



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

---

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

---

# Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης και 3D σχεδίασης



2021 ΠΑΤΡΑ

ΦΟΙΤΗΤΕΣ: ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΓΕΩΡΓΟΒΑΣΙΛΗΣ -, ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ ΚΑΛΑΒΡΟΥΖΙΩΤΗΣ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Διοικητικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών και αναφέρεται στις «ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ 3D ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ».

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον επιβλέπον καθηγητή, ο οποίος με την κατάλληλη καθοδήγησή του, μας βοήθησε στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Επιπλέον θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα μέλη της επιτροπής. Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για τη στήριξή τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία ψηφιακής κατασκευής, που αναφέρεται επίσης ως τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση ή προσθετική παραγωγή, δημιουργεί φυσικά αντικείμενα από μια γεωμετρική αναπαράσταση με διαδοχική προσθήκη υλικών. Η τεχνολογία εκτύπωσης 3D είναι μια ταχέως αναδύομενη τεχνολογία. Σήμερα, η Τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται ευρέως στον κόσμο. Η τεχνολογία εκτύπωσης 3D χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για τη μαζική εξατομίκευση, την παραγωγή οποιουδήποτε τύπου σχεδίων ανοιχτού κώδικα, στον τομέα της γεωργίας, στην υγειονομική περίθαλψη, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις τέχνες και στην αεροπορική βιομηχανία. Η τεχνολογία εκτύπωσης 3D μπορεί να εκτυπώσει ένα στρώμα αντικειμένου με εναπόθεση στρώματος υλικού απευθείας από ένα μοντέλο σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Αυτή η εργασία παρουσιάζει την επισκόπηση των τύπων των τεχνολογιών εκτύπωσης 3D, την εφαρμογή της τεχνολογίας εκτύπωσης 3D, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την τεχνολογία εκτύπωσης 3D στη μεταποιητική βιομηχανία, το κόστος χρήσης, τη διείσδυση της τεχνολογίας στην Ελλάδα και τέλος, τη μελλοντική εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας.

Λέξεις κλειδιά: 3D εκτύπωση, προσθετική παραγωγή, βιομηχανία κατασκευής

## ABSTRACT

Digital construction technology, also referred to as 3D printing or prosthetic production, creates natural objects from a geometric representation with the sequential addition of materials. 3D printing technology is a rapidly emerging technology. Today, 3D printing is widely used in the world. 3D printing technology is increasingly used for mass personalization, the production of any type of open source design, in agriculture, healthcare, the automotive industry, the arts and the aviation industry. 3D printing technology can print an object layer by depositing a layer of material directly from a computer-aided design (CAD) model. This paper presents the overview of the types of 3D printing technologies, the application of 3D printing technology, the materials used for 3D printing technology in the manufacturing industry, the cost of use, the penetration of technology in Greece and finally, its future development of technology.

Keywords: 3D printing, additivemanufacturing, manufacturing industry

## Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	- 10 -
1.1	Εισαγωγή-Ιστορική αναδρομή .....	- 10 -
1.2	Τι είναι η τρισδιάστατη 3D εκτύπωση .....	- 11 -
2.	ΤΕΧΝΙΚΕΣ 3D ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ .....	- 15 -
2.1	Σχεδιασμός 3D μοντέλου.....	- 15 -
2.1.1	Από το σημείο νέφους σε 3D μοντέλο .....	- 19 -
2.2	Τρισδιάστατη σχεδίαση με χρήση H/Y .....	- 21 -
2.2.1	Λογισμικό CAD .....	- 22 -
2.3	Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης.....	- 25 -
2.3.1	SLA (Stereolithography) Στερεολιθογραφία .....	- 26 -
2.3.2	FDM (FusedDepositionModeling) Κατασκευή μοντέλου με διαδοχική σύντηξη στρώσεων .....	- 27 -
2.3.3	SLS (Selective Laser Sintering) Επιλεκτική σύντηξη .....	- 28 -
2.3.4	Τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης με ink-jet (IJP) .....	- 29 -
2.3.5	LOM (LaminatedObjectManufacturing) Κατασκευή από συγκολλημένα φύλλα αντικειμένου.....	- 31 -
3.	3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ.....	- 33 -
3.1	Εφαρμογές στον επιχειρηματικό κόσμο .....	- 33 -
3.2	Κλάδοι παραγωγής όπου εφαρμόζεται η τρισδιάστατη εκτύπωση .....	- 34 -
3.2.1	Αεροναυπηγική .....	- 34 -
3.2.2	Ιατρική .....	- 36 -
3.2.3	Τέχνες.....	- 40 -
3.2.4	Ηλεκτρονικά εξαρτήματα .....	- 42 -
3.2.5	Κοσμήματα.....	- 44 -
3.2.6	Αυτοκινητοβιομηχανία.....	- 47 -
3.2.7	Οικιακές εφαρμογές .....	- 49 -

3.2.8	Εκτύπωση τροφίμων.....	- 51 -
3.3	Κόστος.....	- 54 -
3.3.1	Τεχνολογικό υπόβαθρο και μελέτες στο κόστος των 3D εκτυπωτών.....	- 56 -
3.3.2	Οικονομικά χαρακτηριστικά της προσθετικής παραγωγής.....	- 58 -
3.4	Επιδράσεις στο περιβάλλον.....	- 60 -
3.4.1	Κατανάλωση ενέργειας.....	- 61 -
3.4.2	Απόβλητα υλικά.....	- 63 -
3.4.3	Μόλυνση του αέρα.....	- 65 -
3.5	Διείσδυση της 3D εκτύπωσης στην Ελλάδα.....	- 68 -
3.6	Μελλοντική εξέλιξη.....	- 69 -
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 71 -
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 74 -
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	- 84 -

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AM: Προσθετική παραγωγή

CNC: Αριθμητικός έλεγχος υπολογιστή

DFE: Σχεδιασμός για το περιβάλλον

FDM: Κατασκευή συντηγμένων νημάτων

LCA: Κύκλος ζωής

PBF: Σύντηξη σε σκόνη

SLA: Στερεολιθογραφία

SLS: Επιλεκτική σύντηξη

VOC: Πτητικές οργανικές ενώσεις





## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Εισαγωγή-Ιστορική αναδρομή

Στο δισδιάστατο κόσμο των υπολογιστών, απλά χρειάζεται κανείς έναν εκτυπωτή στον υπολογιστή του, να καθορίσει τι θέλει να εκτυπωθεί και να πατήσει "Εκτύπωση". Όσον αφορά την εκτύπωση 3D, η κατάσταση είναι λίγο πιο περίπλοκη. Η τρέχουσα κατάσταση της εκτύπωσης 3D μοιάζει με τις πρώτες ημέρες της ανάπτυξης της τεχνολογίας της αεροπορίας. Όπως αναφέρεται από το «NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION». (2018), οι αδερφοί Ράιτ πέταξαν το ξύλινο πλαίσιο τους με μηχανισμό τέτοιο, που σήμερα τροφοδοτείται ένας χλοοκοπτικός κινητήρας. Σήμερα, η αγορά είναι έτοιμη να κατασκευάσει καλύτερα, αν όχι μεγαλύτερα, αεροσκάφη, αλλά ακόμα και αυτά είναι παραλλαγές της αρχικής ιδέας των αδερφών Ράιτ. Θα μπορούσε να θεωρηθεί λοιπόν, ότι είμαστε ξανά στην αρχή μιας ακόμη τεχνολογικής επανάστασης. Το που θα τελειώσει είναι εικασία όλων, αλλά δεδομένης της μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών μέχρι στιγμής, είναι σαφές ότι αυτό δεν είναι ένα παιχνίδι μόδας ή παιχνιδιού.

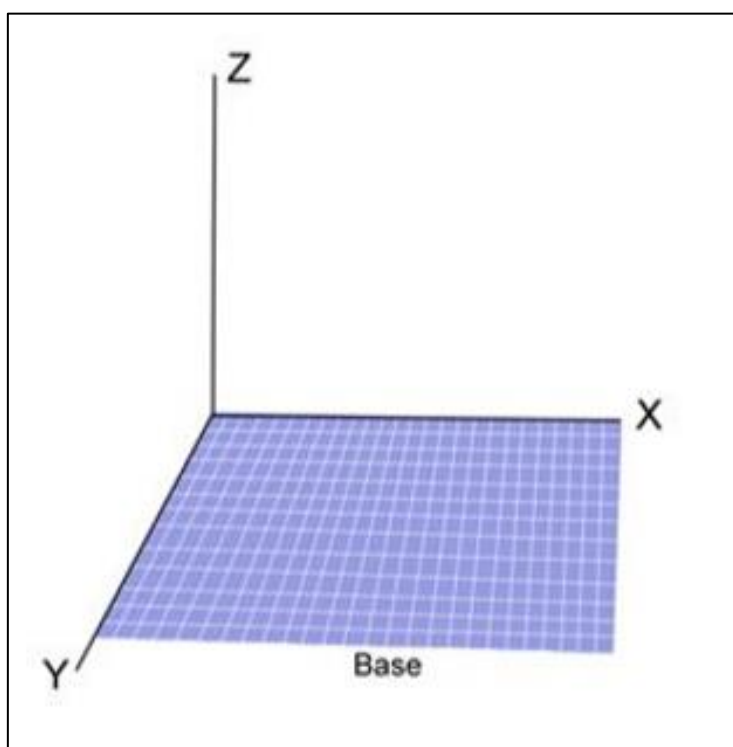
Η αρχική τεχνολογία ήταν η εκτύπωση 2D. Οι εκτυπωτές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του υπολογιστή για περισσότερα από 70 χρόνια. Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί και ενσωματωθεί σε υπολογιστικά συστήματα, που το καθιστούν μια απλή διαδικασία για τη λήψη δισδιάστατων τυπωμένων και γραφικών προβολών των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Τα γραφήματα των επιστημονικών, επιχειρηματικών και χρηματοοικονομικών αναλύσεων δημιουργούνται, εμφανίζονται και τελικά εκτυπώνονται αρκετά εύκολα. Τα αρχιτεκτονικά και καλλιτεχνικά σχέδια είναι άμεσα διαθέσιμα και εκτυπώνονται τόσο για επαγγελματικούς λόγους όσο και για χόμπι. Το υλικό και το λογισμικό που επιτυγχάνει αυτή τη λειτουργία έχουν εξελιχθεί, ενσωματώνονται σε όλα τα συστήματα υπολογιστών και έχουν καταστεί προσιτά σε ειδικούς αλλά και στο ευρύ κοινό μέσω φιλικών προς τον χρήστη διεπαφών.

Προσθέτοντας μια ακόμη άλλη διάσταση σε αυτήν τη διαδικασία και ανοίγοντας ένα νέο πεδίο, αλλά με ένα επιπλέον κόστος πολυπλοκότητας, η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν έχει ακόμη το πλεονέκτημα της απρόσκοπτης ενοποίησης με τα εξαρτήματά της. Η εποχή «plug-and-play» απέχει και απαιτεί ακόμη μερικά χρόνια προς το μέλλον. Οι HorneR. και HausmanK. (2017) συγκρίνουν το τρέχον επίπεδο πολυπλοκότητας σε τρισδιάστατους εκτυπωτές με τους πρώτους αυτοματοποιημένους αργαλειούς στα εργοστάσια της δεκαετίας του 1700. Μια σύγκριση μπορεί επίσης να γίνει με τις πρώτες μέρες χρήσης των αυτοκινήτων. Ένας ιδιοκτήτης ενός μηχανοκίνητου αυτοκινήτου στα τέλη του 19ου και στις αρχές του 20ού αιώνα δεν χρειάζεται μόνο να ξέρει πώς να οδηγεί το όχημα, αλλά και να μπορεί να διεκπεραιώσει κάποιες βασικές διαδικασίες όπως λίπανση, αλλαγές λαδιών, αντικατάσταση φθαρμένων ανταλλακτικών (μπουζί, φίλτρα, σωλήνες κ.λπ.). Ο ιδιοκτήτης έπρεπε να είναι σε θέση λοιπόν, να κάνει μικρές επισκευές καθώς τα συνεργεία εκείνης της

εποχής ήταν λίγα και μακριά σε απόσταση. Οι τρέχοντες χρήστες της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης πρέπει να γνωρίζουν αρκετά για το λογισμικό υπολογιστών, που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των ψηφιακών μοντέλων καθώς και τα χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τους. Προς το παρόν, η καμπύλη μάθησης για αυτήν την τεχνολογία είναι απότομη. Κρίνοντας από ό, τι έχει επιτευχθεί μέχρι τώρα και τις δυνατότητές που υπάρχουν, απαιτείται χρόνος για τη διάχυση αυτής της τεχνολογίας.

## 1.2 Τι είναι η τρισδιάστατη 3D εκτύπωση

Η γλώσσα της τρισδιάστατης εκτύπωσης απεικονίζεται στην Εικόνα 1.1: Τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. Οι άξονες, x, y και z, που απεικονίζονται, είναι ο χώρος στον οποίο πραγματοποιείται η εργασία. Το επίπεδο x-y είναι η βάση από την οποία πραγματοποιείται η εκκίνηση και ο άξονας z υποδηλώνει το ύψος. μειώνοντας τον άξονα z στο μηδέν και κρατώντας αυτό που μένει, έχουμε το «χαρτί» που δημιουργείται από έναν εκτυπωτή 2-D. Στον τρισδιάστατο κόσμο, θα μπορούσε κανείς να φανταστεί ένα λεπτό στρώμα υλικού να εναποτίθεται στο επίπεδο x-y. Αυτό το στρώμα έχει μικρό, αλλά πεπερασμένο, πάχος. Μόλις κατατεθεί αυτό το πρώτο στρώμα, προστίθεται μια μικρή ποσότητα υλικού στην κατεύθυνση z, δημιουργώντας ένα άλλο στρώμα πάνω στο πρώτο. Συνεχίζοντας αυτή τη διαδικασία μέσω ενός 3D εκτυπωτή, δημιουργείται μια τρισδιάστατη δομή.

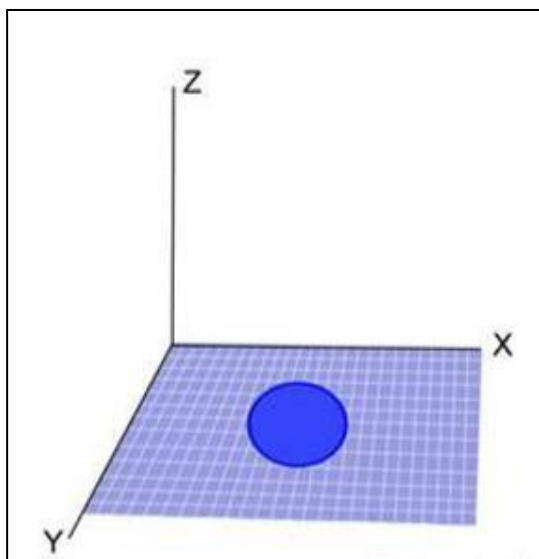


Εικόνα 1.1: Τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων  
HorneR.&HausmanK. (2017)

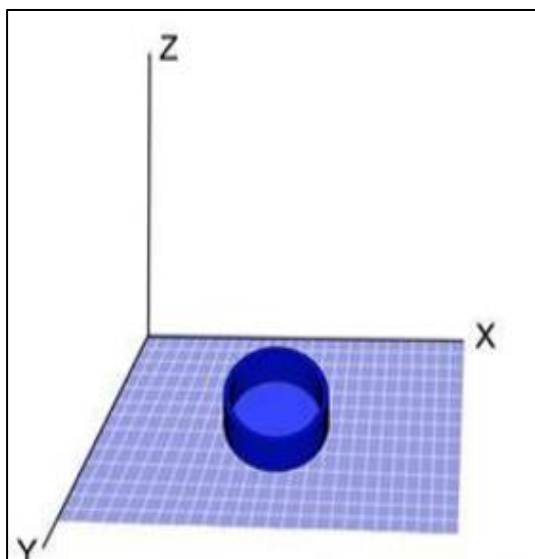
Οι Εικόνες Εικόνα 1.2: α στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση, Εικόνα 1.3: β στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση Εικόνα 1.4: γ στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση Εικόνα 1.5: δ στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση δείχνουν ορισμένα βήματα στη διαδικασία. Για το αντικείμενο που θέλει ο χρήστης να «χτίσει», δημιουργείται στρώμα προς το επίπεδο, για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η δομή ή το αντικείμενο που

δημιουργείται περιορίζεται μόνο από τη φαντασία και το ταλέντο του χρήστη στο χειρισμό του λογισμικού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Σε αυτό το σημείο, κάτι τέτοιο ακούγεται αρκετά απλό, αλλά αυτό συμβαίνει επειδή δεν περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο οι πολυπλοκότητες που χρειάζεται να αντιμετωπίσει κανείς στην όλη διαδικασία.

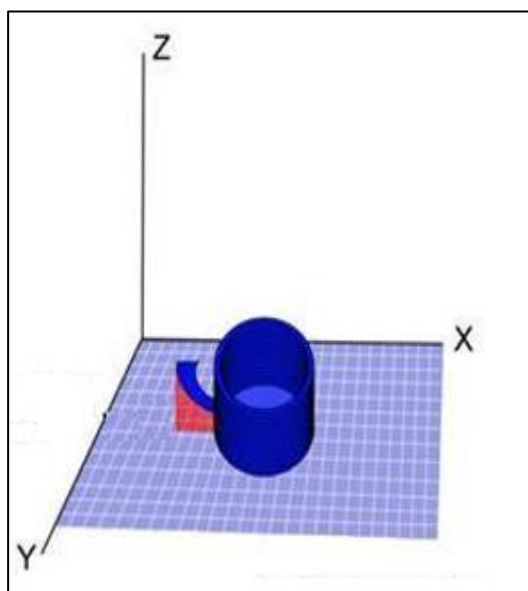
Σημαντικό ρόλο παίζουν τόσο το υλικό (εξαρτήματα, εκτυπωτής κ.λπ.), όσο και το λογισμικό καθώς και η επιλογή των υλικών(το υλικό που χρησιμοποιείται σαν πρώτη ύλη για την κατασκευή) τα οποία προαπαιτούνται πριν τον τελικό σχεδιασμό.



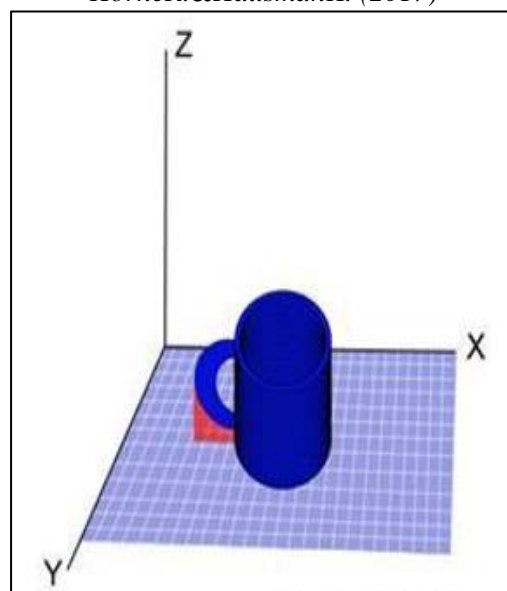
Εικόνα 1.2: α στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση  
HorneR.&HausmanK. (2017)



Εικόνα 1.3: β στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση  
HorneR.&HausmanK. (2017)



Εικόνα 1.4: γ στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση  
HorneR.&HausmanK. (2017)



Εικόνα 1.5: δ στάδιο 2D αναπαράστασης της διαδικασίας στρωματοποίησης σε τρισδιάστατη εκτύπωση  
HorneR.&HausmanK. (2017)

Η διαδικασία που μόλις περιεγράφηκε, αναφέρεται και ως «πρόσθετη κατασκευή». Οι συμβατικές τεχνικές κατασκευής ξεκινούν με ένα συμπαγές τρισδιάστατο σχήμα και στη

συνέχεια κόβουν το περιττό υλικό έως ότου εμφανιστεί το επιθυμητό αντικείμενο (αφαιρετική κατασκευή ή λειτουργία). Η γλυπτική ενός αντικειμένου είναι μια καλή απεικόνιση αυτής της προσέγγισης. Ο μεγάλος γλύπτης Μιχαήλ Άγγελος ξεκινούσε με μεγάλα τετράγωνα από τα οποία προέκυψαν τα γνωστά αριστουργήματα όπως η Πιέτα και το άγαλμα του Δαβίδ.

