκύπτουν από τις διαδικασίες παραγωγής, χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης. Επιπλέον, η αυξημένη κατανάλωση επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον και προκαλεί υπερεντατική χρήση πόρων, βλάπτοντας τα οικοσυστήματα και κατ' επέκταση την ανθρώπινη υγεία.

Οι τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς και της εκτύπωσης τεσσάρων διαστάσεων φαίνεται να αποτελούν την κυρίαρχη εναλλακτική διαδικασία βιώσιμης παραγωγής και για τον λόγο αυτό οφείλουν να αναλάβουν τα ηνία της μόδας. Ενόσω διευρύνεται και βελτιώνεται αυτή η νέα σειρά τεχνολογιών προκαλώντας το ενδιαφέρον ιδιωτών και εταιρειών, η βιομηχανία της μόδας μπορεί να επωφεληθεί με την περαιτέρω ανάπτυξη της αποδοτικότητας των πόρων της. Ως εκ τούτου, χρειάζεται να επαναξιολογηθεί η υπάρχουσα γνώση στον τομέα της μόδας, μέσω μίας διεπιστημονικής προσέγγισης για την αντιμετώπιση προκλήσεων και την ανάπτυξή της σύμφωνα με τις σύγχρονες συνθήκες. Αναμένεται πως οι μελλοντικές κατευθύνσεις στη βιομηχανία της μόδας θα συμβάλουν στη μετατόπισή της προς μία βιώσιμη, οικολογική και περισσότερο ανθρωποκεντρική βιομηχανία.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ



- 3D fashion by stratasy . Arid Collection (2020) <https://3dprintedart.stratasy.com/portfolio-1/arid-collection>
- 3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report. (2021). Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>
- Adario Strange. (2021). Inside the 3D-printed dress that may be the future of fashion. <https://mashable.com/2014/12/15/kinematics-3d-printed-dress/>
- Adidas, (2021) 4DFWD: Data-driven 3D printed performance echnology designed to move you forward. <https://news.adidas.com/running/4dfwd--data-driven-3d-printed-performance-technology-designed-to-move-you-forward/s/514baddb-1029-4686-abd5-5ee3985a304a>
- Addington, M., Schodek, D. (2005) Smart Materials and New Technologies: For the Architecture and Design Professions. Architectural Press, Boston. [http://tailieudientu.lrc.tnu.edu.vn/Upload/Collection/brief/brief\\_51941\\_55788\\_1752016162226KNV.14000925.pdf](http://tailieudientu.lrc.tnu.edu.vn/Upload/Collection/brief/brief_51941_55788_1752016162226KNV.14000925.pdf)
- Ahart, M. (2019). Types of 3D Printing Technology Explained. <https://www.protolabs.com/resources/blog/types-of-3d-printing/>
- Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H., Khosla, A. (2021). 4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges. Polymer, 228, 123926. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386121005498>
- Ahleroff, S., Mostashiri, N., Xu, X., Zhong, R. Y. (2021). Mass personalisation as a service in industry 4.0: A resilient response case study. Advanced Engineering Informatics, 50, 101438. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034621001907>
- Ahrendt, D., Romero Karam, A. (2020). Development of a computer-aided engineering-supported process for the manufacturing of customized orthopaedic devices by three-dimensional printing onto textile surfaces. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 15, 1558925020917627
- Aldawood, F. K. (2023). A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges. In Actuators (Vol. 12, No. 3, p. 101). MDPI. <https://www.mdpi.com/2076-0825/12/3/101>
- ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Subcommittee F42. 05 on Materials and Processes. (2016). Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals. ASTM International. <https://www.astm.org/f3187-16.html>
- ASTM D8248-20 (2020) Standard Terminology for Smart Textiles <https://www.astm.org/d8248-20.html>
- Atkinson, P., et al. (2008). Post industrial manufacturing systems: the undisciplined nature of generative design. In: Proceedings of the design research society conference 2008, Sheffield, UK. <https://dl.designresearchsociety.org/drs-conference-papers/drs2008/researchpa-pers/72/>
- Awaja, F., Gilbert, M., Kelly, G., Fox, B., Pigram, P. J. (2009). Adhesion of polymers. Progress in polymer science, 34(9), 948-968. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670009000501>
- Badiru, A. B., Valencia, V. V., & Liu, D. (2017). Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry. CRC Press. [https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=1joPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Additive+Manufacturing+Handbook:+Product+Development+for+the+Defense+Industry&ots=\\_GPs2uFeeo&sig=3INgGSJKqVD4YNsRD aT-tge2Qlk&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Additive%20Manufacturing%20Handbook%3A%20Product%20Development%20for%20the%20Defense%20Industry&f=false](https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=1joPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Additive+Manufacturing+Handbook:+Product+Development+for+the+Defense+Industry&ots=_GPs2uFeeo&sig=3INgGSJKqVD4YNsRD aT-tge2Qlk&redir_esc=y#v=onepage&q=Additive%20Manufacturing%20Handbook%3A%20Product%20Development%20for%20the%20Defense%20Industry&f=false)
- Baugh, G. (2011). The fashion designer's textile directory: A guide to fabrics' properties, characteristics, and garment-design potential. Barron's
- Beecroft, M. (2016). 3D printing of weft knitted textile based structures by selective laser sintering of nylon powder. In IOP conference series: Materials science and engineering (Vol. 137, No. 1, p. 012017). IOP Publishing. [https://e-space.mmu.ac.uk/621459/1/Beecroft\\_2016\\_IOP\\_Conf\\_Ser.%253A\\_Mater.\\_Sci.\\_Eng.\\_137\\_012017.pdf](https://e-space.mmu.ac.uk/621459/1/Beecroft_2016_IOP_Conf_Ser.%253A_Mater._Sci._Eng._137_012017.pdf)
- Beecroft, M. (2019). Digital interlooping: 3D printing of weft-knitted textile-based tubular structures using selective laser sintering of nylon powder. International Journal of Fashion Design, Technology and Education, 12(2), 218-224. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17543266.2019.1573269>
- BIM Wiki, (2021) Parametric modelling. [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Parametric\\_modelling](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Parametric_modelling)
- Bingham, G.A., Hague, R.J.M., Tuck, C.J., Long, A.C., Crookston, J.J., Sherburn, M.N. (2007). "Rapid Manufactured Textiles" International Journal of Computer Integrated Manufacture (Vol. 20, Issue 1, 2007, pp. 96-105)
- Black, S. (2012). Footwear designer Ross Barber in conversation with Sandy Black. Fashion Practice, 4(2), 263–269. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2752/175693812X13403765252505>
- Bloomfield, M., & Borstrock, S. (2018). Modeclix. The additively manufactured adaptable textile. Materials Today Communications, 16, 212-216. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492817301848>
- Bogue, R. (2014). Smart materials: a review of capabilities and applications. Assembly Automation, 34(1), 16-22. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/AA-10-2013-094/full/html>
- Braconnier, D. J., Jensen, R. E., & Peterson, A. M. (2020). Processing parameter correlations in material extrusion additive manufacturing. Additive Manufacturing, 31, 100924. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860419300053>
- Bradshaw, S., Bowyer, A., Haufe, P. (2010). The intellectual property implications of low-cost 3D printing. ScriptEd, 7, 5. <https://purehost.bath.ac.uk/ws/portalfiles/por-tal/298757/bradshaw.pdf>
- Britt, H., Campbell, J. R., Whittet, C. (2008). Injet4Tex: Creative Implications of 3D inkjet printing technologies for textiles. [https://www.academia.edu/3108773/Inkjet4Tex\\_Creative\\_implications\\_of\\_3D\\_inkjet\\_printing\\_technologies\\_for\\_textiles](https://www.academia.edu/3108773/Inkjet4Tex_Creative_implications_of_3D_inkjet_printing_technologies_for_textiles)
- Brown, A. (2020). Timely enchantress: The high-tech couture of Iris van Herpen. <https://www.afr.com/life-and-luxury/fashion-and-style/timely-enchantress-the-high-tech-couture-of-iris-van-herpen-20200714-p55bt1>