Ήδη με βάση το παραπάνω, γίνεται διακριτό ένα πλεονέκτημα της πρόσθετης τεχνικής σε σχέση με την αφαιρετική. Η διαδικασία προσθέτου χρησιμοποιεί μόνο την ποσότητα του υλικού που απαιτείται για την επίτευξη ενός επιθυμητού αποτελέσματος. Από την άλλη, οι αφαιρετικές μέθοδοι απορρίπτουν το υλικό κατά τη δημιουργία ενός αντικειμένου. Όσο μεγαλύτερο είναι το κόστος του υλικού, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλεονέκτημα στην ελαχιστοποίηση της χρήσης του.

Η πρώτη χρήση της παρασκευής προσθέτων ήταν στην ταχεία προτυποποίηση<sup>1</sup> (ReddyJ. N., 2005). Τα πρωτότυπα χρησιμεύουν ως προκαταρκτικά μοντέλα αντικειμένων (αυτοκίνητα, αεροπλάνα, μηχανήματα, μέρη τους) που επέτρεπαν την προβολή, τη δοκιμή, τη διόρθωση του σχεδιασμού και αργότερα χρησίμευσαν και ως μοντέλα για το τελικό προϊόν που θα δημιουργούνταν τελικά. Το πρωτότυπο έχει που αποτελεί μέρος του σχεδιασμού της μηχανικής για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Μόλις το λογισμικό με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) έγινε διαθέσιμο, οι σχεδιαστές το χρησιμοποίησαν για να δημιουργήσουν μοντέλα. Αυτή η ψηφιοποιημένη έκδοση ενός μοντέλου στάλθηκε στη συνέχεια σε ένα μηχάνημα που κατασκεύαζε πραγματικά το αντικείμενο.

Οι κατασκευαστικές διαδικασίες εξελίσσονται συνεχώς από τη σύλληψη μιας ιδέας, σε πραγματικές μεθόδους κατάλληλες για την κατασκευή σύνθετων προϊόντων. Στην παραδοσιακή κατασκευή, η κατασκευή αναφέρεται στη διαδικασία όπου οι πρώτες ύλες μετατρέπονται στο τελικό προϊόν. Ωστόσο, η μεταποίηση ορίζεται σήμερα ως μια ολοκληρωμένη ιδέα με φάσεις παραγωγής. Σε αυτό το πλαίσιο, εισάγονται διάφορες νέες έννοιες με λιγότερους περιορισμούς στο σχεδιασμό και την παραγωγή. Η πρόσθετη κατασκευή, η νανοτεχνολογία και η ρομποτική επόμενου επιπέδου είναι παραδείγματα διαδικασιών που φέρνουν επανάσταση στην τεχνολογία κατασκευής.

Η προσθετική παραγωγή, επίσης λοιπόν γνωστή και ως τρισδιάστατη (3D) τεχνολογία εκτύπωσης, εισήχθη ως μια μέθοδος ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικά υλικά. Όπως υποδηλώνει το όνομα, αναφέρεται στην προσθήκη πρώτων υλών κατά τη διάρκεια της κατασκευής, η οποία περιλαμβάνει διάφορες διαδικασίες συναρμολόγησης και ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων (Boparai K. et al., 2015).

Σύμφωνα με την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμαστικών Υλικών (ASTM) και τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) (2015), η κατασκευή πρότυπων ορίζεται ως η «διαδικασία συνένωσης υλικών για την κατασκευή αντικειμένων από δεδομένα μοντέλου 3D, συνήθως στρώμα σε στρώμα». Ωστόσο, επί του παρόντος, οι τεχνικές αυτής της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται σημαντικά σε διάφορες εφαρμογές οι οποίες αναφέρονται λεπτομερώς στο δεύτερο κεφάλαιο, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία (Juechter V. Et al., 2018), στην αεροδιαστημική (KongL. et al., 2019), στην ηλεκτρονική (MagisettyR. & CheekuramelliN., 2019), στην οδοντιατρική (GalanteR. et al., 2019) και στην ιατρική (FengX. et al., 2020).

<sup>1</sup> Η ταχεία προτυποποίηση είναι ένα σύνολο τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την γρήγορη κατασκευή ενός μοντέλου κλίμακας φυσικού μέρους ή συναρμολόγησης χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα δεδομένα σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Η κατασκευή του εξαρτήματος ή της συναρμολόγησης γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας τεχνολογία 3D εκτύπωσης ή "πρόσθετη κατασκευή στρώσεων".

Στηνπροσθετική παραγωγή, διάφορα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν λόγω του μεγάλου εύρους των μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων τους. Για παράδειγμα, ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), πολυγαλακτικό οξύ (PLA), νάιλον, πολυανθρακικό και πολυβινυλική αλκοόλη (PVA) έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές διεργασίες (WengZ. etal., 2019). Αυτή η πολυϋλική εκτύπωση μπορεί να θεωρηθεί ως βασικός πυλώνας για την ανάπτυξη μελλοντικών τεχνολογιών.

## 2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ 3D ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

### 2.1 Σχεδιασμός 3D μοντέλου

Οι τρισδιάστατοι σαρωτές υπάρχουν από τη δεκαετία του 1970. Έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως στην έρευνα, στη χαρτογράφηση εδάφους, στην τεκμηρίωση έργων κατασκευής και εξόρυξης. Έχουν γίνει αρκετές σαρώσεις ιστορικών κτιρίων και έργων τέχνης όπως του David Michelangelo και της Pieta (Levoy M. et al. 2000). Οι σαρώσεις γίνονται επίσης, τακτικά σε πλοία, καταναλωτικά προϊόντα, νομίσματα, ιατρικές συσκευές και οδοντιατρικές συσκευές, μεταξύ πολλών άλλων αντικειμένων.

Ένας τρισδιάστατος σαρωτής δημιουργεί μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου. Επομένως, εάν υπάρχει και είναι προσβάσιμο, μπορεί να σαρωθεί. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τη διαδικασία σάρωσης ονομάζονται «σημεία νέφους». Αυτό είναι ένα ενδιάμεσο βήμα για τη δημιουργία ενός πλέγματος, που ονομάζεται επίσης μοντέλο 3D, δηλαδή μια ψηφιακή αναπαράσταση του σαρωμένου αντικειμένου.

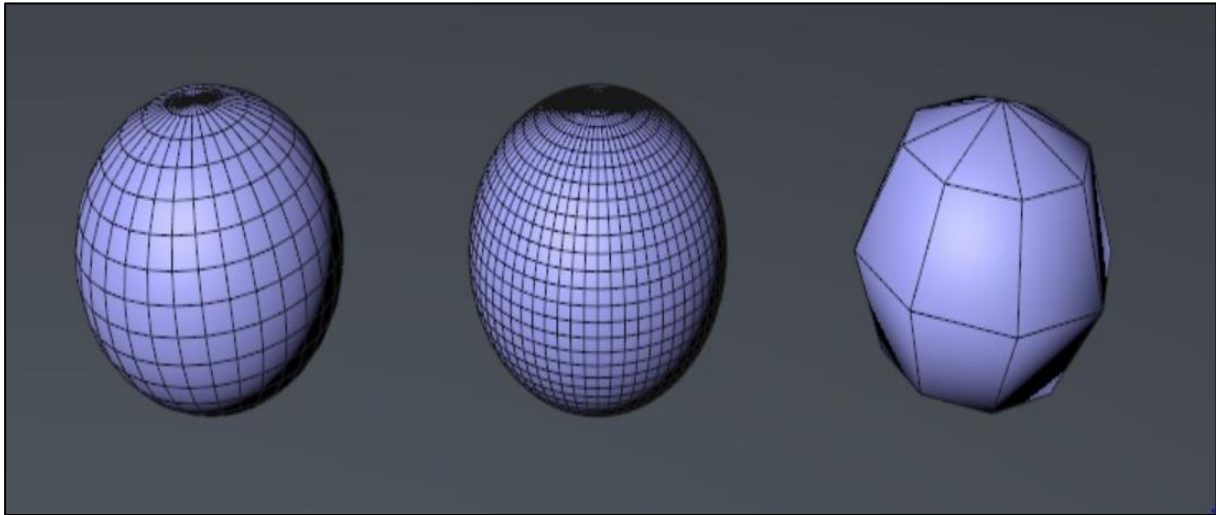
Το πλέγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Οπτικοποίηση
- Κινούμενα σχέδια
- Αρχαιακούς σκοπούς
- Δημιουργία μοντέλων για ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων ή φρεζαρίσματος
- Τρισδιάστατη εκτύπωση
- Ανάλυση δομών με ποικιλία εσωτερικών ή εξωτερικών δυνάμεων χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών
- Υπολογιστική δυναμική ρευστού

Μετά από κάποια επιπλέον επεξεργασία, αυτές είναι οι πληροφορίες αποστέλλονται σε έναν εκτυπωτή 3D που δημιουργεί ένα φυσικό αντικείμενο.

Το πλέγμα είναι μια συλλογή πολυγωνικών σχημάτων που προσεγγίζουν, σε έναν επιθυμητό βαθμό υπολογιστικής ακρίβειας, ένα πραγματικό αντικείμενο. Υπάρχουν επιλογές που πρέπει να γίνουν με ένα αποδεκτό πλέγμα, που είναι αρκετά καλό για όλους τους πρακτικούς σκοπούς και είναι ακόμη οικονομικά εφικτό. Ως απλό παράδειγμα, η εικόνα 1.2 δείχνει τα αντίστοιχα πλέγματα για μια σφαίρα.

Η επιφάνεια της σφαίρας προσεγγίζεται από ευθεία τμήματα. Καθώς ο αριθμός των πολυγώνων στο μοντέλο αυξάνεται, η αναπαράσταση μοιάζει όλο και περισσότερο με τη φυσική αντίστοιχη. Αυτό θέτει το ερώτημα, το πόσο ωραίο πρέπει να είναι το μοντέλο. Αυτό εξαρτάται τόσο από την ακρίβεια που απαιτείται για την αναπαράσταση του φυσικού μοντέλου 3D όσο και από το κόστος που απαιτείται για την εκτύπωση του μοντέλου 3D. Κάθε φορά που ο αριθμός των πολυγώνων σε ένα μοντέλο διπλασιάζεται, ο χρόνος που απαιτείται για την εκτύπωση αυξάνεται κατά 8. Έτσι, το τελικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση αντιπροσωπεύει έναν συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας και κόστους.



*Εικόνα 2.1: Μοντέλα σφαίρας με διαφορετικό αριθμό πολυγώνων*

(Πηγή: [http://www.rafaelservantez.com/writings\\_tutorials\\_3d\\_physics.html](http://www.rafaelservantez.com/writings_tutorials_3d_physics.html) 11/10/2020)

Για την εκτύπωση 3D, ο στόχος είναι ένα σταθερό μοντέλο. Το πρόβλημα της σχεδίασης του πλέγματος και οι συμβιβασμοί που απαιτούνται για την επίτευξη ενός αρκετά ακριβούς πλέγματος, για μια προσιτή υπολογιστική τιμή είναι ένα σημαντικό ζήτημα στις υπολογιστικές στερεές μηχανικές (Reddy, J. N., 2005) και τη δυναμική ρευστού (Anderson, J., Jr., 1995). Στην ουσία σε αυτές τις περιπτώσεις, ένα πλέγμα είναι ακριβώς το σημείο εκκίνησης για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών και των κατασκευών κάτω από διάφορα εξωτερικά ερεθίσματα.

Τόσο οι μέθοδοι επαφής όσο και οι μη επαφής χρησιμοποιούνται για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα αντικείμενα 3D. Ανάλογα με τη φύση του αντικειμένου, αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή συνδυαστικά.

Στις διαδικασίες που βασίζονται σε επαφή, ένας ανιχνευτής αγγίζει διάφορα σημεία της επιφάνειας ενός αντικειμένου για να παράγει ένα σημείο δεδομένων ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  τα οποία και αφορούν τις συντεταγμένες της τοποθεσίας). Οι ανιχνευτές μπορούν να είναι χειρός ή μέρος ενός μηχανήματος, που αναφέρεται ως μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM). Τέτοιες μηχανές μπορούν να είναι σταθερές ή να έχουν τη μορφή φορητών βραχιόνων. Η εικόνα 2.1 δείχνει ένα παράδειγμα μιας σταθερής μηχανής.





Εικόνα 2.2: Συσκευή μέτρησης συντεταγμένων MitutoyoCrysta-ApexS  
(Πηγή: [www.hroberts-di.com/all-metrology-c49/cmm-coordinate-measuring](http://www.hroberts-di.com/all-metrology-c49/cmm-coordinate-measuring))

Μερικές φορές η φυσική επαφή με ένα αντικείμενο είναι αδύνατη, ανέφικτη ή ανεπιθύμητη. Τότε καθίσταται απαραίτητο να καταφεύγουμε σε μεθόδους μη επαφής. Αυτές περιλαμβάνουν τη χρήση λέιζερ, υπερήχων ή CT μηχανών. Στη σάρωση με λέιζερ, ένα λέιζερ (κόκκινο, λευκό ή μπλε ανάλογα με την εφαρμογή) περνά πάνω από την επιφάνεια ενός αντικειμένου για την καταγραφή των τρισδιάστατων πληροφοριών. Καθώς «χτυπά» την επιφάνεια του αντικειμένου, το λέιζερ φωτίζει το σημείο επαφής. Επιπλέον, μια κάμερα η οποία είναι τοποθετημένη στο σαρωτή λέιζερ, καταγράφει την τρισδιάστατη κατανομή των σημείων στο διάστημα. Όσο περισσότερα σημεία καταγράφονται, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για την ολοκλήρωση της σάρωσης και τόσο μεγαλύτερη είναι η πολυπλοκότητα του μοντέλου 3D, που δημιουργείται από τα δεδομένα. Με αυτήν τη μέθοδο, είναι δυνατόν να έχουμε πολύ ακριβή δεδομένα χωρίς να αγγίζεται όμως ποτέ το αντικείμενο. Ένα παράδειγμα σαρωτών λέιζερ φαίνεται στην εικόνα 2.3.



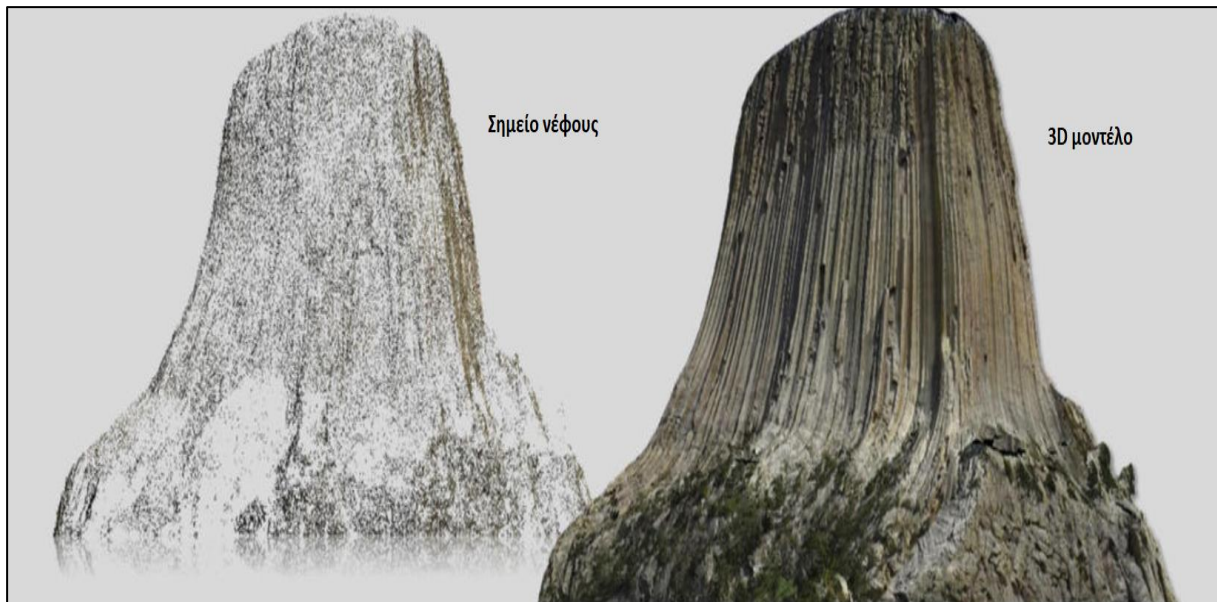
*Εικόνα 2.3 Σαρωτής λέιζερ "Faro"*

(Πηγή: <https://www.faro.com/products/construction-bim/faro-focus/> 11/10/2020)

Γενικά, η ψηφιοποίηση μέσω επαφής είναι πιο ακριβής στον καθορισμό των γεωμετρικών μορφών από τα οργανικά σχήματα ελεύθερης μορφής. Τα γεωμετρικά σχήματα έχουν σαφώς καθορισμένες άκρες που συνήθως επιτυγχάνονται με συγκεκριμένα εργαλεία. Τα κρύσταλλα εμπίπτουν, επίσης σε αυτήν την κατηγορία παρόλο που δημιουργούνται από τη φύση. Παραδείγματα τέτοια περιλαμβάνουν σφαίρες, τετράγωνα, τρίγωνα, ορθογώνια, τετράεδρα, κλπ. Τα οργανικά σχήματα είναι συνήθως ακανόνιστα και ασύμμετρα. Έχουν μια φυσική εμφάνιση και μια καμπύλη, ρέουσα εμφάνιση. Τα οργανικά σχήματα σχετίζονται με πράγματα από τη φύση, όπως φυτά, ζώα, φρούτα, ποτάμια, φύλλα, βουνά κ.λπ.

Οι σαρώσεις με λέιζερ παράγουν καλές αναπαραστάσεις του εξωτερικού ενός αντικειμένου, αλλά δεν μπορούν να εγγράψουν εσωτερικές ή καλυμμένες επιφάνειες. Ως απλοϊκό παράδειγμα, μπορεί κανείς να σκεφτεί μια κοίλη σφαίρα. Ο σαρωτής λέιζερ θα περιγράψει με ακρίβεια το γενικό της σχήμα, αλλά αν υπάρχει κάτι μέσα στη σφαίρα, αυτό θα πρέπει να ανιχνευθεί με υπερήχους ή αξονική τομογραφία.

Η επιλογή της τεχνολογίας της σάρωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου που τίθεται προς σάρωση, όπως το σχήμα, το μέγεθος και η ευθραυστότητά του. Κατά γενικό κανόνα, η σάρωση με λέιζερ είναι καλύτερη για τα οργανικά σχήματα. Χρησιμοποιείται επίσης για τις εργασίες μεγάλου όγκου όπως αυτές σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια, έδαφος κ.λπ. Γενικότερα είναι η μέθοδος που επιλέγεται εάν το αντικείμενο δε μπορεί να αγγιχτεί. Η ψηφιοποίηση χρησιμοποιείται σε έργα μηχανικής όπου απαιτούνται ακριβείς μετρήσεις αντικειμένων με γεωμετρικό σχήμα. Επιπλέον, μπορούν να συνδυαστούν και οι δύο μέθοδοι όπου κρίνεται απαραίτητο. Το τελικό αποτέλεσμα μιας σάρωσης, ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, ονομάζεται σημείο νέφους όπως αναφέρθηκε και αποτυπώνεται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα2.6: Αναπαράσταση βουνού σε σημείο νέφους και σε 3D μοντέλο  
(Πηγή: [www.usgs.gov/media/images/graphic-point-cloud-and-3d-model-devils-tower](http://www.usgs.gov/media/images/graphic-point-cloud-and-3d-model-devils-tower) 11/10/2020)

### 2.1.1 Από το σημείο νέφους σε 3D μοντέλο

Το θετικό για τα σημεία νέφους είναι ότι μπορούν να μετρηθούν και να διαστασιοποιηθούν. Αυτό, τα καθιστά πολύτιμα για τους αρχιτέκτονες και τους μηχανικούς. Για τους πρώτους, είναι σημαντική η δυνατότητα προβολής και μέτρησης του έργου τους απευθείας από τον υπολογιστή. Αυτό συμβαίνει γιατί, τους μειώνει τον αριθμό των επισκέψεων προς την τοποθεσία όπου βρίσκεται η αντίστοιχη εργασία και συνεπώς, μειώνεται και το κόστος. Για τους μηχανικούς, τα σημεία νέφους μπορούν να μετατραπούν σε επιφανειακά μοντέλα για οπτικοποίηση ή κίνηση και σε 3D στερεά μοντέλα για χρήση σε τρισδιάστατες εκτυπώσεις, κατασκευές και μηχανικές αναλύσεις. Αυτές οι αναλύσεις μπορούν να συμπεριλαμβάνουν αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και υπολογιστική δυναμική των ρευστών. Σε κάθε 3D σχέδιο μπορούν να υπάρχουν χιλιάδες έως και εκατομμύρια σημεία δεδομένων.

Υπάρχουν δύο ζητήματα πριν από τη δημιουργία ενός μοντέλου 3D:

- Πρώτον, τα δεδομένα των σημείων νέφους πρέπει να καθαριστούν. Δημιουργούνται διάφορα σημεία νέφους σε μια σάρωση για να αντιπροσωπεύσουν πλήρως ένα αντικείμενο 3D. Για σκοπούς ανάλυσης, αυτά τα σύννεφα πρέπει να συγχωνευτούν σε ένα τελικό σύννεφο. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως εγγραφή. Στη συνέχεια, πρέπει να εκτελεστεί μια λειτουργία καθαρισμού στο ενοποιημένο σύννεφο. Οι ανακρίβειες πρέπει να αφαιρεθούν μαζί με τα επικαλυπτόμενα δεδομένα όπως επίσης και τα άσχετα σημεία, ο θόρυβος, οι ακραίες τιμές, τα σφάλματα δειγματοληψίας, τα ελλείποντα δεδομένα, η εσφαλμένη ευθυγράμμιση, η διαφορετική πυκνότητα δειγματοληψίας, τα σφάλματα εγγραφής και άλλα προβλήματα. Μερικά από αυτά θα γίνουν από το ίδιο το λογισμικό, ενώ μερικά απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση και χειροκίνητη διόρθωση. Ωστόσο, έχοντας υπόψη ότι η σάρωση με λέιζερ μπορεί να οδηγήσει σε σύννεφα σημείων με 100.000 έως και πάνω από 1 εκατομμύριο σημεία, είναι δεδομένο ότι θα χρειαστεί βοήθεια από κάποιο λογισμικό.

- Δεύτερον, το λογισμικό CAD, το οποίο παράγει το τρισδιάστατο μοντέλο, είναι κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές και «δεν ξέρει τι να κάνει» με τα σημειακά σύννεφα. Δεδομένου ότι το λογισμικό CAD αναμένει να λάβει δεδομένα με τη μορφή επιφανειακών αναπαραστάσεων γεωμετρικών μορφών και μαθηματικών καμπυλών, τα δεδομένα πρέπει να μεταφραστούν σε μια μορφή που μπορεί να ερμηνεύσει.

Τα πακέτα λογισμικού που δημιουργούν μοντέλα 3D από δεδομένα νέφους αποτελούνται τόσο από ιδιόκτητα πακέτα όσο και από εμπορικά διαθέσιμα. Μεταξύ των δημοφιλών εμπορικών πακέτων είναι τα εξής:

- Geomagic
- Polyworks
- Rhino3D
- Meshlab
- Kscan3D

Αυτά τα πακέτα λογισμικού εισάγουν τα σημειακά δεδομένα του νέφους, τα καθαρίζουν, τα οργανώνουν και παράγουν μοντέλα 3D σε μεγάλη ποικιλία μορφών αρχείων, συμπεριλαμβανομένης της μορφής αρχείου STL που είναι δημοφιλής στην κοινότητα εκτύπωσης 3D. Το τελικό πλέγμα μπορεί να επιτευχθεί μέσω μοντέλων πολυγωνικού πλέγματος ή NURBS<sup>2</sup> (Non-Uniform B-Spline) μοντέλων.

Η πολυγωνική μοντελοποίηση λειτουργεί κυρίως με πρόσωπα, άκρα και κορυφές ενός αντικειμένου. Για να γίνουν οι επιθυμητές αλλαγές σε ένα μοντέλο, οι κορυφές μπορούν να επανατοποθετηθούν, εισάγοντας νέες άκρες, για να δημιουργηθούν πρόσθετες σειρές κορυφών και δομές διακλάδωσης. Με τα μοντέλα πολυγώνων η διαδικασία είναι ευκολότερη. Ωστόσο, καθώς τα πολύγωνα είναι πολύπλευρα, μπορεί να χρειαστούν αρκετά από αυτά για να δημιουργηθεί μια ομαλή επιφάνεια. Όσο περισσότερα πολύγωνα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι απαιτήσεις αποθήκευσης. Ακόμα και χωρίς αυτό το σκεπτικό, η μοντελοποίηση πολυγώνων δημιουργεί πολύ μεγαλύτερα αρχεία από τη μοντελοποίηση NURBS, επειδή το λογισμικό παρακολουθεί σημεία και σχήματα σε 3D χώρο και όχι μέσω μαθηματικών τύπων και συναρτήσεων.

Με τη μοντελοποίηση NURBS, επιτυγχάνονται ομαλότερα αποτελέσματα. Ένα αντικείμενο NURBS έχει μόνο τέσσερις πλευρές. Αυτά τα αντικείμενα χρησιμοποιούνται κυρίως για τη δημιουργία επιφανειών. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί λιγότερη αποθήκευση από τα πολυγωνικά μοντέλα. Οι επιφάνειες NURBS μπορούν να παραμορφωθούν, να έχουν σχήματα κομμένα από αυτές, ή να «ράβονται» και να «αναμιγνύονται» μαζί για να σχηματίσουν

---

<sup>2</sup> Το «Non-Uniform B-Spline» (NURBS) είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται συνήθως στα γραφικά υπολογιστών για τη δημιουργία και αναπαράσταση καμπυλών και επιφανειών. Προσφέρει μεγάλη ευελιξία και ακρίβεια για το χειρισμό τόσο των αναλυτικών (επιφάνειες που ορίζονται από κοινούς μαθηματικούς τύπους) όσο και των μοντέλων. Τα NURBS χρησιμοποιούνται συνήθως στον σχεδιασμό με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), στην κατασκευή (CAM) και στη μηχανική (CAE) και αποτελούν μέρος πολλών βιομηχανικών προτύπων, όπως των IGES, STEP, ACIS και PHIGS. Τα εργαλεία NURBS βρίσκονται επίσης σε διάφορα πακέτα λογισμικού μοντελοποίησης 3D και κινούμενων σχεδίων.

σύνθετα σχήματα. Τα NURBS είναι συνεχή και πάντα ομαλά, καθώς είναι μαθηματικά μια συνεχούς καμπύλης, που προσφέρει έναν εύκολο τρόπο διατήρησης της ομαλότητας μέσα σε ένα μοντέλο.

Γενικότερα οι απαιτήσεις μιας εργασίας, ειδικά ο διαθέσιμος χρόνος για αυτήν και η ικανότητα του πακέτου λογισμικού που χρησιμοποιείται, καθοδηγούν την επιλογή των εμπλεκόμενων για τη μέθοδο και την επίτευξη του τελικού πλέγματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται και τα δύο. Η εξομάλυνση NURBS μπορεί να εφαρμοστεί σε μοντέλα πολυγώνων χαμηλής ανάλυσης, για να παρέχει ωραίο φινίρισμα, έλεγχο των πολυγώνων και παράλληλα να είναι μικρά τα μεγέθη των αρχείων.

## 2.2 Τρισδιάστατη σχεδίαση με χρήση Η/Υ

Στο Κεφάλαιο 1 αναφέρθηκε η τρισδιάστατη εκτύπωση ως σύστημα (ή διαδικασία). Το βασικό στοιχείο αυτής της διαδικασίας είναι το λογισμικό. Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως και σε άλλους τομείς της μηχανικής, η ανάπτυξη υλικού τείνει να προηγείται της δημιουργίας λογισμικού. Σχεδόν εβδομαδιαία υπάρχει μια ανακοίνωση για έναν νέο εκτυπωτή 3D είτε ο αυτός να αναπτύσσεται, είτε να διατίθεται στην αγορά. Αντίθετα, το λογισμικό Computer-Aided-Design (CAD) που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των τρισδιάστατων μοντέλων για τους υπολογιστές χρονολογείται από τη δεκαετία του 1970. Τα πακέτα λογισμικού που αναπτύχθηκαν αργότερα έτειναν να είναι εξελικτικά και όχι επαναστατικά. Αυτό σημαίνει ότι, η φιλοσοφία που καθοδήγησε τις εξελίξεις του λογισμικού πριν από περίπου 40 χρόνια εξακολουθεί να ενσωματώνεται σε νεότερο λογισμικό, αλλά με πολύ βελτιωμένες διεπαφές για το χρήστη.

Υπάρχουν πολλές κριτικές και λίστες λογισμικών για την ανάπτυξη των τρισδιάστατων μοντέλων. Η επικρατέστερη κατηγοριοποίηση είναι η εξής:

- Λογισμικό CAD
- Εργαλεία μοντελοποίησης ελεύθερης μορφής
- Εργαλεία γλυπτικής
- Λογισμικό προετοιμασίας εκτύπωσης και τεμαχισμού

Όλα παράγουν ένα μοντέλο 3D κατάλληλο για εκτύπωση. Κάθε κατηγορία, ωστόσο, απευθύνεται σε διαφορετικό κοινό. Τα προγράμματα CAD συνήθως αφορούν «σκληρές» γεωμετρίες και είναι κατάλληλα για εφαρμογές μηχανικής. Τα εργαλεία ελεύθερης μορφής και γλυπτικής απευθύνονται περισσότερο σε καλλιτέχνες και δημιουργικούς μοντελιστές που ενδιαφέρονται για κινούμενα σχέδια, οπτικά εφέ, προσομοίωση, απόδοση και μοντελοποίηση.

Επειδή οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι πολύ επιλεκτικοί σχετικά με την είσοδο που θα αποδεχθούν, απαιτείται μια άλλη κατηγορία λογισμικού που ελέγχει το μοντέλο και δημιουργεί τον «κώδικα g» που χρησιμοποιείται από τους εκτυπωτές (λογισμικό προ-επεξεργασίας και τεμαχισμού).

### 2.2.1 Λογισμικό CAD

Φαίνεται να υπάρχει μια γενική συμφωνία ότι, για αρχάριους, τα πιο εύχρηστα προγράμματα είναι τα εξής:

- 123D Design
- 3DTin
- SketchUp
- TinkerCAD

Τα παραπάνω βρίσκουν υποστηρικτές την ClineL. (2014), τον Ritland M. (2014) και τον Kelly J. (2014). Επιπλέον μοιράζονται πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βασικό λογισμικό είναι δωρεάν, με δυνατότητα αγοράς μιας προηγμένης έκδοσης, καθώς οι δυνατότητές και οι ανάγκες σχεδίασης αυξάνονται. Όλα βασίζονται σε πρόγραμμα περιήγησης (συνήθως η τρέχουσα έκδοση του Google Chrome και του Firefox).

Τα περισσότερα αν όχι όλα τα λογισμικά τέτοιου τύπου, έχουν ενσωματωμένες βιβλιοθήκες πρωτόγονων σχημάτων (κόνους, σφαίρες, τετράγωνα, κυλίνδρους, δακτυλίους κ.λ.π.) που μπορούν να εισαχθούν στο χώρο εργασίας και με προσθήκη ή αφαίρεση, να συνδυαστούν για να σχηματίσουν σχεδόν αυθαίρετα σχήματα. Το SketchUp διαθέτει εκτεταμένες δυνατότητες και τεκμηρίωση για εφαρμογές στην αρχιτεκτονική και τον εσωτερικό σχεδιασμό εκτός από την επιστήμη των πολιτικών μηχανικών και τη μηχανολογία. Οι περισσότερες από τις δωρεάν εκδόσεις και όλες οι προηγμένες εκδόσεις επιτρέπουν την εξαγωγή αρχείων STL σε εκτυπωτές 3D.

Όλα τα παραπάνω αφορούν τα βασικά του λογισμικού CAD. Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες επιλογές μόλις αποφασιστεί, ότι απαιτείται επιπλέον υπολογιστική ισχύ. Ορισμένοι προγραμματιστές εκτυπωτών 3D διαθέτουν ιδιόκτητο λογισμικό μοντελοποίησης 3D που είναι προσαρμοσμένο στο υλικό τους.

Μια λίστα λογισμικού για ενδιάμεσους, προχωρημένους και επαγγελματίες χρήστες περιλαμβάνει τα εξής:

- Solidworks
- Inventor
- Rhino3D
- SketchUp Pro
- CorelCAD
- OpenSCAD
- Free 3D CAD

- PTC Creo Elements/ Direct Modeling Express

Το SolidWorks και το Inventor είναι ολοκληρωμένα προγράμματα για σχεδιασμό και ανάλυση μηχανικών. Το SolidWorks διατίθεται σε τρεις εκδόσεις οι οποίες είναι η Standard, η Professional και η Premium. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα βιβλίων, σεμιναρίων, οδηγιών, αρχείων έργων και βίντεο που βοηθούν σε διάφορες πτυχές της χρήσης του, από τη ρύθμιση έως τις εφαρμογές σχεδιασμού μηχανικών. Το Inventor διατίθεται σε δύο εκδόσεις Inventor και InventorProfessional. Διατίθεται εκτεταμένη υποστήριξη, που κυμαίνεται από τη βοήθεια σχετικά με την εγκατάσταση, διαδικτυακά σεμινάρια και ένα φόρουμ κοινότητας έως επαφή και βοήθεια από το προσωπικό υποστήριξης.

Το Rhino3D πιθανότατα ανήκει στην επόμενη ενότητα που ασχολείται με λογισμικό που απευθύνεται σε καλλιτέχνες, αλλά χρησιμοποιείται συχνά για την ανάπτυξη μοντέλων για εκτύπωση 3D. Το Rhino είναι ένα πρόγραμμα NURBS για τη δημιουργία, επεξεργασία, ανάλυση και μετάφραση επιφανειών NURBS. Όπως και άλλα προγράμματα αυτής της κατηγορίας, υποστηρίζει μια ποικιλία μορφών αρχείων.

Το CorelCAD διαθέτει εργαλεία σχεδίασης 2D και 3D. Το OpenSCAD είναι ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα μοντελοποίησης που λειτουργεί με λειτουργικά συστήματα Linux / Unix, Windows και Mac OS X. Το Free 3D CAD είναι ένα ανοιχτού κώδικα, αρθρωτό πρόγραμμα που έχει σχεδιαστεί ως παραμετρικός μοντελοποιητής. Στην ουσία, επιτρέπει την τροποποίηση ενός σχεδιασμού, επιστρέφοντας στο ιστορικό του μοντέλου και αλλάζει τις παραμέτρους του. Το πρόγραμμα προορίζεται κυρίως για μηχανικό σχεδιασμό.

Το PTCCREOElements / DirectModelingExpress είναι η δωρεάν έκδοση του PTCCreoElements / DirectModeling. Το πρόγραμμα απευθύνεται σε μηχανικούς που αναζητούν ένα ελαφρύ, ευέλικτο σύστημα 3D CAD που πρέπει να σχεδιάσει και να εκτυπώσει γρήγορα αντικείμενα μοναδικής φύσης και παραλλαγές αυτού. Επιπλέον διατίθεται ποικιλία υπηρεσιών υποστήριξης.

### 2.2.2 Λογισμικό μοντελοποίησης ελεύθερης μορφής

Το λογισμικό CAD δεν είναι ο μόνος δρόμος για τη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου 3D. Εδώ και αρκετό καιρό, το λογισμικό γραφικών υπολογιστών 3D είναι διαθέσιμο προσφέροντας δυνατότητες που επιτρέπουν 3D animation υπολογιστών, μοντελοποίηση, προσομοίωση και απόδοση για παιχνίδια, καλλιτέχνες ταινιών και γραφικών. Οι βασικές αρχές διδάσκονται στα πανεπιστήμια και το θέμα πολλών κειμένων, μεταξύ των οποίων και το βιβλίο του Vaughan W. (2012). Δεδομένου ότι τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται από γραφίστες περιλαμβάνουν πολύγωνα, NURBS και υποδιαίρεσεις τους, δημιουργείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο κατάλληλο για εκτύπωση. Όπως δεν έχει αναφερθεί προηγουμένως, μια επιφάνεια υποδιαίρεσης είναι μια μέθοδος αναπαράστασης μιας λείας επιφάνειας χρησιμοποιώντας ένα κομμάτι γραμμικού πολυγωνικού πλέγματος (Ulrich R. & Peters J., 2008).

Ένα πλέγμα είναι τμηματικά γραμμικό εάν κάθε άκρο είναι ευθεία και κάθε επιφάνεια είναι επίπεδο. Τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα είναι τα τρίγωνα σε δύο διαστάσεις και τα τετράεδρα σε τρεις διαστάσεις, αν και είναι δυνατές και άλλες επιλογές. Λαμβάνοντας υπόψη ένα πλέγμα, τελειοποιείται με την υποδιαίρεσή του, δημιουργώντας νέα πλέγματα και κορυφές. Το αποτέλεσμα είναι ένα λεπτότερο πλέγμα από το αρχικό, που περιέχει

περισσότερες πολυγωνικές όψεις. Αυτό μπορεί να γίνει ξανά και ξανά έως ότου επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός επιφανειακής βελτίωσης.

Τα βασικά λογισμικά αυτής της κατηγορίας είναι τα εξής:

- Autodesk
- 3ds MAX
- Cinema4D
- Blender

Τόσο το AutodeskMaya όσο και το 3dsMax είναι τα πρότυπα για τις βιομηχανίες τυχερών παιχνιδιών και ταινιών. Συνήθιζαν να ανταγωνίζονται ως δύο διαφορετικά κομμάτια λογισμικού, αλλά τώρα ανήκουν στην ίδια εταιρεία. Η μόνη διαφορά μεταξύ αυτών των δύο είναι η διάταξη και η συμπερίληψη ορισμένων εργαλείων. Το 3dsMax λειτουργεί καλά με εργαλεία λήψης κίνησης, ενώ το Maya επιτρέπει την εισαγωγή διάφορων πρόσθετων για τη δημιουργία ρεαλιστικών εφέ. Για τους σκοπούς της τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι λειτουργίες τους είναι πανομοιότυπες (Simonds B., 2013).