- Burgess M. (2016). Adidas is selling a limited number of 3D-printed runner shoes. <http://www.wired.co.uk/article/adidas-3d-printed-running-shoe-cost-test>
- Carlota, V. (2019). Annie Foo, creator of 3D printed shoes, 3D printed news art & design. <https://www.3dnatives.com/en/annie-foo-3d-printed-shoes-190720194/#!>
- Carneiro, O. S., Silva, A. F., Gomes, R. (2015). Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, 83, 768-776. [https://www.researchgate.net/publication/282600160\\_Fused\\_deposition\\_modeling\\_with\\_polypropylene](https://www.researchgate.net/publication/282600160_Fused_deposition_modeling_with_polypropylene), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127515004037>
- Casas, N., & Herpen, I. V. (2020a). MAGNETIC MOTION - niccolocasas. <https://www.niccolocasas.com/MAGNETIC-MOTION>
- Casini, M. (2022). Chapter 8—Advanced building construction methods. In M. Casini (Ed.), *Construction 4.0* (pp. 405–470). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821797-9.00006-4>
- Cavallo, C. (n.d.). All About Continuous Liquid Interface Production. <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/continuous-liquid-interface-production-3d-printing/>
- Chakraborty, S., Biswas, M. C. (2020). 3D printing technology of polymer-fiber composites in textile and fashion industry: A potential roadmap of concept to consumer. *Composite Structures*, 248, 112562. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822320314367>
- Chalcraft, E. (2020). Voltage 3D printed clothes by Iris van Herpen with Neri Oxman and Julia Koerner. <https://www.dezeen.com/2013/01/22/voltage-3d-printed-clothes-by-iris-van-herpen-with-neri-oxman-and-julia-koerne/>
- Chavez, Ev., (2014). Sex and Cathedrals: Alexis Walsh's 3d printed spire dress <https://3dprintingindustry.com/news/sex-cathedrals-alexis-walshs-3d-printed-spire-dress-32056/>
- Cheah, C. M., Chua, C. K., Leong, K. F., Cheong, C. H., Naing, M. W. (2004). Automatic algorithm for generating complex polyhedral scaffold structures for tissue engineering. *Tissue engineering*, 10(3-4), 595-610. [https://www.researchgate.net/publication/8541963\\_Automatic\\_Algorithm\\_for\\_Generating\\_Complex\\_Polyhedral\\_Scaffold\\_Structures\\_for\\_Tissue\\_Engineering](https://www.researchgate.net/publication/8541963_Automatic_Algorithm_for_Generating_Complex_Polyhedral_Scaffold_Structures_for_Tissue_Engineering)
- Chu, J. (2017) Researchers design moisture-responsive workout suit | MIT News Office. <https://news.mit.edu/2017/moisture-responsive-workout-suit-0519>
- Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2010). *Rapid prototyping: principles and applications* (with companion CD-ROM). World Scientific Publishing Company. [https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=PiI8DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Chua+et+al.,+2010&ots=zILG1E1xW7&sig=sUfAlZEufd\\_MF3Bg\\_omq4kTDh-A&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=PiI8DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Chua+et+al.,+2010&ots=zILG1E1xW7&sig=sUfAlZEufd_MF3Bg_omq4kTDh-A&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Chua, J. M. (2021). NASA eyeing “chain mail” fabric for use in space. <https://www.space.com/36719-nasa-chain-mail-space-fabric.html>
- Chung, S., Song, S. E., & Cho, Y. T. (2017). Effective software solutions for 4D printing: A review and proposal. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4, 359-371. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-017-0041-y>
- Cloud Factory. <https://www.cloudfactory.com/jewelry/sustainability>
- Continuum, N12 <https://www.continuumfashion.com/N12.php>
- Das, S. (2003). Physical aspects of process control in selective laser sintering of met-als. *Advanced engineering materials*, 5(10), 701-711. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.200310099>
- Dean, D., Wallace, J., Siblani, A., Wang, M. O., Kim, K., Mikos, A. G., & Fisher, J. P. (2012). Continuous digital light processing (cDLP): Highly accurate additive manufacturing of tissue engineered bone scaffolds: This paper highlights the main issues regarding the application of Continuous Digital Light Processing (cDLP) for the production of highly accurate PPF scaffolds with layers as thin as 60 µm for bone tissue engineering. *Virtual and physical prototyping*, 7(1), 13-24. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3466612/>
- Digits2Widgets. (2021). Flexible 3D printed SLS “fabrics” developed by D2W. <https://www.digits2widgets.com/3d-printing-portfolio/nylon-sls-fabrics/>
- Ding, R., Du, Y., Goncalves, R. B., Francis, L. F., & Reineke, T. M. (2019). Sustainable near UV-curable acrylates based on natural phenolics for stereolithography 3D printing. *Polymer Chemistry*, 10(9), 1067-1077. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/py/c8py01652f/unauth>
- Dip, T. M., Begum, H. A., Al Hossain, M. A., Uddin, M. M., Faruque, M. O. (2018). Analysis of physico-mechanical properties of jute and polyester blended yarn. *International journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*, 6(09). [https://www.academia.edu/44094406/Analysis\\_of\\_Physico\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Jute\\_and\\_Polyester\\_Blended\\_Yarn](https://www.academia.edu/44094406/Analysis_of_Physico_Mechanical_Properties_of_Jute_and_Polyester_Blended_Yarn)
- Dip, T. M., Emu, A. S., Nafiz, M. N. H., Kundu, P., Rakhi, H. R., Sayam, A., Sayem, A. S. M., et al. (2020). 3D printing technology for textiles and fashion. *Textile Progress*, 52(4), 167-260. <https://www.tandfonline.com/doi/ref/10.1080/00405167.2021.1978223?scroll=top&role=tab>
- DLP. (n.d.). Anima. , <https://anima.gr/dlp>
- Döpke, C., Grimmelsmann, N., Ehrmann, A. (2017). 3D printing on knitted fabrics. *Melliand Int*, 23, 97-98. [https://www.researchgate.net/profile/Andrea-Ehrmann/publication/305143660\\_3D\\_printing\\_on\\_knitted\\_fabrics/links/5783692708aeca7daac38125/3D-printing-on-knitted-fabrics.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andrea-Ehrmann/publication/305143660_3D_printing_on_knitted_fabrics/links/5783692708aeca7daac38125/3D-printing-on-knitted-fabrics.pdf)
- Doubrovski, Z., Stokhuijzen, D., Aberle, N., van Herpen, I., Schuddeboom, P., Verlinden, J. (2018). Fabricating the foliage dress: computational design in couture. *Proceedings of SCF*, 1-2. [https://www.researchgate.net/publication/325975907\\_Fabricating\\_the\\_Foliage\\_Dress\\_Computational\\_Design\\_in\\_Couture](https://www.researchgate.net/publication/325975907_Fabricating_the_Foliage_Dress_Computational_Design_in_Couture)
- Eom, R. I., Lee, H., Lee, Y. (2019). Evaluation of thermal properties of 3D spacer technical materials in cold environments using 3D printing technology. *Polymers*, 11(9), 1438. <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/9/1438>

- Etherington, R. (2011). N12 3D printed bikini by Continuum Fashion and Shapeways. Dezeen Magazine. Retrieved from <http://www.dezeen.com/2011/06/07/n12-3d-printed-bikini-by-continuum-fashion-and-shapeways/>
- Fabrican Ltd. (n.d.). Fabrican Technology. Fabrican forms instant non-woven fabrics from a spray <https://www.fabricanltd.com/about/technology/>
- Farin, G., Hoschek, J., Kim, M. S. (2002). Handbook of computer aided geometric design. Elsevier.
- Feetz. (n.d.). Feetz SizeMe Shoes. Retrieved August 7, 2023, from <http://www.feetz.co/>
- Fibre2Fashion. (2012). Pollution by textile industry—Pollutants of water, air, land, environmental pollution by textile industry. Fibre2Fashion.
- Fitch T., Travis Fitch- about <https://fitchwork.com/About-1>
- Fitzgerald, M. (2021). With 3-D printing, the shoe really fits. [https://sloanreview.mit.edu/article/with-3-d-printing-the-shoe-really-fits/?utm\\_source=twitter&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=sm-direct](https://sloanreview.mit.edu/article/with-3-d-printing-the-shoe-really-fits/?utm_source=twitter&utm_medium=social&utm_campaign=sm-direct)
- Fleischer, J.C., (09-01-2020) ZERO WASTE PULLOVER by Son of a Tailor <https://www.kickstarter.com/projects/jessfleischer/zero-waste-pullover>
- Formlabs. (2019). How 3D Printing is Disrupting the \$280 Billion Jewelry Industry <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printed-jewelry/>
- Gardan, J. (2019). Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends. Virtual and Physical Prototyping, 14(1), 1-18. <https://www.tandfonline.com/doi/epub/10.1080/17452759.2018.1518016?needAccess=true>
- Gebhardt, A., Kessler, J., & Thurn, L. (2018). 3D printing: understanding additive manufacturing. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Gebler, M., Uiterkamp, A. J. S., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. Energy policy, 74, 158-167. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421514004868>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. Journal of cleaner production, 252, 119869. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619347390>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). The use of multiple materials in additive manufacturing. additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing, 436-449. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-1120-9\\_17](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-1120-9_17)
- Gildform. <https://www.gildform.com/>
- Glynn R., (2006). Smart Materials1: Definition Bartlett School of Architecture, UCL. <http://www.interactivearchitecture.org/smart-materials-1-definition.html>
- Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines. Materials (Basel), 10(6), 672. <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/672>
- Grant L., (2016). How to 3D print onto fabric. Instructables. <http://www.instructables.com/id/How-to-3D-Print-OntoFabric/>
- Gregurić, L. (2022) Adidas 3D Printed Shoes: The Latest Advancements. All3DP, Information on <https://all3dp.com/2/adidas-3d-printed-shoes/>
- Grimmelsmann, N., Kreuziger, M., Korger, M., Meissner, H., Ehrmann, A. (2018). Adhesion of 3D printed material on textile substrates. Rapid Prototyping Journal, 24(1), 166-170. [https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-05-2016-0086/full/html?utm\\_campaign=Emerald\\_Engineering\\_PPV\\_Dec22\\_RoN](https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-05-2016-0086/full/html?utm_campaign=Emerald_Engineering_PPV_Dec22_RoN)
- Grothe, T., Brockhagen, B., Storck, J. L. (2020). Three-dimensional printing resin on different textile substrates using stereolithography: A proof of concept. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 15, 1558925020933440. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1558925020933440>
- Gürcüm, B. H., Börklü, H. R., Sezer, K., & Eren, O. (2018). Implementing 3D Printed Structures as the Newest Textile Form. J Fashion Technol Textile Eng S4: 019. of, 7, 2. [https://www.academia.edu/64932088/Implementing\\_3D\\_Printed\\_Structures\\_as\\_the\\_Newest\\_Textile\\_Form](https://www.academia.edu/64932088/Implementing_3D_Printed_Structures_as_the_Newest_Textile_Form)
- Haines, J. (2022). History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? | All3DP <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- Halloran, J. W., Tomeckova, V., Gentry, S., Das, S., Cilino, P., Yuan, D., Long, D., et al. (2011). Photopolymerization of powder suspensions for shaping ceramics. Journal of the European Ceramic Society, 31(14), 2613-2619. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955221910005613>
- Ham, B. (2021). Leveraging a 3D printer “defect” to create a new quasi-textile, Massachusetts Institute of Technology. <https://news.mit.edu/2020/defextiles-leveraging-3d-printer-defect-to-create-quasi-textiles-1020>
- Hay, Z. (2021). 3D printed fabric: The most promising projects. <https://all3dp.com/2/3d-printed-fabric-most-promising-project/>
- Hemmings, J. (2020). Iris van Herpen: Transforming Fashion. Fashion theory, 24(2), 287-291. Iris van Herpen: Transforming Fashion: Fashion Theory: Vol 24, No 2 (tandfonline.com)
- Hennessey, R. (2021). 3D printing hits the fashion world. <https://www.forbes.com/sites/rachelhennessey/2013/08/07/3-d-printed-clothes-could-be-the-next-big-thing-to-hit-fashion/?sh=af126d066f22>
- Hermans, G. (2012). A model for evaluating the solution space of mass customization toolkits. International Journal of Industrial Engineering and Management, 3 (4), 205–214. [https://www.iim.ftn.uns.ac.rs/images/journal/volume3/ijiem\\_vol3\\_no4\\_5.pdf](https://www.iim.ftn.uns.ac.rs/images/journal/volume3/ijiem_vol3_no4_5.pdf)
- Herpen, I. V. (2020b). Crystallization | Couture. <https://www.irisvanherpen.com/haute-couture/crystallization>
- Hipolite, W. (2015). Chanel’s Karl Lagerfeld stuns the celebrities with 3D printed fashion design. <https://3dprint.com/79654/chanel-lagerfeld-3d-printed/>
- Hong, K. H., Lee, H. (2020). Development of hip protectors for snowboarding utilizing 3D modeling and 3D printing. Fashion and Textiles, 7(1), 1-19. <https://fashionandtextiles.springeropen.com/articles/10.1186/s40691-020-00236-3>
- Howarth, D. (2014). Noa Raviv uses grid patterns and 3D printing in fashion collection. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2014/08/21/noa-raviv-hard-copy-fashion-collection-grid-patterns-3d-printing/>
- Howarth, D. (2020). Iris van Herpen exhibition in Calais.

<https://www.dezeen.com/2013/04/22/iris-van-herpen-exhibition-at-the-international-centre-for-lace-and-fashion/>