Το Cinema4D είναι ένα άλλο εργαλείο μοντελοποίησης, απόδοσης και κινούμενης εικόνας 3D. Διαθέτει μεγάλο αριθμό εργαλείων γλυπτικής που επιτρέπουν τη διαμόρφωση του μοντέλου σαν να ήταν πηλός για τη δημιουργία σχημάτων και περιγραμμάτων. Σε αντίθεση με όλα τα άλλα εργαλεία που αναφέρονται σε αυτήν την ενότητα, το Cinema 4D διαθέτει ένα εργαλείο που ονομάζεται «PolyPenTool» το οποίο επιτρέπει το σχεδιασμό πολύγωνων στην οθόνη, αντί του ξεκινήματος με ένα βασικό σχήμα και την εργασία πάνω σε αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, επιτρέπεται η δημιουργία πολύπλοκων σχημάτων πολύ γρήγορα και εύκολα.

Το Blender είναι η δωρεάν εναλλακτική λύση για το Maya / 3dsMax. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα που στοχεύει να είναι εξίσου καλό με αυτά της Autodesk. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα, συνοδεύεται από τη δική του μηχανή και πρόγραμμα επεξεργασίας βίντεο, το οποίο είναι χρήσιμο για όσους θέλουν να δημιουργήσουν ένα παιχνίδι με προϋπολογισμό. Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση, είναι μια καλή επιλογή αφού είναι ένα προηγμένο λογισμικό.

### 2.2.3 Λογισμικό γλυπτικής

Αυτή η τεχνολογία μοιάζει αρκετά με τον πηλό μοντελοποίησης. Ξεκινώντας για παράδειγμα με μια μπάλα και στη συνέχεια πιέζοντας και τραβώντας αρχίζει να δημιουργείται μια μορφή κάποιου είδους. Λοιπόν, ακριβώς το ίδιο μπορεί να πραγματοποιηθεί σε έναν υπολογιστή με τη βοήθεια λογισμικού γλυπτικής. Δημιουργείται ένα μοντέλο, εξάγεται ως αρχείο STL και αποστέλλεται σε έναν εκτυπωτή 3D (Blain J., 2014). Μερικά παραδείγματα από τέτοιου είδους λογισμικά είναι τα εξής:

- 123D Sculpt
- Cubify Sculpt
- Leopoldy



- Sculptris
- SculptGL
- Zbrush
- Mudbox
- Geomagic Sculpt

Η ψηφιακή γλυπτική είναι σχετικά νέα αλλά κερδίζει δημοτικότητα. Πολλά από τα διαθέσιμα προγράμματα χρησιμοποιούν πολύγωνα για να αντιπροσωπεύουν ένα αντικείμενο. Άλλα χρησιμοποιούν τη γεωμετρία που βασίζεται σε voxel<sup>3</sup> στην οποία ο όγκος του αντικειμένου είναι το βασικό στοιχείο. Κάθε ένα έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για συγκεκριμένες εφαρμογές (De La Flor M. & Bridgette M., 2010).

#### 2.2.4 Επιπρόσθετα των λογισμικών

Υποθέτοντας ότι έχει χρησιμοποιηθεί μία από τις μεθόδους που περιγράφονται παραπάνω και έχει σχεδιάσει ένα αντικείμενο για τρισδιάστατη εκτύπωση, υπάρχουν μερικά πράγματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Το μοντέλο υπάρχει σε ένα μαθηματικό κόσμο χωρίς δυνάμεις, όπως η βαρύτητα. Πρόκειται να μεταφερθεί στον πραγματικό κόσμο και να εκτυπωθεί με υλικά που έχουν πυκνότητα και πεπερασμένη ισχύ. Επομένως, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της κατανομής του βάρους. Διαφορετικά, το αντικείμενό μπορεί να ταλαντεύεται ή να μην μπορεί να σταθεί σε όρθια θέση.

Κάθε βάση στους εκτυπωτές έχει πεπερασμένο μέγεθος. Εάν το αντικείμενο είναι μεγαλύτερο, θα υπάρχει πρόβλημα εκτύπωσης, ειδικά εάν δεν έχουν ληφθεί υπόψη κρίσιμες διαστάσεις όπως το πάχος του. Επιπλέον, η εργασία με πλαστικά υλικά απαιτεί περισσότερο έλεγχο καθώς είναι αδύναμα υλικά, ειδικά όταν θερμαίνονται.

Άλλες υπηρεσίες (όπως έλεγχος στεγανότητας νερού και άλλων γεωμετρικών παραγόντων) παρέχονται από το λογισμικό προετοιμασίας εκτύπωσης ή από τις διεπαφές του εκτυπωτή. Ο τύπος λογισμικού είναι μια συλλογή βοηθητικών προγραμμάτων που ελέγχουν το τρισδιάστατο μοντέλο και φορτώνουν αρχεία STL. Τα προγράμματα αυτής της κατηγορίας (France A., 2014) έχουν ενσωματωμένη δυνατότητα τεμαχισμού για τη δημιουργία των επιπέδων στην κατεύθυνση z και την αποστολή του προκύπτοντος κώδικα G στον εκτυπωτή.

### 2.3 Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης

Η προσθετική παραγωγή είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980 και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη βιομηχανία και τα ακαδημαϊκά ιδρύματα τα

---

<sup>3</sup> Στα τρισδιάστατα γραφικά υπολογιστών, ένα voxel αντιπροσωπεύει μια τιμή σε ένα κανονικό πλέγμα σε τρισδιάστατο χώρο. Όπως και με τα pixel σε ένα 2D bitmap, τα ίδια τα voxels συνήθως δεν έχουν τη θέση τους (δηλαδή συντεταγμένες) κωδικοποιημένα ρητά με τις τιμές τους. Αντίθετα, τα συστήματα απόδοσης συνάγουν τη θέση ενός voxel με βάση τη θέση του, σε σχέση με άλλα voxels (δηλαδή, τη θέση του στη δομή δεδομένων που συνθέτει μια μόνο ογκομετρική εικόνα).

τελευταία χρόνια. Το 1984, κατασκευάστηκε ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής από τον Charles W. Hull (BogueR., 2013). Ωστόσο, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ήταν ακριβή και δεν ήταν εφικτή η εφαρμογή της αρχικά. Παρ'όλα αυτά, λόγω των εξελίξεων και της μείωσης του κόστους τον τρέχοντα αιώνα, η προσθετική παραγωγή έχει εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς και αναμένεται να γίνει η επικρατούσα, ειδικά στην οικιακή χρήση σε λίγα χρόνια. Οι τρισδιάστατοι και κλασσικοί εκτυπωτές ink-jet έχουν μερικές ομοιότητες. Ωστόσο, ένας εκτυπωτής 3D απαιτεί μερικά επιπλέον βήματα για τη χρήση των απαιτούμενων υλικών και τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου εξαρτήματος.

Βάσει του προτύπου ASTM, οι διεργασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε επτά κατηγορίες: 1) εκτόξευση συνδετικού υλικού (BJ), 2) εξώθηση υλικού (ME), 3) κατευθυνόμενη απόθεση ενέργειας (DED), 4) εκτόξευση υλικού (MJ), 5) ελασματοποίηση φύλλων (SL), 6) στρώμα σκόνης-καύση (PBF) και 7) πολυμερισμόςφωτοαερίων (VP) (Ngo T.etal., 2018).

Επί του παρόντος, εκτυπώνονται πολυμερή, κράματα αλουμινίου και χάλυβα, διάφορα σύνθετα υλικά και κεραμικά με ελάχιστο πάχος στρώσης 20-100 μm, ανάλογα με τη φυσική κατάσταση του υλικού και τη διαδικασία που ακολουθείται (HopkinsonN. etal., 2006) Αυτή η ικανότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, να λειτουργεί με ένα ευρύ φάσμα υλικών, μαζί με τους λίγους περιορισμούς στην κατασκευή σύνθετων γεωμετριών, έχει αποδειχθεί ότι είναι πλεονέκτημα σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές επιλογές όσον αφορά την ταχύτητα κατασκευής, το πάχος του στρώματος, την ανάλυση και την επιλογή υλικού σε κάθε μέθοδο.

### 2.3.1 SLA (Stereolithography) Στερεολιθογραφία

Πριν από τη δεκαετία του 1990, οι διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής προσθέτων πήραν διαφορετικά ονόματα. Μέχρι το 1984, ο Chuck Hall είχε αναπτύξει μια διαδικασία που ονομάζεται «Στερεολιθογραφία» εν συντομία «SLA» (Gibson, I., BártoloJ., Paulo, 2011). Η βασική διαδικασία λειτουργεί ως εξής:

- Ένα πρόγραμμα CAD χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός μοντέλου-αντικειμένου.
- Ένα κομμάτι λογισμικού (ψηφιακός τεμαχισμός) τεμαχίζει το μοντέλο CAD σε λεπτά στρώματα, συνήθως 5-10 στρώματα/χιλιοστόμετρο.
- Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής περιέχει ένα υγρό φωτοπολυμερές (ρητίνη). Ένα υπεριώδες λέιζερ «ζωγραφίζει» ή «εναποθέτει» μία διατομή κάθε φορά. Σε κάθε στρώση, η δέσμη λέιζερ εντοπίζει ένα μοτίβο.
- Η πλατφόρμα του εκτυπωτή «πέφτει» στη δεξιαμενή κατά ένα στρώμα σε πάχος (κλάσμα ενός χιλιοστού). Εισάγεται περισσότερη ρητίνη και σε αυτή τη νέα υγρή επιφάνεια, το λέιζερ επανατοποθετεί το μοτίβο που προσκολλάται ξανά, στο προηγούμενο στρώμα.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο.
- Στο τέλος, αφαιρείται η περίσσεια υλικού εκτύπωσης και τυχόν δομές στήριξης. Το τελικό αντικείμενο καθαρίζεται από την περίσσεια ρητίνης με

εμβάπτιση σε χημικό λουτρό και στη συνέχεια σκληραίνεται σε υπεριώδες φούρνο.

Μέσω της στερεολιθογραφίας μπορεί να εκτυπωθεί σχεδόν οτιδήποτε μπορεί και να σχεδιαστεί σε ένα πρόγραμμα CAD. Η διαδικασία αυτή, μπορεί να παράγει αντικείμενα με υψηλή λεπτομέρεια και καλό φινίρισμα επιφάνειας. Στην κάτω πλευρά, απαιτούνται δομές στήριξης για την αποτροπή ορισμένων γεωμετριών από την εκτροπή (ή την κατάρρευση) λόγω της βαρύτητας. Επιπλέον υποστηρίζεται και η συγκράτηση της 2D διατομής στη θέση της, για την αντίσταση της πλευρικής πίεσης από τη λεπίδα επικάλυψης. Τα στηρίγματα αφαιρούνται χειροκίνητα μετά την εκτύπωση. Επιπλέον, τα μηχανήματα πρέπει να εξαερίζονται επειδή οι αναθυμιάσεις από τα ακατέργαστα υλικά μπορεί να είναι τοξικές. Επίσης, δεδομένου ότι τόσο οι εκτυπωτές όσο και η πολυμερή ρητίνη είναι ακριβά, είναι ασυνήθιστο να βλέπουμε μηχανές στερεολιθογραφίας οπουδήποτε, αλλά σε μεγάλες εταιρείες. Ο Chuck Hall ανέπτυξε επίσης τον ψηφιακό τεμαχισμό και τη μορφή του αρχείου STL (BurnsM., 1993), τα οποία χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα.

### 2.3.2 FDM (FusedDepositionModeling) Κατασκευή μοντέλου με διαδοχική σύντηξη στρώσεων

Το 1990, η Stratasys, μια εταιρεία που ιδρύθηκε από τον Scott Crump, εμπορευματοποίησε μια διαδικασία εξώθησης πλαστικών που ονομάζεται «τεχνολογία αποθέματος με αφαίρεση». Το 1995, το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Massachusetts (MIT) ανέπτυξε μια διαδικασία η οποία πήρε το όνομα «3D Printing». Από αυτό το σημείο, όλες οι διάφορες τεχνολογίες προσθετικής παραγωγής διατηρούν τα αρχικά τους ονόματα, αλλά αναφέρονται επίσης συλλογικά ως εκτύπωση 3D. Η εκτύπωση 3D είναι περισσότερο από ένα σύστημα ή από μια συσκευή, ο εκτυπωτής είναι μόνο ένα στοιχείο.

- Πρώτον, ένα ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου που θα δημιουργηθεί, πρέπει να προέρχεται από τη βοήθεια λογισμικού CAD ή μέσω της διαδικασίας σάρωσης.
- Στη συνέχεια, το ψηφιοποιημένο μοντέλο μεταφράζεται (μέσω άλλου λογισμικού) σε μορφή αναγνώσιμη από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή (γνωστό ως μορφή STL). Πρόσθετο λογισμικό στη συνέχεια «κόβει» το μοντέλο σε διάφορα επίπεδα ανάλογα με την ακρίβεια που απαιτείται για το τελικό προϊόν. Το αποτέλεσμα του κόπτη προέρχεται από έναν κωδικό G<sup>4</sup> που στη συνέχεια αποστέλλεται στον εκτυπωτή.
- Ο 3D εκτυπωτής στη συνέχεια δημιουργεί ένα συμπαγές μοντέλο. Η διαδικασία διαρκεί λεπτά έως και ημέρες ανάλογα με την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, την απαιτούμενη ακρίβεια (ανάλυση), το μέγεθος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται κ.λπ.

<sup>4</sup> Ο κώδικας G είναι μια γλώσσα στην οποία οι άνθρωποι «λένε» στα μηχανογραφημένα εργαλεία πώς να φτιάξουν κάτι. Το "πώς", ορίζεται από οδηγίες «G-code» που παρέχονται σε έναν ελεγκτή μηχανής (βιομηχανικός υπολογιστής) που λέει στους κινητήρες πού πρέπει να κινηθούν, πόσο γρήγορα να κινηθούν και ποια διαδρομή θα ακολουθήσουν. Οι δύο πιο συνηθισμένες καταστάσεις είναι ότι, μέσα σε ένα μηχανήμα όπως τρένο ή μύλο, ένα εργαλείο κοπής κινείται σύμφωνα με αυτές τις οδηγίες μέσω ενός εργαλείου κοπής υλικού.

- Το μοντέλο 3D εξετάζεται στη συνέχεια από το σχεδιαστή. Συχνά, πρέπει να γίνουν αλλαγές για την άρση των ελαττωμάτων, τη βελτίωση της εμφάνισης, την αφαίρεση των δομών υποστήριξης, την ενίσχυση των καλλιτεχνικών πτυχών κ.λπ.
- Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ο προγραμματιστής να είναι ικανοποιημένος με το τελικό αποτέλεσμα.

Δε λειτουργούν όλοι οι εκτυπωτές 3D με τον ίδιο τρόπο, ακριβώς όπως και οι εκτυπωτές 2D οι οποίοι παράγονται σε εκδόσεις με μελάνι αλλά και λείζερ. Οι εκτυπωτές 3D λειτουργούν υπό μια ποικιλία διαδικασιών για την επίτευξη ενός κοινού τελικού αποτελέσματος.

Γενικότερα σαν φιλοσοφία στις περισσότερες μεθόδους είναι απαραίτητο να συνδεθεί το υλικό με το προηγούμενο για να παραχθεί ένα στερεό συστατικό. Στη διαδικασία FDM, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά θερμοπλαστικά υλικά όπως ABS, νάιλον, PLA και πολυανθρακικό. Σύμφωνα με τις εφαρμογές της διαδικασίας FDM, η ικανότητα εκτύπωσης υψηλής ταχύτητας έχει αποδειχθεί σε σύγκριση με άλλες τεχνικές AM (Khosravanian M. & Zolfagharian A., 2020). Οι εξελίξεις στην τεχνολογία και οι νέες εξελίξεις υλικών επιτρέπουν την προετοιμασία ανθρακονημάτων και μεταλλικών σωματιδίων σε νημάτια κατάλληλα για την προσθετική παραγωγή, τα οποία μπορούν να φέρουν επανάσταση στη συνολική διαδικασία.

### 2.3.3 SLS (Selective Laser Sintering) Επιλεκτική σύντηξη

Στη διαδικασία της επιλεκτικής σύντηξης (SLS), το υλικό από το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί το αντικείμενο εισάγεται στην περιοχή εργασίας του εκτυπωτή σε μορφή σκόνης και σκληραίνεται. Στη συνέχεια, προστίθεται σκόνη για το επόμενο στρώμα και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή. Στο τέλος, η περίσσεια σκόνης αφαιρείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επόμενη κατασκευή-εργασία. Υπάρχουν μικρές παραλλαγές σε αυτήν την ιδέα, που αναφέρονται ως DMLS και EBM. Αυτές οι διαδικασίες είναι βοηθητικές και καθίστανται πιο κατάλληλες ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται (AcquestaA. & MonettaT., 2020).

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, η SLS χρησιμοποιεί ένα ευρύ φάσμα σκόνης υλικού για να δημιουργήσει πρωτότυπα για νέα προϊόντα, καθώς και τελικά προϊόντα που διατίθενται για κάποιον πελάτη. Η μέθοδος επιτρέπει επίσης τη δημιουργία σύνθετων σχημάτων. Η σκόνη λειτουργεί ως στήριγμα κατά την εκτύπωση του αντικειμένου που επιτρέπει τη δημιουργία σχημάτων που δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθούν με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Η διαδικασία αυτή είναι γρήγορη και οικονομική.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι όροι «γρήγορη» και «οικονομική» στη βιομηχανία εκτύπωσης 3D είναι σχετικοί. Η ταχύτητα εξαρτάται όχι μόνο από το μηχάνημα, αλλά και από το μέγεθος του αντικειμένου που εκτυπώνεται, από την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του αντικειμένου και από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία. Όταν γίνεται σύγκριση κόστους, συνήθως γίνεται μεταξύ του κόστους των υλικών που εμπλέκονται στην τρισδιάστατη εκτύπωση έναντι της συμβατικής κατασκευής. Το κόστος του εκτυπωτή 3D ενδέχεται να μην υπολογίζεται στον υπολογισμό. Σίγουρα ο χρόνος του σχεδιαστή στην προετοιμασία του μοντέλου CAD δεν υπολογίζεται. Πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη και άλλα ζητήματα, όπως ο χρόνος που απαιτείται για την εκτύπωση ενός αντικειμένου (ώρες για κάτι μικρό, ημέρες έως εβδομάδες για μεγάλα και πολύπλοκα αντικείμενα).

Σε μεγάλες εργασίες, οι εταιρείες απλώς αφήνουν το μηχάνημα να λειτουργεί όλη τη νύχτα, ώστε να μην χρειάζονται ώρες εργασίας για την εκτύπωση του αντικειμένου. Γενικά, ο χρόνος που χρειάζεται ένας εκτυπωτής 3D για την εκτύπωση διαφόρων εξαρτημάτων φαίνεται να είναι πολύ μικρότερος από τον χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία εξαρτημάτων με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, τουλάχιστον στο στάδιο του πρωτοτύπου. Το «CaveatEmptor»<sup>5</sup> είναι μια καλή οδηγία κατά τη σύγκριση του κόστους.