- Huber, T., Müssig, J., Curnow, O., Pang, S., Bickerton, S., & Staiger, M. P. (2012). A critical review of all-cellulose composites. *Journal of Materials Science*, 47, 1171-1186. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-011-5774-3>
- Hudson, S. E. (2014). Printing teddy bears: a technique for 3D printing of soft interactive objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 459-468). <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2556288.2557338>
- Ibrahim, D., Broilo, T. L., Heitz, C., de Oliveira, M. G., de Oliveira, H. W., Nobre, S. M. W., Silva, D. N., et al. (2009). Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet™ models in the reproduction of mandibular anatomy. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 37(3), 167-173. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010518208001777?via%3Dihub>
- ISO/ASTM 52900:2021(en) Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- ISO/ASTM 52900:2015. (2015, December). ISO. <https://www.iso.org/standard/69669.html>
- ISO/ASTM 52900:2015(en). Additive manufacturing- General principles- Terminology <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>
- Istook, C. L., Newcomb, E. A., Lim, H. (2011). Three-dimensional (3D) technologies for apparel and textile design. In *Computer technology for textiles and apparel* (pp. 296-325). Woodhead Publishing
- Jacobs, P. F. (1992). *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.
- Jin, P., Fan, J., Zheng, R., Chen, Q., Liu, L., Jiang, R., Zhang, H. (2023). Design and Research of Automatic Garment-Pattern-Generation System Based on Parameterized Design. *Sustainability*, 15(2), 1268. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1268>
- Julia Daviy presents a 3D-printed ready-to-wear collection. (n.d.). PROMOSTYL. <https://promostyl.com/julia-daviy-presente-une-collection-de-pret-a-porter-imprimee-en-3d/?lang=en>
- Kabir, S. F., Mathur, K., & Seyam, A. F. M. (2021). Impact resistance and failure mechanism of 3D printed continuous fiber-reinforced cellular composites. *The Journal of The Textile Institute*, 112(5), 752-766. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000.2020.1778223>
- Kantaros, A., Ganetsos, T., Piromalis, D. (2023). 3D and 4D Printing as Integrated Manufacturing Methods of Industry 4.0. *Kantaros, A., Ganetsos, T. & Piromalis, D. (2023). 3D and 4D Printing as Integrated Manufacturing Methods of Industry, 4, 12-22.* [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4378767](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4378767)
- Kaynak, B., Spoerk, M., Shirole, A., Ziegler, W., & Sapkota, J. (2018). Polypropylene/cellulose composites for material extrusion additive manufacturing. *Macromolecular materials and engineering*, 303(5), 1800037. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/mame.201800037>
- Kim, K., Zhu, W., Qu, X., Aaronson, C., McCall, W. R., Chen, S., Sirbuly, D. J. (2014). 3D optical printing of piezoelectric nanoparticle-polymer composite materials. *ACS nano*, 8(10), 9799-9806. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nn503268f>

- Kim, S. G., Song, J. E., & Kim, H. R. (2020). Development of fabrics by digital light processing three-dimensional printing technology and using a polyurethane acrylate photopolymer. *Textile Research Journal*, 90(7-8), 847-856. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0040517519881821>
- Kim, S., Seong, H., Her, Y., & Chun, J. (2019). A study of the development and improvement of fashion products using a FDM type 3D printer. *Fashion and Textiles*, 6(1), 1-24. <https://fashionandtextiles.springeropen.com/articles/10.1186/s40691-018-0162-0>
- Klarmann, A. (2021). Will 3D printing save our environment? <https://all3dp.com/will-3d-printing-save-our-environment/>
- Koerner, J. (2017). <https://www.juliakoerner.com/about-biography>
- Koerner, J. (2020). Salzburg | About. <https://www.juliakoerner.com/about-biography>
- Koo, H., & Zarate, A. (2015). Microspace transmorpho. In *International Textile and Apparel Association Annual Conference Proceedings* (Vol. 72, No. 1). Iowa State University Digital Press. <https://www.iastatedigitalpress.com/itaa/article/id/2508/>
- Korger, M., Bergschneider, J., Lutz, M., Mahltig, B., Finsterbusch, K., Rabe, M. (2016). Possible applications of 3D printing technology on textile substrates. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 141, No. 1, p. 012011). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/141/1/012011/meta>
- Korger, M., Glogowsky, A., Sanduloff, S., Steinem, C., Huysman, S., Horn, B., Rabe, M., et al. (2020). Testing thermoplastic elastomers selected as flexible three-dimensional printing materials for functional garment and technical textile applications. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1558925020924599. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1558925020924599>
- Kowsari, K., Akbari, S., Wang, D., Fang, N. X., & Ge, Q. (2018). High-efficiency high-resolution multimaterial fabrication for digital light processing-based three-dimensional printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 5(3), 185-193. <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/3dp.2018.0004>
- Koziar, T., Döpke, C., Grimmelsmann, N., Juhász Junger, I., Ehrmann, A. (2018). Influence of fabric pretreatment on adhesion of three-dimensional printed material on textile substrates. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(8), 1687814018792316. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814018792316>
- Koziar, T., Trabelsi, M., Mamun, A., Sabantina, L., Ehrmann, A. (2019). Stabilization of electrospun nanofiber mats used for filters by 3D printing. *Polymers*, 11(10), 1618. <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/10/1618>
- Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357-371. <https://www.emerald.com/in-sight/content/doi/10.1108/01445150310698652/full/html?src=recsys>
- Krzywinski, S., Siegmund, J. (2017). 3D product development for loose-fitting garments based on parametric human models. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 254, No. 15, p. 152006). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/254/15/152006/pdf>
- Kuang, X., Yue, L., Qi, H. J. (2023). Introduction to 4D Printing: Concepts and Material Systems. *Additive Manufacturing Technology: Design, Optimization, and Modeling*, 1-42. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527833931.ch1>