Στην κάτω πλευρά, το τελικό αντικείμενο που δημιουργήθηκε μέσω SLS τείνει να είναι τραχύ και πορώδες. Αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με επίστρωση και στίλβωση μετά την παραγωγή. Σε σύγκριση με τη διαδικασία SLA, η λεπτομέρεια ενός αντικειμένου δεν θα είναι τόσο ευκρινής. Τέλος, από τη μία υπάρχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας χρήσης μιας ευρείας ποικιλίας υλικών, αλλά οι εκτυπωτές λέιζερ σε αυτό το στάδιο της ανάπτυξής τους, τείνουν να είναι μεγάλοι, δυσκίνητοι, ακριβοί και χρησιμοποιούνται κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό μπορεί να αλλάξει καθώς η Sintratec έχει εισάγει τον πρώτο εκτυπωτή λέιζερ στον κόσμο για τη σύντηξη. Ωστόσο, για να χρησιμοποιηθεί ο εκτυπωτής, θα πρέπει να βρίσκεται σε αεριζόμενο χώρο κοντά σε πηγή τρεχούμενου νερού, για τις ανάγκες λειτουργίας του (BartschatB. &BabelB., 2019).

### 2.3.4 Τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης με ink-jet (IJP)

Η «εκτόξευση υλικών» είναι μια σχετικά νέα και προηγμένη διαδικασία προσθετικής παραγωγής, που είναι παρόμοια με ένα δισδιάστατο εκτυπωτή μελάνης. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί μια σειρά ακροφυσίων για την επιλεκτική εναπόθεση υλικού, που επεξεργάζεται από μια πηγή ενέργειας στην ευρεία περιοχή. Αναλυτικά, σε αυτήν τη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συνεχής (C-IJP) ή κατά παραγγελία (DoD-IJP) δηλαδή διακοπτόμενη όταν χρειάζεται προσέγγιση. Τα υγρά σταγονίδια εναποτίθενται στην πλάκα εργασίας προκειμένου να μαλακώσουν μερικώς το προηγούμενο στρώμα υλικού και να στερεοποιηθούν ως ένα μέρος. Τέλος, το αντικείμενο πρέπει να αποσπαστεί από την πλατφόρμα της κατασκευής και το υλικό υποστήριξης πρέπει να αφαιρεθεί (Mueller J., Shea K., 2018).

Το υλικό υποστήριξης είναι απαραίτητο στοιχείο που είναι προσωρινό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης και συνήθως πρέπει να αφαιρεθεί στο τέλος της κατασκευαστικής διαδικασίας. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση ενός εξαρτήματος με υψηλή ανάλυση.

Στην πραγματικότητα, ο ελάχιστος όγκος ανάλυσης της διαδικασίας κατασκευής είναι ίσος με τον όγκο μιας σταγόνας. Από αυτή την άποψη, η μέθοδος παρέχει πάρα πολύ μικρά μεγέθη σταγονιδίων και στρώσεων. Αυτή η ικανότητα είναι ευεργετική στην κατασκευή ιατρικών μοντέλων. Επί του παρόντος, τα φωτοπολυμερή (σε υγρή μορφή) και το κερί χύτευσης είναι

<sup>5</sup> Το Caveatemptor είναι λατινικά και σημαίνει "Αφήστε τον αγοραστή να προσέχει". Έχει γίνει παροιμία στα Αγγλικά. Σε γενικές γραμμές, η προειδοποίηση emptor είναι η αρχή του νόμου περί συμβάσεων που ελέγχει την πώληση ακινήτων μετά την ημερομηνία κλεισίματος, αλλά μπορεί επίσης να ισχύει για τις πωλήσεις άλλων αγαθών. Η φράση προειδοποίησης emptor και η χρήση της ως αποποίησης εγγυήσεων προκύπτει από το γεγονός ότι οι αγοραστές έχουν συνήθως λιγότερες πληροφορίες από τον πωλητή σχετικά με το αγαθό ή την υπηρεσία που αγοράζουν. Αυτή η ποιότητα της κατάστασης είναι γνωστή ως «ασυμμετρία πληροφοριών». Τα ελαττώματα του αγαθού ή της υπηρεσίας ενδέχεται να κρύβονται από τον αγοραστή και να είναι γνωστά μόνο στον πωλητή.

τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διαδικασίας αυτής συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διαδικασίας εκτόξευσης υλικών (ink-jet) σε 3D εκτυπώσεις

Διαδικασία/Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εκτόξευση υλικών (ink-jet)	Λίγα απόβλητα	Υψηλό κόστος
	Υψηλή ανάλυση	Αργή διαδικασία εκτύπωσης
	Πολλαπλά υλικά	Χαμηλές μηχανικές ιδιότητες
	Πολλαπλές κεφαλές εκτύπωσης	Πρόβλημα στην ακρίβεια πολλών διαστάσεων
	επιφάνεια υψηλής ποιότητας	Μη υποστήριξη αρκετών συνδιασμών υλικών και δομών

LuL. etal. (2014)

Λόγω των πρόσφατων εξελίξεων στη μέθοδο, έχει καταστεί μία από αυτές που τείνουν να χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Αυτά τα ηλεκτρονικά κυκλώματα, αποτελούνται από διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως πυκνωτές, τρανζίστορ και επαγωγείς (Zhang F. etal., 2019). Επιπλέον, η χρήση αυτής της μεθόδου στην κατασκευή πλακετών των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων απλοποιεί τη διαδικασία κατασκευής σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους.

Η εκτύπωση ink-jet μπορεί να εφαρμοστεί όπως ήδη αναφέρθηκε στο σχηματισμό μοτίβων 2D και 3D κατά την απόθεση υγρού σταγονιδίου σε ένα υπόστρωμα που καθοδηγείται από συστήματα σχεδίασης, με τη βοήθεια υπολογιστή. Ένα σταγονίδιο μελανιού 1-pL (picolitre) έχει συνήθως πλάτος 13 mm (Xaar, 2012).

Το C-IJ λειτουργεί με ταχύτερους ρυθμούς παραγωγής σταγονιδίων από το DoD-IJP. Ωστόσο, απαιτεί τη χρήση ηλεκτρικά αγώγιμου υγρού που το περιορίζει στην εφαρμογή και προσαρμογή για δημιουργία τροφίμων. Το DoD-IJP παρουσιάζει πολλαπλές κεφαλές και γενικά λειτουργεί χρησιμοποιώντας θερμικές ή πιεζοηλεκτρικές κεφαλές. Σε έναν θερμικό εκτυπωτή ink-jet, η κεφαλή εκτύπωσης θερμαίνεται ηλεκτρικά για να παράγει παλμούς πίεσης που ωθούν τα σταγονίδια από το ακροφύσιο. Οι πιεζοηλεκτρικοί εκτυπωτές ink-jet περιέχουν έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο μέσα στην κεφαλή εκτύπωσης που δημιουργεί ένα ακουστικό κύμα για να διαχωρίσει το υγρό, σε σταγονίδια σε ομοιόμορφα διαστήματα. Η χρήση τάσης σε πιεζοηλεκτρικό υλικό προκαλεί μια άμεση αλλαγή του σχήματος, η οποία διαδοχικά παράγει την απαραίτητη πίεση για την εξαγωγή σταγονιδίων από το ακροφύσιο.

Η δυναμική συμπεριφορά του υγρού του σταγονιδίου που εκτοξεύτηκε από ένα μικρό άνοιγμα είχε ληφθεί προηγουμένως από μια κατά προσέγγιση λύση στην εξίσωση «NavierStokes». Οι εκτυπωτές ink-jet χειρίζονται γενικά υλικά χαμηλού ιξώδους. Επομένως, η IJP δε βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή σύνθετων δομών τροφίμων. Η τεχνολογία χρησιμοποιείται συνήθως στη διακόσμηση γραφικών, στα φουσκωτά, στη

μικροενθυλάκωση και σε πολύ χαμηλότερη επέκταση, στις κατασκευές τρισδιάστατων ναυογραφημένων (συνήθως εφαρμογών βιοϋλικών).

### 2.3.5 LOM (Laminated Object Manufacturing) Κατασκευή από συγκολλημένα φύλλα αντικειμένου

Οι Feygin και Pakat της Helisys Inc. παρουσίασαν την τεχνική ελασματοποίησης φύλλων το 1991 (Molitch-Hou M., 2020). Στη διαδικασία ελασματοποίησης φύλλων, λεπτά φύλλα υλικών συνδέονται στρώση προς στρώση για να παράξουν ένα συστατικό, το οποίο στη συνέχεια κόβεται στο απαιτούμενο αντικείμενο. Κάθε φύλλο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα στρώματα διατομής του συστατικού. Τα φύλλα υλικού μπορούν να κοπούν με λέιζερ ή να συνδυαστούν με υπερήχους. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αυτής της μεθόδου: (α) πλαστικοποιημένη αντικειμενική κατασκευή (LOM) και (β) υπερηχητική πρόσθετη κατασκευή (UAM).

Στο LOM (Εικόνα 2.7) χρησιμοποιούνται συγκολλητικά για πλαστικοποίηση, ενώ στο UAM χρησιμοποιείται υπερηχητική συγκόλληση για συγκολλήσεις φύλλων μαζί. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορα υλικά, για παράδειγμα: πολυμερές, χαρτί, κεραμικό και μέταλλο. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη μέθοδος για τη δέσμευση των φύλλων κάθε υλικού.

Το χαμηλό κόστος, η υψηλή ταχύτητα και η ευκολία χειρισμού των υλικών είναι πλεονεκτήματα της διαδικασίας. Το πρωταρχικό μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η ανικανότητά της στην εκτύπωση σύνθετων γεωμετριών. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή αποδίδει χαμηλή έως μέση ανάλυση.



Εικόνα 2.7: LOM (Laminated Object Manufacturing) Κατασκευή από συγκολλημένα φύλλα αντικειμένου

(Πηγή: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (20/10/2020))

Η τεχνική γενικότερα έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς, όπως στη βιομηχανία κεραμικών, στην πολιτική μηχανική, στην ιατρική και στην τεχνολογία χυτηρίου (BhattP. etal., 2019). Οι νέες παραλλαγές των μεθόδων SL περιλαμβάνουν άλλα υλικά, διαφορετικές τεχνικές συγκόλλησης και νέες διαδικασίες κοπής. Αυτά μπορούν να οδηγήσουν σε πιο σημαντικούς ρόλους για τη διαδικασία στην κατασκευή διαφόρων μηχανικών εξαρτημάτων.



### 3. 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

#### 3.1 Εφαρμογές στον επιχειρηματικό κόσμο

Ένα αξιοθαύμαστο της τρισδιάστατης εκτύπωσης για εμπορικές εφαρμογές είναι η δυνατότητα κατασκευής σύνθετων τρισδιάστατων πρωτοτύπων ή τελικών προϊόντων που δεν κατασκευάζονται εύκολα με συμβατικά μέσα. Στο παρόν στάδιο ανάπτυξης, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δεν μπορούν να εκτοξεύσουν μεγάλες ποσότητες πανομοιότυπων ανταλλακτικών με κόστος τόσο χαμηλό, όσο μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μαζικής παραγωγής. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά, τα οποία έχουν προσελκύσει την προσοχή μεγάλων κατασκευαστών όπως η Airbus, η Boeing, η GE, η Ford και η Siemens μεταξύ άλλων.

Υπάρχουν και άλλες δυνατότητες τρισδιάστατης εκτύπωσης που είναι ελκυστικές σε περιπτώσεις όπου ο χρόνος και το κόστος είναι σημαντικά. Σε σύγκριση με τις συμβατικές (αφαιρετικές) μεθόδους κατασκευής υπάρχει λιγότερη σπατάλη υλικού. Τα συμβατικά κατασκευασμένα προϊόντα μεταφέρονται συχνά σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμη και σε ηπείρους πριν φτάσουν στον τελικό προορισμό τους. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση, η παραγωγή και η συναρμολόγηση μπορεί να είναι τοπικές. Όταν τα προϊόντα που δεν πωλούνται διακόπτονται, συχνά καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να κατασκευαστούν μόνο όσα απαιτούνται (CampbellT. et al., 2011).

Η γρήγορη δημιουργία ενός πρωτοτύπου εξακολουθεί να είναι το κύριο ελκυστικό χαρακτηριστικό της 3D εκτύπωσης για βιομηχανικές εφαρμογές. Με αργούς ρυθμούς αυτό άρχισε να αλλάζει. Στις αρχές της δεκαετίας του 2010, υπήρχε η εκτίμηση ότι περίπου το 28% των χρημάτων που δαπανιόταν για την εκτύπωση αντικειμένων προοριζόταν για το τελικό προϊόν, σε αντίθεση με ένα πρωτότυπο (Theeconomist, 2012).

Οι παγκόσμιες επιχειρήσεις των περιφερειακά διασκορπισμένων δραστηριοτήτων ενδέχεται να αναπτυχθούν μέσω ψηφιακών υποστηριζόμενων ανταλλαγών (TallmanS. et al., 2018), που δεν περιορίζονται από χωρικά όρια (Kohli& Melville, 2019). Οι επιχειρήσεις και οι βιομηχανίες που βρίσκονται στην πρώτη γραμμή της ολοκλήρωσης της ψηφιακής τεχνολογίας, για παράδειγμα, η τρισδιάστατη εκτύπωση ή η τεχνητή νοημοσύνη, θα είναι επιρρεπείς σε ανταλλαγές ψηφιακών γνώσεων και πλεονεκτήματα των ψηφιακών τεχνολογιών στις παγκόσμιες επιχειρήσεις. Ωστόσο, η ψηφιοποίηση μπορεί να φέρει υπερεκτίμηση των δυνατοτήτων ανταλλαγής γνώσεων και υποτίμηση των κινδύνων διαρροής γνώσεων. Επιπλέον, οι ψηφιακές ανταλλαγές ενδέχεται να περιορίσουν την κατανόηση μεταξύ των διεθνών εταίρων (στόχοι, υπόβαθρα και εμπειρογνωμοσύνη), με αποτέλεσμα ανακριβείς γενικεύσεις (YaminM.&SinkovicsR. R., 2006).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αφορά το σχεδιασμό λύσεων σε ένα κοινωνικο-τεχνικό σύστημα που καταγράφει λειτουργικό λογισμικό, ψηφιακά σχέδια αλλά και ανθρώπινες λειτουργίες (για παράδειγμα, δραστηριότητες εγκατάστασης και πρακτικές μετά την εκτύπωση). Μεταφέρει ψηφιακά σχέδια σε φυσικά προϊόντα πολυμερών, μετάλλων ή πρωτεϊνών (RindfleischA., O'Hern M., SachdevV., 2017). Τα προϊόντα μπορούν να εκτυπωθούν σε

οποιαδήποτε τοποθεσία στον κόσμο (Rayna T. & Striukova L., 2016). Οι προμηθευτές, οι πελάτες ή οι εταιρείες παροχής υπηρεσιών στη βιομηχανία εκτύπωσης 3D μπορούν να διασκορπιστούν διεθνώς. Η βιομηχανία εκτύπωσης 3D δεν περιορίζεται σε τοπικό δίκτυο. Είναι μια γεννημένη-ψηφιακή βιομηχανία ακολουθώντας παγκόσμια επιχειρηματικά μοντέλα από την αρχή της (Conner B. P. et al., 2014). Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι αποδεκτή από την παγκόσμια επιχειρηματική ευθυγράμμιση κατασκευαστών εκτυπωτών, προμηθευτών φυσικών εισόδων (π.χ. πολυμερών, μετάλλων και πρωτεϊνών) και εταιρειών υπηρεσιών που προσφέρουν λογισμικό και προσωπικές λειτουργίες. Το τελικό στάδιο παραγωγής είναι συνήθως τοπικό για την εξοικονόμηση κόστους (logistics). Εν ολίγοις, το παγκόσμιο, αλλά και τοπικό σκηνικό της γεννημένης-ψηφιακής 3D βιομηχανίας εκτύπωσης επιτρέπει τη μελέτη διαφορετικών δεσμών γνώσης και τις παγκόσμιες δραστηριότητες που εκτείνονται στα όριά της.

### 3.2 Κλάδοι παραγωγής όπου εφαρμόζεται η τρισδιάστατη εκτύπωση

Κάθε νέα εφεύρεση παρακινείται από την επιθυμία να δημιουργηθεί κάτι που δε δημιουργήθηκε ποτέ πριν, ή να βελτιωθεί κάτι στους υφιστάμενους τρόπους επίλυσης ενός προβλήματος. Από τη δεκαετία του 1990, οι εφαρμογές για εκτύπωση 3D έχουν κυριολεκτικά εκραγεί, καθώς οι περιορισμοί μεγέθους και το κόστος έχουν μειωθεί και η λίστα των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αυτήν την τεχνολογία έχει επεκταθεί δραματικά. Οι εφαρμογές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε διάφορες ευρείες κατηγορίες:

- Αεροναυπηγική
- Ιατρική
- Τέχνες
- Ηλεκτρονικά εξαρτήματα
- Κοσμήματα
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Οικιακές εφαρμογές
- Εκτύπωση τροφίμων

#### 3.2.1 Αεροναυπηγική

Η Sciaky, Inc. ανέπτυξε ένα μεταλλικό εκτυπωτή χρησιμοποιώντας τεχνολογία προσθετικής παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων (EBAM) για την εκτύπωση τεράστιων μεταλλικών πρωτοτύπων. Στην εικόνα 3.1 το μηχάνημα έχει όγκο κατασκευής 5.5x1.2x1.2 m και μπορεί να εκτυπώσει τρισδιάστατα μέταλλα όπως τιτάνιο, ταντάλιο, ανοξείδωτο ατσάλι και Inconel<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup>Το Inconel είναι σήμα κατατεθέν της Special Metals Corporation για μια οικογένεια μετάλλων με βάση το ωστενιτικό νικέλιο-χρώμιο. Τα κράματα Inconel είναι υλικά ανθεκτικά στην οξείδωση και στη διάβρωση, κατάλληλα για χρήση σε ακραία περιβάλλοντα που υπόκεινται σε πίεση και θερμότητα (Khoronovsky et al., 1989).

Η τεχνολογία χρησιμοποιείται από την Lockheed και την Boeing για την κατασκευή ανταλλακτικών των μαχητικών.



*Εικόνα 3.2.1:Μεταλλικός 3D εκτυπωτής*

(<http://additivemanufacturing.com/2015/09/16/sciaky-inc-to-highlight-its-new-metal-additive-manufacturing-capabilities-at-euromold/26/9/2020>)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, συγκεκριμένα (α) από τη φυσική κατάσταση της πρώτης ύλης, δηλαδή, με υγρό, στερεό ή σκόνη (ChuaC. K. and LeongK. F., 2015) και (β) με τον τρόπο όπου η ύλη συντήκεται σε μοριακό επίπεδο, δηλαδή με θερμική, υπεριώδη δέσμη φωτός, λέιζερ ή ακτίνα ηλεκτρονίων (HopkinsonN. et al. 2006).

Στον κλάδο της αεροδιαστημικής, το FSAM (Προσθετική παραγωγή υλών) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενισχυτικών / δοκών, φτερών πτερυγίων και πάνελ (Palanivel S., 2015). Η κατασκευή ελεύθερης μορφής δέσμης ηλεκτρονίων (EBF3) χρησιμοποιεί μια δέσμη ηλεκτρονίων με σύστημα βασισμένο στην τήξη μετάλλων αντί για σκόνης. Το EBF3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή δομών με υλικά όπως το αλουμίνιο, οι χάλυβες υψηλής αντοχής, το τιτάνιο, τα αλουμίνια τιτανίου, τα κράματα με βάση το νικέλιο και τα σύνθετα μεταλλικά πλέγματα (Taminger K.M. &Hafley R.A., 2006) Το WAAM είναι ένα άλλο σύστημα βασισμένο σε σύρμα που προσφέρει αποτελεσματικά εναπόθεση μετάλλων συγκόλλησης χωρίς περιορισμούς. Η διαδικασία μπορεί να παράγει κάθετα, οριζόντια και γωνιακά τοιχώματα, κωνικά τμήματα μικτού υλικού, κλειστά τμήματα, και διασταυρώσεις.