- Kuhn, R., Minuzzi, R. F. B. (2015). The 3D printing's panorama in fashion design. *Museu, Memória e Design. Moda Documenta*, 11(1), 1–12.  
<https://silo.tips/download/the-3d-printing-s-panorama-in-fashion-design>
- Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R., Martin, N. (2016). 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. *Materials & Design*, 96, 106-114.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127516301654>
- Leading edge forum (LEF) (2012). 3D Printing and the Future of Manufacturing pp 1-36  
<https://www.scribd.com/document/440596517/3D-Printing-and-the-Future-of-Manufacturing-by-CSC-2012-pdf>
- Lee, A. Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). Two-way 4D printing: a review on the reversibility of 3D-printed shape memory materials. *Engineering*, 3(5), 663-674.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-017-0042-x>
- Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP annals*, 52(2), 589-609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60206-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6)
- Liu, F., Urban, M. W. (2010). Recent advances and challenges in designing stimuli-responsive polymers. *Progress in polymer science*, 35(1-2), 3-23.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670009001002>
- Liu, Y., Shaw, B., Dickey, M. D., Genzer, J. (2017). Sequential self-folding of polymer sheets. *Science Advances*, 3(3), e1602417.  
<https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.1602417>
- Long, W. J., Tao, J. L., Lin, C., Gu, Y. C., Mei, L., Duan, H. B., & Xing, F. (2019). Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118054.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619329245>
- Low, Z. X., Chua, Y. T., Ray, B. M., Mattia, D., Metcalfe, I. S., & Patterson, D. A. (2017). Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of membrane science*, 523, 596-613.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738816304215>
- Lyu, Z., Wang, J., Chen, Y. (2023). 4D Printing: Interdisciplinary Integration of Smart Materials, Structural Design, and New Functionality. *International Journal of Extreme Manufacturing*.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-7990/ace090/meta>
- MacLachlan, L. (n.d.). About Lynne... Lynne MacLachlan Studio. Retrieved August 7, 2023, from <https://lynnemaclachlan.co.uk/pages/about-us>
- MakerBot. (2021). MakerBot and designer Francis Bitonti collaborate on New Skins Workshop to create fabulous 3D printed dress.  
<https://www.businesswire.com/news/home/20140312006034/en/MakerBot-Designer-Francis-Bitonti-Collaborate-Skins-Workshop>
- Malengier, B., Hertleer, C., Van Langenhove, L., Cardon, L. (2017). 3D printing on textiles: testing of adhesion. In *International conference on intelligent textiles and mass customisation*.  
<https://biblio.ugent.be/publication/8535084>
- MaterialDistrict. (2021). 3D printed surface.  
<https://materialdistrict.com/material/3d-printed-surface/#moved>
- Matias, E., & Rao, B. (2015). 3D printing: On its historical evolution and the implications for business. In *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)* (pp. 551-558). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7273052>
- Matich, D. (2015). Karl Lagerfeld showcases 3D printed Chanel at Paris fashion week. 3D printing industry. <https://3dprintingindustry.com/news/karl-lagerfeld-showcases-3d-printed-chanel-fashion-at-paris-fashion-week-53000/>
- McKenna, B. (2016) 3D-printed shoe race: How do Nike, Under Armour, and Adidas stack up.  
<https://www.fool.com/investing/general/2016/04/02/3d-printed-shoes-nike-underarmor-adidas-newbalance.aspx>
- McKnight, J. (2016). Threesasfour design. Dezeen. <http://www.dezeen.com/tag/design-by-threesasfour>
- McMahon, A. (2020). A visionary of 3-D-printed fashion | Press | Neri Oxman.  
<https://neri.media.mit.edu/press/article/a-visionary-of-3-d-printed-fashion.html>
- Melnikova, R., Ehrmann, A., & Finsterbusch, K. (2014). 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 62, No. 1, p. 012018). IOP publishing.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/62/1/012018/pdf>
- Meyer, P., Döpke, C., Ehrmann, A. (2019). Improving adhesion of three-dimensional printed objects on textile fabrics by polymer coating. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, 1558925019895257.
- Molitch-Hou M. (2022). Fashion 3D Printing Targeted by Stratasys with New Textile 3D Printer · <https://3dprint.com/290932/fashion-3d-printing-targeted-by-stratasys-with-new-textile-3d-printer/>
- Momeni, F., Sabzpooshan, S., Valizadeh, R., Morad, M. R., Liu, X., & Ni, J. (2019). Plant leaf-mimetic smart wind turbine blades by 4D printing. *Renewable Energy*, 130, 329-351.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118306207>
- Monget, K. (2013). *Victoria's Secret: The Making Of An Angel*. WWD, 206(99), 6-6.  
<https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA349178728&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=01495380&p=AONE&sw=w&userGroupName=anon%7E7dbeb156&aty=open-web-entry>
- Montagna, G., Carvalho, C. (2018). *Textiles, Identity and Innovation: Design the Future: Proceedings of the 1st International Textile Design Conference (D\_TEX 2017)*, November 2-4, 2017, Lisbon, Portugal. CRC Press.  
[https://books.google.gr/books?%20hl=en&lr=&id=31BtDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Design+the+Future%3B+Proceedings+of+the+1st+International+Textile+Design+Conference&ots=wciZYUJyxV&sig=SQyuvE93yyw9n4rOvJYp11i2ia4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Design%20the%20Future%3B%20Proceedings%20of%20the%201st%20International%20Textile%20Design%20Conference&f=false](https://books.google.gr/books?%20hl=en&lr=&id=31BtDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Design+the+Future%3B+Proceedings+of+the+1st+International+Textile+Design+Conference&ots=wciZYUJyxV&sig=SQyuvE93yyw9n4rOvJYp11i2ia4&redir_esc=y#v=onepage&q=Design%20the%20Future%3B%20Proceedings%20of%20the%201st%20International%20Textile%20Design%20Conference&f=false)
- Mora Sanchez M. Al. (n.d.). LOOM.-MARIALE.DESIGN. <https://www.mariale.design/loom>

- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707.  
<https://www.sciencedirect.com/sci-ence/article/pii/S0079642520300712>
- Mpofu, N. S., Mwasiagi, J. I., Nkiwane, L. C., Githinji, D. N. (2020). The use of statistical techniques to study the machine parameters affecting the properties of 3D printed cotton/polylactic acid fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1558925020928531.  
<https://excellencecenter.mu.ac.ke/wp-content/uploads/2020/07/Nonsinkelo-Sharon-Mpofu-The-use-of-statistical-techniques-to-study-the-machine-parameters-affecting-the-properties-of-3D-printed-cotton-PLA-fabrics.pdf>
- Mpofu, N. S., Mwasiagi, J. I., Nkiwane, L. C., Njuguna, D. (2019). Use of regression to study the effect of fabric parameters on the adhesion of 3D printed PLA polymer onto woven fabrics. *Fashion and Textiles*, 6, 1-12. <https://link.springer.com/article/10.1186/s40691-019-0180-6>
- Mu, Q., Wang, L., Dunn, C. K., Kuang, X., Duan, F., Zhang, Z., Wang, T., et al. (2017). Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing*, 18, 74-83.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860417300398>
- Nachtigall, T. R., Tomico, O., Wakkary, R., Wensveen, S., Van Dongen, P., & Van Noorden, L. T. (2018, April). Towards ultra personalized 4D printed shoes. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-9).  
[https://www.researchgate.net/publication/324660035\\_Towards\\_Ultra\\_Personalized\\_4D\\_Printed\\_Shoes](https://www.researchgate.net/publication/324660035_Towards_Ultra_Personalized_4D_Printed_Shoes)
- Narula, A., Pastore, C. M., Schmelzeisen, D., El Basri, S., Schenk, J., & Shajoo, S. (2018). Effect of knit and print parameters on peel strength of hybrid 3-D printed textiles. *Journal of Textiles and Fibrous Materials*, 1, 2515221117749251.  
<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/2515221117749251>
- Nervous System. (2020b). Kinematic Petals Dress—Nervous System.  
<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/kinematic-petals-dress/>
- Nervous System. (2020c). Kinematics dress—Nervous System.  
<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/sets/kinematics-dress/>
- Nike News. (2021). What is nike flyprint?  
<https://news.nike.com/news/nike-flyprint-3d-printed-textile>
- Noorani, R. (2017). 3D printing: technology, applications, and selection. CRC Press.  
[https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=hD0PEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=3D+printing:+technology,+applications,+and+selection&ots=w5N-qL3Ah9&sig=wkKJPCSVdHcQia5KeJVAzQAT7ZA&redir\\_esc=y#v=onepage&q=3D%20printing%3A%20technology%2C%20applications%2C%20and%20selection&f=false](https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=hD0PEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=3D+printing:+technology,+applications,+and+selection&ots=w5N-qL3Ah9&sig=wkKJPCSVdHcQia5KeJVAzQAT7ZA&redir_esc=y#v=onepage&q=3D%20printing%3A%20technology%2C%20applications%2C%20and%20selection&f=false)
- Oprea, M., & Voicu, S. I. (2020). Recent advances in composites based on cellulose derivatives for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116683.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861720308572>
- Palaganas, N. B., Mangadlao, J. D., de Leon, A. C. C., Palaganas, J. O., Pangilinan, K. D., Lee, Y. J., Advincula, R. C. (2017). 3D printing of photocurable cellulose nanocrystal composite for fabrication of complex architectures via stereolithography. *ACS applied materials & interfaces*, 9(39), 34314-34324. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.7b09223>
- Papachristou, E., Kyratsis, P., Bilalis, N. (2019). A comparative study of open-source and licensed CAD software to support garment development learning. *Machines*, 7(2), 30.  
<https://www.mdpi.com/2075-1702/7/2/30>
- Parkes J. (2022). Dress sprayed onto model on Coperni catwalk at Paris Fashion Week  
<https://www.dezeen.com/2022/10/04/spray-on-dress-paris-fashion-coperni-bella-hadid/>
- Partsch, L., Vassiliadis, S., & Papageorgas, P. (2015). 3D printed textile fabrics structures. In *The International Istanbul Textile Congress*, Istanbul, Turkey.  
[https://www.researchgate.net/profile/Savvas-Vassiliadis/publication/283288900\\_3D\\_PRINTED\\_TEXTILE\\_FABRICS\\_STRUCTURES/links/5630be5308ae1bdcebcf23bb/3D-PRINTED-TEXTILE-FABRICS-STRUCTURES.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Savvas-Vassiliadis/publication/283288900_3D_PRINTED_TEXTILE_FABRICS_STRUCTURES/links/5630be5308ae1bdcebcf23bb/3D-PRINTED-TEXTILE-FABRICS-STRUCTURES.pdf)
- Pasricha, A., & Greeninger, R. (2018). Exploration of 3D printing to create zero-waste sustainable fashion notions and jewelry. *Fashion and Textiles*, 5(1), 1-18.  
<https://fashionandtextiles.springeropen.com/articles/10.1186/s40691-018-0152-2>
- Pearson, A. (2020). 3D printed fashion for New York Fashion Week, Stratasys.  
<https://www.stratasys.com/explore/blog/2016/3d-printed-dresses-new-york-fashion-week>
- Peh, K., Thongdee, W. (2018). Feetz—Shoes for the road ahead. Feetz — Shoes for the Road Ahead.  
<https://www.restorativeinnovation.com/blog/feetz-shoes-for-the-road-ahead>
- Pei, E., Shen, J., & Watling, J. (2015). Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 556-571.  
[https://www.researchgate.net/publication/282461573\\_Direct\\_3D\\_printing\\_of\\_polymers\\_onto\\_textiles\\_Experimental\\_studies\\_and\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/282461573_Direct_3D_printing_of_polymers_onto_textiles_Experimental_studies_and_applications)
- Peleg, D. (2020). Forget shopping. Soon you'll download your new clothes | Danit Peleg | TED talks —YouTube, online video.  
<https://www.youtube.com/watch?v=w1oKe8OaPbk&list=ULiQsnObyii4Q&index=991>
- Peleg, D. (n.d.). About | Danit Peleg. <https://danitpeleg.com/about/>
- Pereira, G. R., Gasi, F., Lourenço, S. R. (2019). Review, analysis, and classification of 3D printing literature: types of research and technology benefits. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 6(6).  
[https://ijaers.com/uploads/issue\\_files/18IJAERS-06201910-Review.pdf](https://ijaers.com/uploads/issue_files/18IJAERS-06201910-Review.pdf)
- Perry, A. (2018). 3D-printed apparel and 3D-printer: exploring advantages, concerns, and purchases. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 11(1), 95-103.  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17543266.2017.1306118>
- Petrovic, V., Vicente Haro Gonzalez, J., Jordá Ferrando, O., Delgado Gordillo, J., Ramón Blasco Puchades, J., & Portolés Griñan, L. (2011). Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. *International Journal of Production Research*, 49(4), 1061-1079. [https://www.researchgate.net/publication/325359747\\_Effective\\_use\\_of\\_3D\\_printing\\_in\\_the\\_innovation\\_process](https://www.researchgate.net/publication/325359747_Effective_use_of_3D_printing_in_the_innovation_process), <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540903479786>
- Pohl, G. (2010). *Textiles, polymers and composites for buildings*. Elsevier.
- Powder Bed Fusion (n.d.). Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>

- Precision, B. (2016). Timberland saves time and money, finds the right style with 3D printing. <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/timberland-company>
- Print to Fit: Iris van Herpen's 3D Printed Dress. (2014, October 6). 3D Systems. <https://www.3dsystems.com/blog/2014/10/print-fit-iris-van-herpens-3d-printed-dress>
- Reeves, P., Tuck, C., & Hague, R. (2011). Additive manufacturing for mass customization. In Mass Customization: Engineering and Managing Global Operations (pp. 275-289). London: Springer London. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84996-489-0\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84996-489-0_13)
- Rhinoceros. Rhino - Features <https://www.rhino3d.com/features/>
- Richardot, A. (2020). 3D printed fashion: Everything you need to know. <https://www.sculpteo.com/blog/2018/01/24/3d-printed-fashion-why-is-additive-manufacturing-interesting-for-fashion>
- Rivera, M. L., Moukperian, M., Ashbrook, D., Mankoff, J., Hudson, S. E. (2017). Stretching the bounds of 3D printing with embedded textiles. In Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems (pp. 497-508). <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3025453.3025460>
- Rouse, M. (2023). Output Device. Techopedia. <https://www.techopedia.com/definition/3538/output-device>
- Sabantina, L., Kinzel, F., Ehrmann, A., Finsterbusch, K. (2015). Combining 3D printed forms with textile structures-mechanical and geometrical properties of multi-material systems. In IOP conference series: Materials science and engineering (Vol. 87, No. 1, p. 012005). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/87/1/012005/meta>
- Sanatgar, R. H., Campagne, C., Nierstrasz, V. (2017). Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. Applied Surface Science, 403, 551-563. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433217301137>
- Sarcar, M. M. M., Rao, K. M., & Narayan, K. L. (2008). Computer aided design and manufacturing. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Saunders, S. (2021). Sinterit's SLS 3D printing and flexible materials used to make strong textiles for opera costumes—3DPrint.com | The voice of 3D printing/additive manufacturing. <https://3dprint.com/237610/sinterit-flexible-strong-textiles-for-opera-costumes/>
- Sawant, S. (2021) Generative Design And 3D Printing In Fashion <https://parametric-architecture.com/generative-design-and-3d-printing-in-fashion/>
- Scott, C. (2017). Fashion Designer Babette Sperling Uses WillowFlex Filament to 3D Print Secret Messages in Natural Materials. 3DPrint.Com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. <https://3dprint.com/161341/babette-sterling-fashion-design/>
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. Procedia Manufacturing, 35, 1286-1296. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>

- Shaw, M. (2016). 3D Printing Technology: Its Applications and Scope in Fashion Industry. Man-Made Textiles in India, 7-10.

[https://www.researchgate.net/publication/318128860\\_3D\\_Printing\\_TechnologyIts\\_application\\_and\\_scope\\_in\\_Fashion\\_Industry](https://www.researchgate.net/publication/318128860_3D_Printing_TechnologyIts_application_and_scope_in_Fashion_Industry)

- Sheikh, A., Abourehab, M. A., Kesharwani, P. (2023). The clinical significance of 4D printing. Drug Discovery Today, 28(1), 103391. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359644622003841>
- Shima Seiki <https://www.shimaseiki.com/>
- Shin, S. H., Chang, H. J., Yoo, S. (2016). A case study of the 3D design process applied for customized art wears. Paper presented at the International Textile and Apparel Association Annual Conference. Vancouver, BC. [http://lib.dr.iastate.edu/itaa\\_proceedings/](http://lib.dr.iastate.edu/itaa_proceedings/)
- Singh, R., Singh, V., & Saini, M. S. (2010). Experimental investigations for statistically controlled rapid moulding solution of plastics using polyjet printing. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 44274, pp. 1049-1053)
- Solís Pinargote, N. W., Smirnov, A., Peretyagin, N., Seleznev, A., & Peretyagin, P. (2020). Direct ink writing technology (3d printing) of graphene-based ceramic nanocomposites: A review. Nanomaterials, 10(7), 1300. <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/7/1300>
- Spahiu, T., Al-Arabiyyat, M., Martens, Y., Ehrmann, A., Piperi, E., Shehi, E. (2018). Adhesion of 3D printing polymers on textile fabrics for garment production. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 459, p. 012065). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/459/1/012065/meta>
- Spahiu, T., Canaj, E., & Shehi, E. (2020). 3D printing for clothing production. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 15. <https://doi.org/10.1177/1558925020948216>
- Spahiu, T., Grimmelsmann, N., Ehrmann, A., Piperi, E., Shehi, E. (2017). Effect of 3D printing on textile fabric. Eng. Entrep, 1, 1-7. [https://www.researchgate.net/profile/An-drea-Ehrmann/publication/321228371\\_Effect\\_of\\_3D\\_printing\\_on\\_textile\\_fabric/links/5a1c723e4585153731890817/Effect-of-3D-printing-on-textile-fabric.pdf](https://www.researchgate.net/profile/An-drea-Ehrmann/publication/321228371_Effect_of_3D_printing_on_textile_fabric/links/5a1c723e4585153731890817/Effect-of-3D-printing-on-textile-fabric.pdf)
- Steinberg, J. (2020). At Paralympics, a 3D-printed dress for a dance with a robot. Ανάκτηση 05-08-2023 από <https://www.timesofisrael.com/at-paralympics-a-3d-printed-dress-for-a-dance-with-a-robot/>
- Stratasys. (2014). Hard Copy. 3D Fashion by Stratasys. <https://3dprintedart.stratasys.com/portfolio-1/hard-copy-dress>
- Stratasys. (2016). Harmonograph Dress. 3D Fashion by Stratasys. <https://3dprintedart.stratasys.com/portfolio-1/harmonograph-dress>
- Stratasys. (2016). Oscillation Dress. 3D Fashion Stratasys. <https://3dprintedart.stratasys.com/portfolio-1/oscillation-dress>
- Stratasys. (2016). Pangolin Dress. 3D Fashion by Stratasys. <https://3dprintedart.stratasys.com/portfolio-1/pangolin-dress>
- Stratasys. (2019). Greta Oto Dress. 3D Fashion by Stratasys. <https://3dprintedart.stratasys.com/portfolio-1/greta-oto-dress>
- Stratasys. (n.d.). Agilus 30—Polyjet Technology Material—Stratasys.