Πολλή έρευνα συνεχίζεται για τη χρήση διαφορετικών τύπων μετάλλων και κραμάτων στην προσθετική παραγωγή. Τα πολυμερή αντικείμενα, τα κεραμικά σύνθετα αντικείμενα, τα αντικείμενα από κράματα αλουμινίου ή χάλυβα και τα αντικείμενα τιτανίου μπορούν να εκτυπωθούν με ελάχιστο πάχος στρώσης 20-100 μm, ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται και τη φυσική κατάσταση του υλικού. Από την άποψη της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, δίνεται σημασία στα κράματα που βασίζονται σε τιτάνιο και νικέλιο (UriondoA.

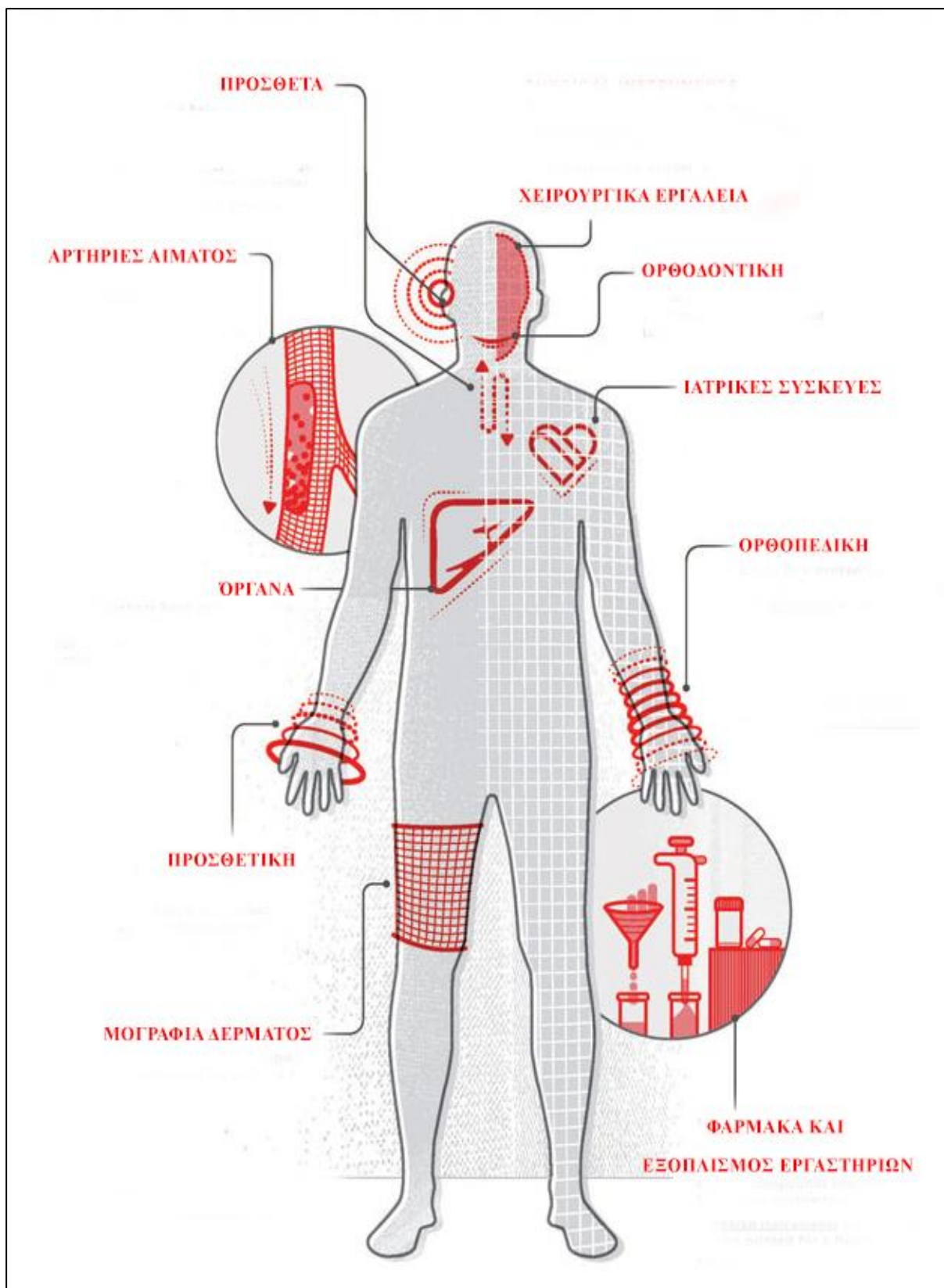
et al. 2015). Τα κράματα με βάση το νικέλιο προτιμώνται στην αεροδιαστημική λόγω των ιδιοτήτων εφελκυσμού τους, της ανοχής τους στις βλάβες και της αντίστασής τους στη διάβρωση / οξείδωση (Nijdam T.J. & Gestel R.V., 2010).

Στις αρχές του 2015, η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας (FAA) πιστοποίησε το πρώτο μέρος ενός τρισδιάστατου εμπορικού τζετ κινητήρα από τη GE. Το μέρος ήταν τυπωμένο από ασήμι για να στεγάσει τον αισθητήρα θερμοκρασίας εισόδου του συμπιεστή μέσα στον κινητήρα τζετ. Η GE Aviation συνεργάζεται με την Boeing για να μετασκευάσει τους κινητήρες τζετ GE90-94B με περισσότερα από 400 ανταλλακτικά 3D. Ο κινητήρας τζετ επόμενης γενιάς LEAP από τη GE, ο οποίος διαθέτει 19 ακροφύσια καυσίμου με εκτύπωση 3D, δοκιμάζεται επί του παρόντος κατά την πτήση. Στόχος τους είναι να τροφοδοτήσουν τα αεροσκάφη Boeing 737MAX και Airbus A320neo. Υπάρχουν περίπου 100 3D ανταλλακτικά που χρησιμοποιούνται για τους αγωγούς ψύξης αέρα στους πίδακες Super Hornet (Khajavi S.H. et al. 2014). Ορισμένα μέρη ενός συστήματος στο ελικόπτερο Bell 429 κατασκευάστηκαν επίσης χρησιμοποιώντας τεχνολογία σύντηξης με λέιζερ.

Στη δοκιμή πτήσης της κάψουλας Orion της NASA στις 5 Δεκεμβρίου του 2014 χρησιμοποιήθηκε ένας εξαεριστήρας πίεσης Inconel με τρισδιάστατη εκτύπωση (Williamson 2015). Για να χρησιμοποιήσει το AM, η Lockheed Martin επανασχεδίασε έναν ανακλαστήρα κεραίας από το μηδέν και κατάφερε να μειώσει το βάρος της κεραίας από 395 σε 40 kg (Williamson M., 2015). Η Boeing χρησιμοποιεί επίσης τρισδιάστατη εκτύπωση για την κατασκευή πλαστικών εσωτερικών μερών.

### 3.2.2 Ιατρική

Ο τομέας της υγειονομικής περίθαλψης έχει γίνει σημαντικός χρήστης της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η εικόνα 3.2 αποτυπώνει μερικές από τις εφαρμογές της. Αυτές κυμαίνονται από τη δημιουργία προσαρμοσμένων κορώνων και στηριγμάτων για τα δόντια, κελύφη για τα ακουστικά βαρηκοΐας, διάφορα προσθετικά και εμφυτεύσιμες συσκευές και μοντέλα διαφόρων οργάνων του σώματος. Όλα αυτά, επιτρέπουν στους χειρουργούς να βελτιώσουν τις προσεγγίσεις τους και να μειώσουν το χρόνο που απαιτείται για τις χειρουργικές επεμβάσεις. Η βιολογική εκτύπωση, ακόμα στις αρχές της, θα επιτρέψει τελικά την προσαρμογή της παράδοσης φαρμάκων σε συγκεκριμένα όργανα, την εκτύπωση του ανθρώπινου ιστού και ακόμη και τα καλλυντικά. Οι Aimar A. et al. (2019) ανασκοπούν διεξοδικά τις πτυχές των ιατρικών εφαρμογών στους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Το οδοντιατρικό εργαστήριο όπως το γνωρίζουμε σήμερα, μπορεί να αντικατασταθεί από την τρισδιάστατη εκτύπωση στο μέλλον. Παραδοσιακά, οι κορώνες κατασκευάζονται σε κάποιο οδοντιατρικό εργαστήριο. Ο οδοντίατρος κάνει ένα αποτύπωμα του δοντιού (ή των δοντιών εάν σχεδιάζεται μια γέφυρα) και το στέλνει στο οδοντιατρείο. Κάθε τεχνικός εργαστηρίου, ως άνθρωπος, έχει το μοναδικό του στυλ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μεταβλητότητα στο τελικό προϊόν από άτομο σε άτομο και μέρα με τη μέρα.



Εικόνα 3.2.2: Εφαρμογές της 3D εκτύπωσης στην ιατρική επιστήμη  
(<https://3dprintingindustry.com/news/made-order-healthcare-state-3d-printing-28331/> 3/10/2020)

Τα παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιούνται στην οδοντιατρική επεκτείνονται και συρρικνώνονται με την έκθεσή τους σε θερμοκρασία και σε υγρασία. Αυτό είναι δύσκολο να ελεγχθεί. Το αποτέλεσμα αυτού, στον ασθενή είναι περισσότερος χρόνος στο οδοντιατρείο σε μακροχρόνια βάση. Λίγες μέρες ή μερικές εβδομάδες αργότερα το στέμμα αποστέλλεται στον οδοντίατρο. Μια άλλη επίσκεψη έχει προγραμματιστεί για τον ασθενή, ώστε να ταιριάζει στο στέμμα. Ανάλογα με την εφαρμογή, ενδέχεται να απαιτείται τρίτη επίσκεψη για την τελική προσαρμογή.

Πλέον θα είναι δυνατόν για παράδειγμα, ένας οδοντίατρος να κάνει μια τρισδιάστατη σάρωση του δοντιού (ή της κορώνας) και να το εκτυπώσει επί τόπου. Δεδομένου ότι γίνεται απευθείας η μέτρηση, απαιτείται λιγότερος χρόνος στην καρέκλα. Όπως συμβαίνει με όλες σχεδόν τις ιατρικές εφαρμογές, η διαδικασία είναι ακόμη στις αρχές της, αλλά φαίνεται να είναι αρκετά υποσχόμενη, με αυξημένη άνεση του ασθενούς και (τελικά) μειωμένο κόστος (Whitpaper, 2014).

Η γναθοπροσωπική προσθετική (μάτια, μύτες, αυτιά, οστά προσώπου) είναι πολύ επίπονη και δαπανηρή στην παραγωγή διαδικασία. Τα αυτιά και οι μύτες μπορούν να κοστίσουν έως και 3.000 € το καθένα. Λαμβάνεται υπόψη μια πρώτη εντύπωση της κατεστραμμένης περιοχής, στη συνέχεια το μέρος του σώματος σμιλεύεται από κερί και αυτό το σχήμα δημιουργείται από σιλικόνη. Χρησιμοποιώντας τεχνολογία εκτύπωσης 3D (Sieberth T. et al., 2020), χρησιμοποιούνται ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές για τη σάρωση της τραυματισμένης περιοχής. Στη συνέχεια δημιουργείται ένα ψηφιακό μοντέλο για το τμήμα, το οποίο ενσωματώνει τον τόνο του δέρματος του ασθενούς. Αυτές οι πληροφορίες αποστέλλονται σε έναν έγχρωμο εκτυπωτή 3D. Το κόστος του τυπωμένου τμήματος είναι περίπου το ίδιο με αυτό ενός χειροποίητου προσθετικού. Το πλεονέκτημα έγκειται στο γεγονός, ότι τώρα υπάρχει ένα ψηφιακό μοντέλο. Στο μέλλον, όταν χρειάζονται αντικαταστάσεις για οποιονδήποτε λόγο, μπορούν να γίνουν πολύ πιο φθηνά.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την προσαρμογή των μηχανικών άκρων. Οι συνηθισμένοι στόχοι είναι να προστεθεί μια ικανότητα που λείπει, είτε λόγω γενετικού ελαττώματος ή τραυματισμού. Άλλοι λόγοι περιλαμβάνουν τη βελτίωση της άνεσης και της εφαρμογής μιας υπάρχουσας προσθετικής συσκευής. Για παράδειγμα, μπορεί κανείς να σκεφτεί ένα προσθετικό χέρι, σχεδιασμένο για έναν άνδρα που, από τη γέννησή του, έλειπε ένα μεγάλο μέρος του αριστερού του χεριού. Ένα προσθετικό υψηλής τεχνολογίας που κόστισε πάνω από 35.000 € αντικαταστάθηκε από ένα τρισδιάστατο τυπωμένο χέρι που του παρείχε μια ισχυρότερη πρόσφυση. Επιπλέον και το κόστος είναι πολύ λιγότερο, λόγω του ότι πλέον θα μπορούσε να αναπτυχθεί από το e-NABLE. Το τελευταίο, αποτελεί μια παγκόσμια διαδικτυακή κοινότητα ανθρωπιστικών εθελοντών που σχεδιάζουν, κατασκευάζουν και διαδίδουν φθηνά λειτουργικά τρισδιάστατα τυπωμένα προσθετικά (Parry-Hill J. 2017). Το χέρι, που ονομάζεται CyborgBeast, φαίνεται στην εικόνα 3.3. Γενικότερα, στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά άλλα παραδείγματα προσθετικών συσκευών. Ένα από αυτά είναι επίσης μια πρόσθετη συσκευή η οποία χρησιμεύει ως εξωσκελετός όπως αναφέρεται από τους Abdalla I. et al. (2017) και επιτρέπει την κινητικότητα.



Εικόνα 3.2.23: *Cyborgbeast*, ένα 3D εκτυπωμένο χέρι για παιδιά (*e-NABLE*).  
(Πηγή: <http://enablingthefuture.org/current-design-files/cyborg-beast-hand/> 3/10/2020)

Σε ένα περιστατικό που σημειώθηκε στο Παιδικό Νοσοκομείο C. S. Mott στις Η.Π.Α. η παρέμβαση με μεθόδους 3D εκτύπωσης ήταν καθοριστική. Οι αεραγωγοί ενός μωρού ηλικίας έξι εβδομάδων σε έναν από τους πνεύμονές του κατέρρευσαν προκαλώντας το να σταματήσει να αναπνέει. Οι γιατροί φοβόντουσαν ότι το μωρό δεν θα έμενε ζωντανό εκτός εάν κάτι γινόταν άμεσα. Το Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν ανέπτυξε μια νέα βιοαπορροφήσιμη συσκευή που θα μπορούσε να βοηθήσει το μωρό. Η συνεργασία αυτή οδήγησε σε μια ειδικά σχεδιασμένη και κατασκευασμένη συσκευή, έναν νάρθηκα, που εμφυτεύτηκε στους αεραγωγούς, για να τους κρατήσει ανοιχτούς. Το σώμα θα απορροφούσε τελικά τη συσκευή και ο αεραγωγός θα παρέμενε ανοιχτός μόνος του (Prince J., 2014).

Η εγχείρηση εγκεφάλου απαιτεί οπές διάτρησης στα κρανία. Τα κρανιακά βύσματα που κατασκευάζονται σε εκτυπωτές 3D μπορούν να γεμίσουν και να κλείσουν αυτές τις οπές. Οι κρανιακές πλάκες μπορούν να αντικαταστήσουν μεγάλα τμήματα ενός κρανίου που χάθηκαν λόγω τραύματος στο κεφάλι ή λόγω καρκίνου. Επίσης, συχνά τέτοιες εκτυπώσεις γίνονται στα περιστατικά όπου προσεγγίζονται θεραπείες για τις ασθένειες του Πάρκινσον και της δυστονίας. Η μέθοδος που συνήθως ακολουθείται είναι η DBS<sup>7</sup> (Deep Brain Stimulation).

Πολυάριθμες κλινικές και νοσοκομεία έχουν χρησιμοποιήσει την τρισδιάστατη εκτύπωση για τον ορθοπεδικό τομέα και συγκεκριμένα για το ισχίο και το γόνατο (DipaolaM., 2018). Ο Dr. Barry Waldman από το OrthoMaryland στη Βαλτιμόρη, χρησιμοποίησε αξονική τομογραφία για να δημιουργήσει ένα εμφύτευμα και να κατασκευάσει τους πλαστικούς οδηγούς κοπής που κατευθύνουν τις τομές του χειρουργού. Οι αρθρώσεις αντικατάστασης αφορούσαν έναν πρώην αθλητή που είχε υποφέρει για περισσότερα από δέκα χρόνια με σπασίματα στα πόδια, λυγισμένα ως έξι βαθμούς, εκτός ευθυγράμμισης. Το κίνητρο για τη χρήση της τεχνολογίας 3D για τη δημιουργία αρθρώσεων αντικατάστασης ήταν η ελαχιστοποίηση της ποσότητας των οστών που έπρεπε να εμπλακούν για την εγκατάσταση

<sup>7</sup> Η εν τω βάθει εγκεφαλική διέγερση (DBS) είναι μια νευροχειρουργική διαδικασία που περιλαμβάνει την τοποθέτηση μιας ιατρικής συσκευής που ονομάζεται νευροδιεγερτής (μερικές φορές αναφέρεται ως "βηματοδότης του εγκεφάλου"), η οποία στέλνει ηλεκτρικά ερεθίσματα, μέσω εμφυτευμένων ηλεκτροδίων, σε συγκεκριμένους στόχους στον εγκέφαλο (πυρήνες του εγκεφάλου), για τη θεραπεία διαταραχών της κίνησης, συμπεριλαμβανομένης της νόσου του Πάρκινσον, του βασικού τρόμου και της δυστονίας (Kringelbach M. et al., 2007). Ενώ οι βασικές αρχές και οι μηχανισμοί του δεν είναι πλήρως κατανοητοί, το DBS αλλάζει άμεσα την εγκεφαλική δραστηριότητα με ελεγχόμενο τρόπο.

κάθε εμφυτεύματος. Ο Bodley M.(2014). αναφέρει για τον Dr. Waldman: «Μπορείτε να πάρετε ένα εμφύτευμα «από το ράφι» και μπορεί να μην χωράει. Πολλές φορές θα ήμασταν στη μέση μιας χειρουργικής επέμβασης και θα λέγαμε: αυτό είναι μεταξύ 5 και 6 και χρειαζόμαστε ένα 5.5. Λοιπόν, δεν υπάρχει 5.5».

Τα τυπωμένα τρισδιάστατα μοντέλα ρεπλίκα των μερών και των οργάνων του σώματος έχουν αποδειχθεί πολύτιμα σε ιατρικές εφαρμογές. Επιτρέπουν την ανάλυση των περίπλοκων και των εναλλακτικών προσεγγίσεων πριν από τη χειρουργική επέμβαση ενός ασθενούς. Αυτό έχει αντίκτυπο τόσο στο κόστος όσο και στη διάρκεια των χειρουργικών επεμβάσεων. Ο ασθενής ωφελείται εάν διαπιστωθεί ότι η ελάχιστη επεμβατική χειρουργική διαδικασία είναι δυνατή από μικρότερους χρόνους αναισθησίας. Κατά το νοσοκομείο Houston Methodist (2014), ένα μόσχευμα στεντ από τρισδιάστατη εικόνα εξαλείφει την ανάγκη για ανοιχτή χειρουργική επέμβαση, για ορισμένους ασθενείς που πάσχουν από ανευρύσματα της κοιλιακής αορτής. Ένα ανεύρυσμα κοιλιακής αορτής είναι μια διευρυμένη περιοχή στο κάτω μέρος της αορτής. Δεδομένου ότι η αορτή είναι ο κύριος προμηθευτής αίματος στο υπόλοιπο σώμα, μια ρήξη του ανευρύσματος της κοιλιακής αορτής μπορεί να είναι θανατηφόρο. Απαιτείται χειρουργική επέμβαση για τη θεραπεία αυτού του προβλήματος. Αυτό περιλαμβάνει το άνοιγμα της κοιλιάς και μερικές φορές τουστήθου, για να εκτελεστεί μια πολύπλοκη διαδικασία.