<https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/polyjet-materials/agilus30/>

• Sun, L., Lu, S. (2015). The 3D printing era: A conceptual model for the textile and apparel industry. Paper presented at the International Textile and Apparel Association Annual Conference. Santa Fe, NM.

[http://lib.dr.iastate.edu/itaa\\_proceed-ings/](http://lib.dr.iastate.edu/itaa_proceed-ings/)

• Sun, L., Zhao, L. (2017). Envisioning the era of 3D printing: a conceptual model for the fashion industry. *Fashion and Textiles*, 4, 1-16

• Tamez, M. B. A., & Taha, I. (2021). A review of additive manufacturing technologies and markets for thermosetting resins and their potential for carbon fiber integration. *Additive Manufacturing*, 37, 101748.

<https://www.tandfonline.com/doi/epub/10.1080/17452759.2018.1518016?needAccess=true>

• TamiCare, Speedy Additive Manufacturing of Fabrics. (2021).

<https://www.tamicare.com/manufacture>

• Tan, C., Chung, H., Barton, K., Hu, S. J., Freiheit, T. (2020). Incorporating customer personalization preferences in open product architecture design. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 72-83.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612520300704>

• Taylor, P. (2021). How green is my 3D printer? Scientists warn of heavy metal pollution—3DPrint.com. <https://3dprint.com/6388/green-3d-printing/>

• Tee, Y. L., Tran, P. (2021). On bioinspired 4d printing: materials, design and potential applications. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 19(5), 642-652.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14484846.2021.1988434>

• Tenhunen, T. M., Moslemian, O., Kammiovirta, K., Harlin, A., Kääriäinen, P., Österberg, M., Orelma, H., et al. (2018). Surface tailoring and design-driven prototyping of fabrics with 3D-printing: An all-cellulose approach. *Materials & Design*, 140, 409-419.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127517311176>

• ThreeASFOUR. (2020). Bahai dress 3D printed resin flat pattern pieces of fractal interlocking weave. <https://threeasfour.tumblr.com/post/144768013895/threeasfour-bahai-dress-3d-printed-resin-flat>

• Thymianidis, M., Achillas, C., Tzetzis, D., & Iakovou, E. (2012). Modern additive manufacturing technologies: an up-to-date synthesis and impact on supply chain design. In 2nd Olympus International Conference on Supply Chains. ICSC.

[https://cm.ihu.gr/LOGISTICS/images/logisticsdocs/icsc2012/fullabstracts/session\\_2/2\\_3\\_ICSC\\_12\\_THYMIANIDIS.pdf](https://cm.ihu.gr/LOGISTICS/images/logisticsdocs/icsc2012/fullabstracts/session_2/2_3_ICSC_12_THYMIANIDIS.pdf)

• Tibbits, S. (2014). 4D printing: multi-material shape change. *Architectural Design*, 84(1), 116-121.

[https://www.researchgate.net/publication/260306804\\_4D\\_Printing\\_Multi-Material\\_Shape\\_Change](https://www.researchgate.net/publication/260306804_4D_Printing_Multi-Material_Shape_Change)

• Tibbits, S., McKnelly, C., Olguin, C., Dikovskiy, D., Hirsch, S. (2014). 4D printing and universal transformation. In Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA). Acadia.

[https://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia14\\_539.content.pdf](https://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia14_539.content.pdf)

• Tiller, B., Reid, A., Zhu, B., Guerreiro, J., Domingo-Roca, R., Jackson, J. C., & Windmill, J. F. C. (2019). Piezoelectric microphone via a digital light processing 3D printing process. *Materials & Design*, 165, 107593.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519300139>

• Tiwari, S. K., Pande, S., Agrawal, S., & Bobade, S. M. (2015). Selection of selective laser sintering materials for different applications. *Rapid prototyping journal*, 21(6), 630-648.

• Tyler, D. J. (2009). *Carr and Latham's technology of clothing manufacture*. John Wiley & Sons

• Unger, L., Scheideler, M., Meyer, P., Harland, J., Görzen, A., Wortmann, M., Ehrmann, A., et al. (2018). Increasing Adhesion of 3D Printing on Textile Fabrics by Polymer Coating. *Tekstilec*, 61(4). <http://www.tekstilec.si/wp-content/uploads/2018/12/265-271.pdf>

• Vanderploeg, A., Lee, S. E., & Mamp, M. (2017). The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10(2), 170-179.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17543266.2016.1223355>

• Varadan, V. K., Vinoy, K. J., Gopalakrishnan, S. (2006). *Smart material systems and MEMS: design and development methodologies*. John Wiley & Sons.

[https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=n-Q2nXeeUmwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Smart+Material+Systems+and+MEMS:+Design+and+Development+Methodologies&ots=OEm74uOJKg&sig=9o8Zw-eXsaRgRnVIKAcIKQJvs6s&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Smart%20Material%20Systems%20and%20MEMS%3A%20Design%20and%20Development%20Methodologies&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=n-Q2nXeeUmwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Smart+Material+Systems+and+MEMS:+Design+and+Development+Methodologies&ots=OEm74uOJKg&sig=9o8Zw-eXsaRgRnVIKAcIKQJvs6s&redir_esc=y#v=onepage&q=Smart%20Material%20Systems%20and%20MEMS%3A%20Design%20and%20Development%20Methodologies&f=false)

[https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=n-Q2nXeeUmwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Smart+Material+Systems+and+MEMS:+Design+and+Development+Methodologies&ots=OEm74uOJKg&sig=9o8Zw-eXsaRgRnVIKAcIKQJvs6s&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Smart%20Material%20Systems%20and%20MEMS%3A%20Design%20and%20Development%20Methodologies&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=n-Q2nXeeUmwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Smart+Material+Systems+and+MEMS:+Design+and+Development+Methodologies&ots=OEm74uOJKg&sig=9o8Zw-eXsaRgRnVIKAcIKQJvs6s&redir_esc=y#v=onepage&q=Smart%20Material%20Systems%20and%20MEMS%3A%20Design%20and%20Development%20Methodologies&f=false)

• VAT Photopolymerisation | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University. (n.d.). Loughborough University.