Στη νέα προσέγγιση, ένα προσαρμοσμένο μόσχευμα στεντ βασισμένο σε μετρήσεις από μια αξονική τομογραφία (Ηλεκτρονική Τομογραφία: τεχνική που συνδυάζει μια σειρά από ακτίνες X που λαμβάνονται από πολλές διαφορετικές γωνίες και επεξεργασία τους στον υπολογιστή, για τη δημιουργία εικόνων διατομής των οστών και του μαλακού ιστού μέσα στο σώμα) όπου τοποθετείται στο ανεύρυσμα περνώντας από τη βουβωνική χώρα. Οι περισσότεροι ασθενείς επιστρέφουν στο σπίτι μετά από λίγες μέρες με ελάχιστο πόνο ή δυσφορία. Οι ασθενείς εμφανίζουν λιγότερη απώλεια αίματος. Γενικότερα αυτοί οι ασθενείς εξασφαλίζουν μια πιο σύντομη διαμονή στη Μ.Ε.Θ. (Μονάδα Εντατικής Θεραπείας) και μια ταχύτερη επιστροφή σε μια κανονική διατροφή και τακτικές δραστηριότητες, από εκείνους που υποβάλλονται σε ανοιχτή διαδικασία για την επίλυση αυτού του προβλήματος.

Πριν μερικά χρόνια εμφανίστηκε ένας αριθμός βιολογικών εκτυπωτών. Σύμφωνα με τον Wong V. (2014), η βιολογική εκτύπωση χρησιμοποιεί έναν εξειδικευμένο τρισδιάστατο εκτυπωτή για τη δημιουργία του ανθρώπινου ιστού. Αντί να εναποτίθεται υγρό πλαστικό ή μεταλλική σκόνη για την κατασκευή αντικειμένων, ο εκτυπωτής εναποθέτει ζώντα κύτταρα σε στρώμα. Ο στόχος, που απέχει ακόμη τουλάχιστον μια δεκαετία, είναι η δημιουργία ανθρώπινων ιστών για χειρουργική θεραπεία και μεταμόσχευση. Πολλά εργαστήρια δοκιμάζουν την ιδέα εκτυπώνοντας ιστό για έρευνα και δοκιμή φαρμάκων

### 3.2.3 Τέχνες

Οι εναλλακτικές χρήσεις της τεχνολογίας ήταν αρκετά συχνές σε όλη την ιστορία. Πολλές από τις σημερινές δημοφιλείς τεχνολογίες του κλάδου της ψυχαγωγίας έχουν εξελιχθεί από απλά και χρήσιμα εργαλεία, σε πιο «παιχνιδιάρικες» συσκευές. Η σφαίρα της τρισδιάστατης εκτύπωσης χαμηλού κόστους δεν αποτελεί εξαίρεση σε αυτό.

Καθώς η καμπύλη μάθησης για τη χρήση ενός 3D εκτυπωτή μειώνεται, περισσότεροι άνθρωποι έχουν μεταβεί σε αυτόν. Οι χρήστες με ελάχιστες ή καθόλου δεξιότητες σε ηλεκτρονικό επίπεδο, στον προγραμματισμό ή στη μοντελοποίηση βρήκαν στην τρισδιάστατη εκτύπωση έναν τρόπο να δημιουργήσουν και να εκφραστούν με έναν προηγούμενος άγνωστο



πολύ φυσικό τρόπο. Η αμεσότητα της διαδικασίας, την καθιστά εξαιρετικά ικανοποιητική και οι άνθρωποι συνεχίζουν να πιάζουν τα όρια της δημιουργικότητάς τους, χρησιμοποιώντας αυτήν τη φθηνή, απλή και ταυτόχρονα πολύ περίπλοκη τεχνολογία. Στο χώρο των τεχνών, τα δημιουργικά μυαλά έχουν υιοθετήσει αυτήν την τεχνολογία από την αρχή και έχουν δώσει τις χρήσεις που κανείς δεν είχε προβλέψει πιθανότατα πριν.

Οι καλλιτεχνικές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα συσκευών εισόδου όπως κάμερες, αισθητήρες, διακόπτες και επίσης συσκευές εξόδου όπως κινητήρες, ενεργοποιητές ή φώτα. Αυτές οι συσκευές είναι συνήθως εκτός θέασης για αισθητικούς ή ακόμη και λόγους ασφαλείας. Για να στεγάσουν αυτά τα εξαρτήματα, οι σχεδιαστές βασίζονται σε υπάρχοντα διαθέσιμα στο εμπόριο προϊόντα. Ωστόσο, με έναν εκτυπωτή 3D, αυτό το περίβλημα μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ανταποκρίνεται στις ακριβείς απαιτήσεις.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι ένα γλυπτό του Cosmo Wenman. Ο Wenman χρησιμοποιεί μια ψηφιακή κάμερα για να τραβήξει εκατοντάδες φωτογραφίες από διαφορετικές οπτικές γωνίες ενός υπάρχοντος γλυπτού και, στη συνέχεια, τις ράβει μαζί χρησιμοποιώντας λογισμικό υπολογιστή. Ένα από τα πιο εντυπωσιακά έργα του είναι το κεφάλι ενός αλόγου που ανήκει σε ένα αρχαίο μαρμάρινο γλυπτό που βρέθηκε στην Αθήνα γύρω στο 438 π.Χ. Μετά την απόκτηση του μοντέλου, χωρίστηκε σε μικρότερα εκτυπώσιμα κομμάτια και μετά επανατοποθετήθηκε και του δόθηκε μια βαφή για να μοιάζει με χάλκινο φινίρισμα. Αυτό αναδεικνύει επίσης μια άλλη χρήση της εκτύπωσης 3D: τη δυνατότητα αναπαραγωγής κομματιών μουσείων που μπορούν να εμφανιστούν οπουδήποτε. Μία επιπλέον δημιουργία αποτυπώνεται στην εικόνα 3.4.



*Εικόνα 3.4: Εκτυπωμένη 3D προτομή στο εσωτερικό ενός εκτυπωτή*

(Πηγή: <https://www.fabbaloo.com/blog/2018/9/20/using-3d-printing-technology-to-protect-and-restore-museum-and-library-collections> 27/10/2020)

### 3.2.4 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Τα τρισδιάστατα τυπωμένα ηλεκτρονικά έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια, λόγω της επιτυχίας τους στο να επιτρέπουν την κατ'απαίτηση κατασκευή (ηλεκτρονικά υψηλής προσαρμογής σε μεγάλες ποικιλίες υποστρωμάτων, όπως για παράδειγμα, μεμβράνες πολυμερούς, χαρτιά και υφάσματα και σε συμμορφωμένες επιφάνειες). Η τρισδιάστατη εκτύπωση ηλεκτρονικών είναι ένας διεπιστημονικός τομέας που ενσωματώνει την επιστήμη των υλικών με τις αρχές της μηχανικής, στο οποίο οι μηχανές εναποθέτουν με ακρίβεια αγωγίμα μελάνια σε υποστρώματα (για παράδειγμα, τεχνολογίες άμεσης εγγραφής όπως εκτυπωτές αεροζόλ και εκτυπωτές μελάνης).

Οι τρέχουσες συμβατικές μέθοδοι κατασκευής ηλεκτρονικών περιλαμβάνουν μια σειρά πρόσθετων και αφαιρετικών τεχνικών κατασκευής που είναι περίπλοκες, χρονοβόρες, μη οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, η τρισδιάστατη εκτύπωση ηλεκτρονικών έχει ως στόχο να μετριάσει αυτά τα μειονεκτήματα. Ταυτόχρονα, επιτρέπει την κατασκευή ηλεκτρονικών με χαμηλό κόστος, με σκοπό να βοηθήσει στην αύξηση της ελευθερίας των σχεδίων, επιτρέποντας την κατασκευή ηλεκτρικών κυκλωμάτων και εξαρτημάτων απευθείας σε διάφορους τύπους υποστρωμάτων.

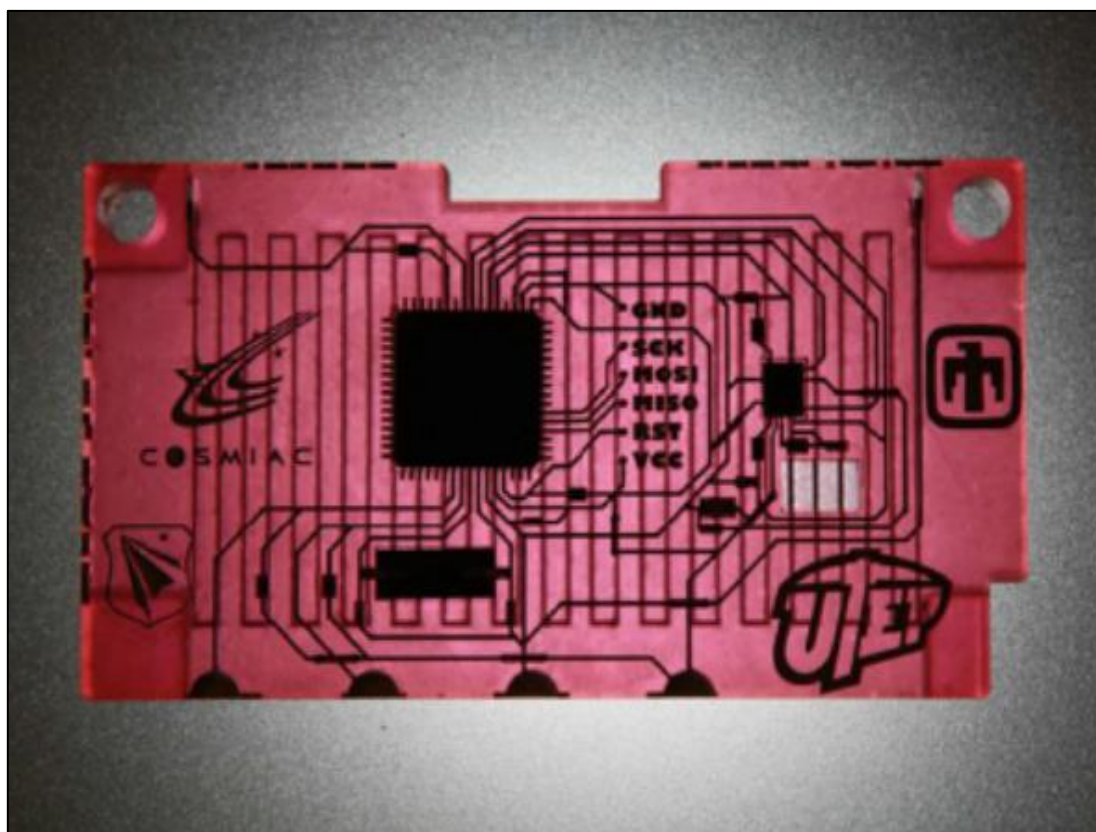
Από την ίδρυση της μεταποιητικής βιομηχανίας λοιπόν, οι ερευνητές βελτιώνουν την τεχνολογία όσον αφορά την κατασκευή προϊόντων τελικής χρήσης και περιλαμβάνουν ενσωματωμένα εξαρτήματα. Ένας ολοένα και μεγαλύτερος αριθμός ερευνητών έχει δείξει ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη ικανότητα κατασκευής τρισδιάστατων και διαμορφωτικών ηλεκτρονικών, χρησιμοποιώντας την προσθετική παραγωγή και οι αναφορές υπάρχουν ήδη από το 1998 (Weiss L. & Prinz F., 1998). Ο συνδυασμός της άμεσης εκτύπωσης (DP) αγωγίμων μελανιών σε κατασκευές στερεάς ελεύθερης μορφής εισήχθη από τους Palmer et al. (2004) και Medina et al. (2005), στις οποίες εφαρμόστηκαν κυκλώματα για την επίδειξη λειτουργικότητας. Στην ουσία, ενσωμάτωσαν ένα σύστημα διανομής σε μια μηχανή στερεολιθογραφίας, χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα γραμμικά στάδια με μια κεφαλή διανομής.

Οι Lopes et al (2006) επέδειξαν έναν απλό πρωτότυπο αισθητήρα θερμοκρασίας με εννέα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένου ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος σε ένα πακέτο χαμηλής πυκνότητας. Παρομοίως, οι Palmer et al. (2005) επέδειξαν την κατασκευή ενός πρωτοτύπου ρελέ και ενός ηλεκτρικού κουτιού διασταύρωσης. Οι Periard D. et al. (2007) έδειξαν ένα παρόμοιο κύκλωμα, καθώς και πολλές έξυπνες ηλεκτρομηχανικές εφαρμογές που δημιουργήθηκαν από ένα σύστημα κατασκευής ανοιχτού κώδικα. Οι Navarrete et al. (2007) περιέγραψαν βελτιώσεις στην πυκνότητα του αγωγού, εισάγοντας κανάλια στο υπόστρωμα για τον περιορισμό του αγωγίμου υλικού. Ο λόγος ήταν, ημείωση της πιθανότητας βραχυκύκλωσης και η βελτίωση της περιοχής διατομής για καλύτερη απόδοση. Η απόσταση των γραμμών ελέγχθηκε έτσι από την ακρίβεια της δέσμης λέιζερ σε αντίθεση με το σύστημα διανομής. Επιπλέον, αυτή η επίδειξη περιλάμβανε όχι μόνο ψηφιακή λογική και έλεγχο, αλλά και ασύρματη ραδιοσυχνότητα (π.χ. κεραία). Οι RamG.D.J et al. (2007) αναφέρουν επίσης, ηλεκτρονικά ενσωματωμένα σε τρισδιάστατες τυπωμένες μεταλλικές κατασκευές.

Η συνεργατική εργασία των Stratasys και Optomec ανέφερε τη χρήση FDM με αγωγούς ψεκασμού, αλλά χρησιμοποίησαν συσκευασία μεγάλου μεγέθους με πείρο (Paulsen J.A., 2012). Τα περισσότερα από τα αναφερόμενα κυκλώματα μέχρι και ένα σημείο, απαιτούσαν

τη χρήση ενός μόνο επιπέδουδρομολόγησης, αν και η έννοια των πολλαπλών επιπέδων με κάθετη διασύνδεση ήταν προφανής.

Σημαντικές εξελίξεις σχετικά με τον τύπο ενός αγωγίμου μελανιού προέκυψαν από ένα πρόγραμμα στις αρχές της δεκαετίας του 2000 (DARPA DSO, 2010) και υπήρξε σημαντική προσπάθεια στηβελτίωση των αγωγίμων μελανιών γενικά (Park B.K. et al., 2007). Ωστόσο, η αγωγιμότητα παραμένει μια μεγάλη πρόκληση όχι μόνο για τα 3Dηλεκτρονικά τυπωμένα, αλλά στο γενικότερο πεδίο των ηλεκτρονικών τυπωμένων υλών 2D. Αυτό γιατί, τα μελάνια παρέχουν συνήθως κακή αγωγιμότητα εάν το υλικό του υποστρώματος (π.χ. χαρτί, χαρτόνι, πολυμερή, Karton®) περιορίζει τη θερμοκρασία της επόμενης σκλήρυνσης. Στην εικόνα3.5 φαίνεται μια τυπωμένη μονάδα (πλακέτα) με τη μέθοδο τηςστερολιθογραφίας.



Εικόνα 3.5: Οπίσθιος όψη της τρισδιάστατης τυπωμένης μονάδας CubeSat που παράγεται χρησιμοποιώντας στερολιθογραφία και τεχνολογίες άμεσης εκτύπωσης (Πηγή: Espalin D. et al., 2014)

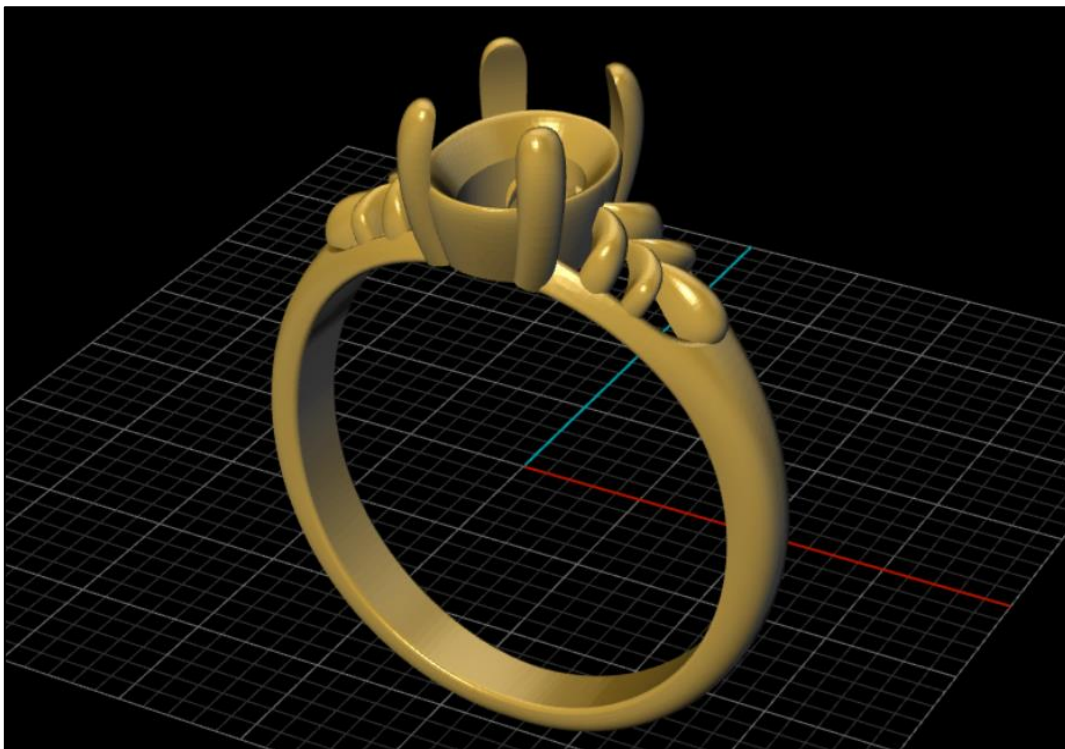
Τα μεταλλικά μελάνια νανοσωματιδίων είναι εναιωρήματα μεταλλικών νανοσωματιδίωνμέσα σε υγρά, στα οποία ενθυλακώνονται μεμονωμένα μεταλλικά νανοσωματίδια, σε ένα στρώμα μονωτικών οργανικών προσθέτων και σταθεροποιητικών παραγόντων. Τα ενθυλακωμένα οργανικά πρόσθετα και οι σταθεροποιητικοί παράγοντες βοηθούν στην αποτροπή συσσωμάτωσης των μεταλλικών νανοσωματιδίων, αλλά ταυτόχρονα εμποδίζουν επίσης τη ροή των ηλεκτρονίων από σωματίδια προς σωματίδια.

Τα τυπωμένα σχέδια αποτελούνται κυρίως από μεταλλικά νανοσωματίδια μετά την αποσύνθεση υγρών μέσων και οργανικών προσθέτων. Επομένως, η σύνθεση του υλικού των μεταλλικών νανοσωματιδίων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ηλεκτρικές, μηχανικές και υλικές ιδιότητες των τυπωμένων σχεδίων (TanH. et al., 2019).