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

• Vatanparast, S., Boschetto, A., Bottini, L., Gaudenzi, P. (2023). New trends in 4D printing: a critical review. *Applied Sciences*, 13(13), 7744.

[https://www.researchgate.net/publication/372419577\\_New\\_Trends\\_in\\_4D\\_Printing\\_A\\_Critical\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/372419577_New_Trends_in_4D_Printing_A_Critical_Review)

[https://www.researchgate.net/publication/372419577\\_New\\_Trends\\_in\\_4D\\_Printing\\_A\\_Critical\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/372419577_New_Trends_in_4D_Printing_A_Critical_Review)

• Ventola, C. L. (2014). Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10), 704.

• Verlinden, J., Doubrovski, Z., Brink, I., van den Verkerk, T., Herpen, I. V. (2020). TU Delft scientists work on 3D printed dress designed by Iris van.

<https://www.tudelft.nl/en/2018/tu-delft/tu-delft-scientists-work-on-3d-printed-dress-designed-by-iris-van-herpen/>

• Walsh, Al., Bio <https://www.alexiswalsh.com/bio>

• Wang, D., Chen, D., & Chen, Z. (2020). Recent progress in 3D printing of bioinspired structures. *Frontiers in Materials*, 7, 286.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2020.00286/full>

• Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836816321230>



- Watkin, H. (2021). The making of the kinematics dress by Nervous System | All3DP. <https://all3dp.com/kinematics-dress-nervous-system/>
- Weller, C., Klier, R., Piller, F. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Product Economics*, 164, 43–56. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527315000547?via%3Dihub>
- What is Binder Jetting? (Definition, Pros, Cons and Uses). (n.d.). <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-binder-jetting.aspx>
- What is Electron Beam Melting (EBM)? (n.d.). Markforged. <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-electron-beam-melting-cbm>
- What is Sheet Lamination? (n.d.). Engineering Product Design. <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
- What is SLA 3D printing? (n.d.). Hubs. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- Wilson Al. R., (2006). Smart Materials. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.1913011808011822.a01.pub2>
- Worth, J. (2022). How does 3D printing reduce waste? <https://toolbox.igus.com/motion-plastics-blog/3d-printing-waste-reduction>
- Wu, S., Zeng, T., Liu, Z., Ma, G., Xiong, Z., Zuo, L., Zhou, Z. (2022). 3D Printing Technology for Smart Clothing: A Topic Review. *Materials*, 15(20), 7391. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/20/7391>
- Xometry. (2022). FDM vs. FFF: Differences and Comparison. Xometry. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/fdm-vs-fff-3d-printing/>
- Xue, D., Zhang, J., Wang, Y., & Mei, D. (2019). Digital light processing-based 3D printing of cell-seeding hydrogel scaffolds with regionally varied stiffness. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(9), 4825-4833. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsbiomaterials.9b00696>
- Yap, Y. L., Tan, Y. S. E., Tan, H. K. J., Peh, Z. K., Low, X. Y., Yeong, W. Y., Laude, A., et al. (2017). 3D printed bio-models for medical applications. *Rapid prototyping journal*, 23(2), 227-235. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-08-2015-0102/full/html>
- Yang, Z., Ma, Y., Jia, S., Zhang, C., Li, P., Zhang, Y., Li, Q. (2022). 3D-printed flexible phase-change nonwoven fabrics toward multifunctional clothing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(5), 7283-7291. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsami.1c21778>
- Yap, Y. L., Yeong, W. Y. (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review: This paper provides an insight into the future of 3D printing industries for fashion and jewellery products. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 195-201. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17452759.2014.938993?needAccess=true>
- Yu, K., Ritchie, A., Mao, Y., Dunn, M. L., Qi, H. J. (2015). Controlled sequential shape changing components by 3D printing of shape memory polymer multimaterials. *Procedia Iutam*, 12, 193-203. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210983814000947>
- Zafar, M. Q., Zhao, H. (2020). 4D printing: future insight in additive manufacturing. *Metals and Materials International*, 26, 564-585. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12540-019-00441-w>
- Zarek, M., Layani, M., Eliazar, S., Mansour, N., Cooperstein, I., Shukrun, E., Magdassi, S., et al. (2016). 4D printing shape memory polymers for dynamic jewellery and fashionwear. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(4), 263-270. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2016.1244085>
- Zeitoun L. (2022). 3D-printed garment from the ‘GnoMon’ collection by Ganit Goldstein, jointly with Stratasys LTD. Designboom <https://www.designboom.com/design/ganit-goldstein-gnomon-3d-printed-clothing-collection-parametric-textiles-07-29-2022/>
- Zero-waste International Alliance. (2009). ZW definition. Retrieved from the ZWIA website Zero Waste Definition - Zero Waste International Alliance (zwia.org)
- Zhang, M., Zhao, M., Jian, M., Wang, C., Yu, A., Yin, Z., Zhang, Y., et al. (2019). Printable smart pattern for multifunctional energy-management E-textile. *Matter*, 1(1), 168-179. [https://www.cell.com/matter/pdf/S2590-2385\(19\)30003-7.pdf](https://www.cell.com/matter/pdf/S2590-2385(19)30003-7.pdf)
- Zhang, X., Jiang, X. N., & Sun, C. (1999). Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 77(2), 149-156. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424799001892>
- Zhang, Z. L., Dong, X., Fan, Y. N., Yang, L. M., He, L., Song, F., Wang, Y. Z., et al. (2020). Chameleon-inspired variable coloration enabled by a highly flexible photonic cellulose film. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(41), 46710-46718. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.0c13551>
- Γιαννατσής, Ι., Δεδούσης, Β., & Κανελλίδης, Β. (2016). Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής και Τριδιάστατης Εκτύπωσης. [https://repository.kallipos.gr/bit-stream/11419/4524/2/02\\_chapter\\_3.pdf](https://repository.kallipos.gr/bit-stream/11419/4524/2/02_chapter_3.pdf)
- Nervous System. (2014). Kinematics Dress. Nervous System. <http://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/index.php?/sets/kinematics-dress/>
- Καλογεράκης Δ., Κρυφός Δ. (2023) 4D Printing: Λειτουργία και εφαρμογές. Μετάδοση Ισχύος. <https://www.metadosi-ischios.gr/4d-printing-leitoyrgia-kai-efarmoges/>
- Νικολαΐδης, Β. Κ. (2018). The impact of 3D printing on the traditional supply chain: A quantitative analysis (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης). <https://ikee.lib.auth.gr/record/303558/files/GRI-2019-23860.pdf>
- Σταυρίδου, Α., 2009. Αναδυόμενες ιδιότητες - έξυπνα υλικά. <https://matereality.wordpress.com/%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%B4%CF%85%CF%8C%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%82-%CE%B9%CE%B4%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B5%CF%82-%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD-%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%B9/>
- Στουραΐτης, Γ. (2021). Εφαρμογή της τεχνολογίας 3D printing στον κατασκευαστικό τομέα με έμφαση στα τιμμεντοειδή υλικά.

[dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/han-dle/123456789/53237/3d%20printing%20διδασκαλία.pdf?sequence=1](https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/han-dle/123456789/53237/3d%20printing%20διδασκαλία.pdf?sequence=1)

- Τράντζας, Γ. (2017). Pcsteps. Τι είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση και ποιες είναι οι εφαρμογές της. <https://www.pcsteps.gr/100046-%cf%84%cf%81%ce%b9%cf%83%ce%b4%ce%b9%ce%ac%cf%83%cf%84%ce%b1%cf%84%ce%b7-%ce%b5%ce%ba%cf%84%cf%8d%cf%80%cf%89%cf%83%ce%b7-3d-printing/>