### 3.2.5 Κοσμήματα

Είναι σημαντική η κατανόηση του ρόλου της προσθετικής παραγωγής σε μια περιοχή που εξακολουθεί να προσκολλάται στην παράδοση, η οποία χρειάζεται αλλαγές της διαδικασίας βραχυπρόθεσμα, για να παραμείνει οικονομικά ανταγωνιστική. Από τη σκοπιά του σχεδιασμού λοιπόν, παρέχεται μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού στην κατασκευή πραγμάτων που διαφορετικά θα ήταν αδύνατο να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές κατασκευής. Οι σχεδιαστές μπορούν τώρα να πειραματιστούν με το σχεδιασμό τους χωρίς όρια στη δημιουργικότητά τους, χρησιμοποιώντας αυτήν τη νέα τεχνολογία. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη βιομηχανία τέχνης και μόδας, όπου ο σχεδιασμός και η δημιουργικότητα είναι τα δύο βασικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, η χρήση της μεθόδου προσφέρει μια νέα πραγματικότητα για αποτελεσματική προσαρμογή, σε συνδυασμό με την υψηλή ποιότητα του τελικού προϊόντος για την κάλυψη της υψηλής ζήτησης στην αγορά για ενδύματα και κοσμήματα κατά παραγγελία (Ferreira, T., 2012).

Τα τελευταία χρόνια, τα τρισδιάστατα προϊόντα μόδας βρίσκονται στο επίκεντρο πολλών επιδείξεων μόδας. Μερικά αξιοσημείωτα παραδείγματα περιλαμβάνουν την υψηλή ραπτική από τον Ολλανδό σχεδιαστή, Iris van Herpen, ο οποίος είναι ένας από τους πρωτοπόρους σχεδιαστές μόδας που υιοθετεί τη μέθοδο της προσθετικής παραγωγής στην ένδυση μόδας και το μαύρο πλέγμα του Francis Bitonti που παράγεται από την SLS. Εκτός από τα ενδύματα, η μέθοδος έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ευρέως από σχεδιαστές κοσμημάτων και εταιρείες, χρησιμοποιώντας τόσο άμεσες όσο και έμμεσες μεθόδους. Σε σύγκριση με τα ενδύματα, τα κοσμήματα που κατασκευάζονται άμεσα και έμμεσα με πρόσθετα, έχουν περισσότερες επιλογές υλικού, για παράδειγμα, μέταλλα και πολύτιμα μέταλλα. Στηνεικόνα 3.6 φαίνεται το σχέδιο ενός δαχτυλιδιού σε σύστημα αξόνων.



Εικόνα 3.6: 3D σχέδιο δαχτυλιδιού σε σύστημα αξόνων

(Πηγή: <https://www.turbosquid.com/3d-models/ring-jewelry-3d-model-1410406> 27/10/200)

Η προσθετική παραγωγή στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας κατασκευής κοσμημάτων:

- Βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα
- Μελετώντας τις νέες διαδικασίες κατασκευής
- Ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές ζημιές
- Αυξάνοντας το ρόλο του σχεδιαστή, ως κινητήρα αλλαγής στις μεθόδους κατασκευής
- Εισαγωγή της ελεύθερης μορφής και της εννοιολογικής καινοτομίας
- Ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος για εξατομικευμένο σχεδιασμό κοσμημάτων, εξασφαλίζοντας άμεση σχέση μεταξύ του πελάτη και του κλάδου.

Μία από τις βασικές ιδιότητες των μετάλλων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κοσμημάτων είναι η ολκιμότητα, που σημαίνει τη μεγάλη ικανότητα αποδοχής, διαμόρφωσης και στήριξης μιας σημαντικής παραμόρφωσης χωρίς ρήξη. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα είναι η ανθεκτικότητα, η οποία είναι η ικανότητα του υλικού να υποστηρίξει μια δύναμη και να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση χωρίς να υπάρχει πλαστική παραμόρφωση. Τα μέταλλα και τα κράματα που χρησιμοποιούνται για τα κοσμήματα θα πρέπει ιδανικά να έχουν αυτές τις δύο ιδιότητες, σε συνδυασμό με ένα σχετικά χαμηλό σημείο τήξης, το οποίο είναι απαραίτητο για τη χρήση ορισμένων τεχνικών.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι τα πολύτιμα μέταλλα πρέπει να περιλαμβάνουν αυτά τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία τα διακρίνουν από άλλα μέταλλα:

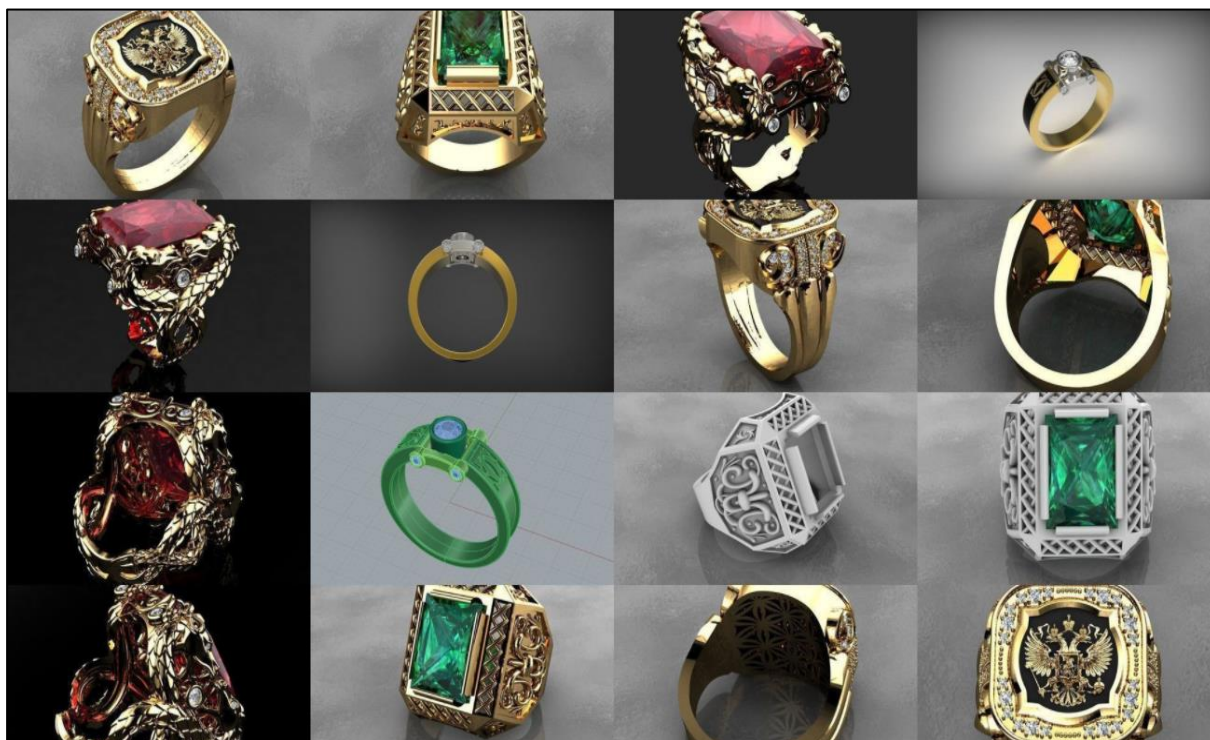
- Φωτεινότητα
- Σπανιότητα
- Ολκιμότητα
- Ανθεκτικότητα
- Σχετικά χαμηλό σημείο τήξεως
- Λιγότερο αντιδραστικά από άλλα μέταλλα

Ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως για τη δημιουργία κοσμημάτων. Παρά το γεγονός ότι είναι δύσκολο να κατεργαστεί, είναι ιδιαίτερα ανθεκτικός στη διάβρωση, λόγω των μεταλλικών συστατικών του όπως το χρώμιο, το νικέλιο, το πυρίτιο και άλλα, με αποτέλεσμα μια παρατεταμένη στιλβωμένη εμφάνιση (Brady, et al., 2002).

Από τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας, υπήρχαν πολύ περισσότεροι από 100 διαφορετικούς εκτυπωτές 3D στο εμπόριο (Gebhardt A., 2012). Σε αντίθεση με τα τυπωμένα

ενδύματα 3D που περιορίζονται επί του παρόντος σε πολυμερή, τα τυπωμένα κοσμήματα 3D θα μπορούσαν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μια ευρύτερη επιλογή υλικού, όπως μέταλλα (ανοξειδωτο ατσάλι, χαλκό και άλλα πολύτιμα μέταλλα όπως ο χρυσός). Τα τελικά μεταλλικά ή πολυμερή μέρη μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας τόσο άμεσες όσο και έμμεσες 3D εκτύπώσεις. Οι άμεσες διεργασίες μετάλλων, οι οποίες λιώνουν επιλεκτικά το μεταλλικό στοιχείο σε σκόνη χρησιμοποιώντας μια πηγή ενέργειας, όπως μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων, είναι σε θέση να κατασκευάσουν τα μεταλλικά μέρη απευθείας.

Παραδείγματα άμεσης επεξεργασίας μετάλλων μέσω της προσθετικής παραγωγής, που είναι χρήσιμα στην κατασκευή κοσμημάτων είναι το SLM<sup>8</sup> και το EBM<sup>9</sup>. Από την άλλη πλευρά, η έμμεση εκτύπωση 3D δεν παράγει τα τελικά μέρη άμεσα. Αντίθετα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή των κύριων προτύπων τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για χύτευση για τα τελικά προϊόντα, ή για την απευθείας παραγωγή των καλουπιών για χύτευση (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 μεγαλύτερες ποσότητες παραγωγής (CheahC. M. 2004). Τα κοσμήματα μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας σχεδόν όλες τις τεχνικές προσθετικής παραγωγής (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Κατασκευασμένα κοσμήματα μέσω της μεθόδου προσθετικής παραγωγής  
(Πηγή: <https://www.cgtrader.com/3d-model-collections/collection-nodels> 27/10/2020)

<sup>8</sup>Η επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM), επίσης γνωστή ως άμεση τήξη λέιζερ μετάλλων (DMLM), ή σύντηξη σκόνης λέιζερ (LPBF), είναι μια τεχνική ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων, εκτύπωσης 3D ή προσθετικής παραγωγής (AM) σχεδιασμένη να χρησιμοποιεί λέιζερ υψηλής ισχύος για τήξη των μεταλλικών σκονών.

<sup>9</sup>Η κατασκευή προσθέτων δέσμης ηλεκτρονίων, ή η τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) είναι ένας τύπος προσθετικής παραγωγής ή τρισδιάστατης εκτύπωσης, για μεταλλικά μέρη. Η πρώτη ύλη (μεταλλική σκόνη ή σύρμα) τοποθετείται υπό κενό και συντήκεται μαζί από τη θέρμανση μέσω δέσμης ηλεκτρονίων. Αυτή η τεχνική διαφέρει από την επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ καθώς η πρώτη ύλη συντήκεται πλήρως

Η τεχνολογία έμμεσης τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιείται συνήθως για την άμεση κατασκευή καλουπιών και πυρήνων για χύτευση με άμμο, χωρίς την ανάγκη φυσικού κύριου μοτίβου. Εναλλακτικά, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πλήρως πυκνών μεταλλικών μερών έμμεσα, αρχικά με την εκτύπωση των συνδετικών πολυμερών στη μεταλλική σκόνη. Στη συνέχεια, έρχεται η τήξη των μορίων του μετάλλου μέσα σε έναν κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας και τελικά η διήθηση του αρχικού υλικού, με ένα δεύτερο μεταλλικό υλικό, όπως ο χαλκός (Gibson I. et al. 2010). Ορισμένες εμπορικές έμμεσες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιομηχανία κοσμημάτων σήμερα είναι η ExOne, η M-Print και η M-Flex. Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν διαδικασίες κατάλληλες για την παραγωγή των πλήρως πυκνών μεταλλικών εξαρτημάτων μετά τη διήθηση.

Οι πρόσθετες διαδικασίες σχεδιασμού είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή τρισδιάστατων ενδυμάτων μόδας και κοσμημάτων κατά το στάδιο του σχεδιασμού για να διασφαλιστεί η δυνατότητα εκτύπωσης των αρχείων σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Κατά τη φάση σχεδιασμού, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη διάφορες πτυχές όσον αφορά τη συλλογή δεδομένων, τα εργαλεία σχεδιασμού και μοντελοποίησης και τον περιορισμό του μεγέθους, που περιλαμβάνει την τμηματοποίηση των διαδικασιών σχεδιασμού και της χειροκίνητης συναρμολόγησης.

Το μέγεθος των τρισδιάστατων τυπωμένων κοσμημάτων μπορεί να ελεγχθεί εύκολα κατά τη φάση του σχεδιασμού. Οι σχεδιαστές μπορούν να παράγουν το μοντέλο 3D CAD και να καθορίσουν ή να τροποποιήσουν τις διαστάσεις, ανάλογα με τους μεμονωμένους πελάτες, χρησιμοποιώντας το λογισμικό μοντελοποίησης CAD.

Σε σύγκριση με τα ενδύματα, τα τρισδιάστατα τυπωμένα κοσμήματα έχουν αποκτήσει υψηλότερο επίπεδο αποδοχής από πελάτες, σχεδιαστές και κατασκευαστές στη βιομηχανία μόδας. Αυτό αποδίδεται κυρίως στα υλικά που είναι διαθέσιμα σήμερα και είναι κατάλληλα για την εφαρμογή. Όπως αναφέρθηκε, τα κοσμήματα μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας σχεδόν οποιοδήποτε υλικό και πολλές άμεσες και έμμεσες τεχνικές που μπορούν να υιοθετηθούν, ενώ για παράδειγμα τα τρισδιάστατα τυπωμένα ενδύματα εξακολουθούν να περιορίζονται στη χρήση πολυμερών.

Υπάρχει επίσης ένας αριθμός τρισδιάστατων εκτυπωτών που καλύπτουν συγκεκριμένα την κατασκευή κοσμημάτων, προσφέροντας στους κατασκευαστές και τους σχεδιαστές κοσμημάτων μια ευρύτερη επιλογή συστημάτων και υλικών για να διαλέξουν. Ομοίως, οι διαδικτυακοί πάροχοι υπηρεσιών εκτύπωσης 3D προσφέρουν επίσης μια βολική πλατφόρμα για τους πελάτες, ώστε να δημιουργούν τα μικρά τους σχέδια κοσμημάτων με ένα ευρύ φάσμα υλικών.

### **3.2.6 Αυτοκινητοβιομηχανία**

Μια εναλλακτική προσέγγιση σε έναν τεράστιο εκτυπωτή είναι μια σειρά εκτυπωτών βιομηχανικού μεγέθους, που μπορούν να παράγουν εξαρτήματα ενός αντικειμένου. Στη συνέχεια, αυτά μπορούν να συναρμολογηθούν για να φτιάξουν σαν σύνολο, κάτι μεγαλύτερο από τη χωρητικότητα ενός μεμονωμένου εκτυπωτή. Η RedEye, διαθέτει μια εγκατάσταση εκτύπωσης που είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Αποτελείται από 150 3D εκτυπωτές που μπορούν να εκτυπώσουν αντικείμενα κατά παραγγελία για τους πελάτες της. Συνεργαζόμενοι με την Lockheed Martin Space Systems, η ομάδα Lockheed - RedEye 3D εκτύπωσε δύο δεξαμενές καυσίμων για ένα έργο προσομοίωσης δορυφόρων για τη NASA.

Χρησιμοποιώντας εκτυπωτές FDM, χρειάστηκαν δύο εβδομάδες για την τρισδιάστατη εκτύπωση των δεξαμενών καυσίμου και 240 ώρες για να ολοκληρωθεί η τελική συναρμολόγηση. Η μεγαλύτερη από τις δύο δεξαμενές έχει μήκος 4.5 m. Δέκα διαφορετικά κομμάτια απαιτήθηκαν για τη μεγάλη δεξαμενή και έξι για τη μικρότερη χρησιμοποιώντας ένα πολυανθρακικό υλικό (SharmaB. 2016).

Τα ακροφύσια είναι σχετικά απλά εξαρτήματα. Αποτελούν ειδικά διαμορφωμένους σωλήνες, μέσω των οποίων ρέουν καυτά αέρια (Εικόνα 3.8). Όλοι οι κινητήρες τζετ, καθώς και οι κινητήρες αυτοκινήτων χρησιμοποιούν ακροφύσια για την παραγωγή ώθησης, την εξαγωγή καυσαερίων έξω από το ακροφύσιο και για τη χρήση του καυσίμου μέσα στον κινητήρα. Τα ακροφύσια διατίθενται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη ανάλογα με τη χρήση τους στο αντίστοιχο μέσο. Οι πυραυλοκινητήρες χρησιμοποιούν επίσης ακροφύσια για να επιταχύνουν την καυτή εξάτμιση ώστε να παράξουν ώθηση.



Εικόνα 3.2.68: Ακροφύσια διαφόρων τύπων  
(Πηγή: <http://www.pnr.eu/prodotti/general-purpose-nozzles/> 25/9/2020)

Η GE Aviation χρησιμοποίησε την τρισδιάστατη εκτύπωση και την εγκατέστησε στο πρώτο εργοστάσιο στον κόσμο που χρησιμοποίησε την χρησιμοποίησε, με σκοπό την κατασκευή ακροφυσίων καυσίμου για τους κινητήρες των τζετ.

Τα ακροφύσια καυσίμου LEAP είναι 5 φορές πιο ανθεκτικά από τα προηγούμενα μοντέλα. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επέτρεψε στους μηχανικούς της GE Aviation να τα σχεδιάσουν ως ένα ενιαίο κομμάτι και όχι ως 20 μεμονωμένα εξαρτήματα που απαιτούνται από τις συμβατικές τεχνικές κατασκευής. Η χρήση της προσθετικής παραγωγής επέτρεψε επίσης στους μηχανικούς να επανασχεδιάσουν την περίπλοκη εσωτερική δομή που απαιτείται για αυτό το κρίσιμο μέρος, καθιστώντας το, τόσο ελαφρύτερο από πριν, όσο και πιο



αποτελεσματικό. Η GE αναπτύσσει επίσης τρισδιάστατα τυπωμένα εξαρτήματα για τον κινητήρα GE9X.

Η Ford χρησιμοποίησε τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ, καθώς και χύτευσης άμμου στην ανάπτυξη στηρίζων του ρότορα, για τα περιβλήματα του κιβωτίου ταχυτήτων και για τα περιβλήματα των αποσβεστήρων και των τελικών καλυμμάτων για τα υβρίδια C-Max και Fusion (Murray C., 2013). Αυτή η τεχνολογία έχει επίσης εφαρμοστεί για την κατασκευή τετρακύλινδρων κινητήρων ECOBoost, φρένων Ford Explorer και εξαρτημάτων της πολλαπλής εισαγωγής F-150. Αξιοσημείωτη είναι η στενή σχέση μεταξύ της έρευνας και ανάπτυξης της Ford και του τρισδιάστατου εργοστασίου της. Τα αρχεία CAD αποστέλλονται συχνά από το ένα στο άλλο και αντίστροφα, έτσι ώστε ένα σχέδιο για ένα πρωτότυπο να μπορεί να κατασκευαστεί ως φυσικό μοντέλο, να εξεταστεί, να τροποποιηθεί ανάλογα με τις ανάγκες και στη συνέχεια, να επιστραφεί για τη ρύθμιση του μοντέλου CAD.

Οι μηχανικοί βρίσκουν συνεχώς πρακτικές εφαρμογές για την τεχνολογία εκτύπωσης 3D. Ένα παράδειγμα, που αναφέρεται στο The Economist (2012), ασχολείται με τη φυσική αρχή ότι «... τα υγρά ρέουν πιο αποτελεσματικά μέσω στρογγυλεμένων καναλιών σε σχέση με τις αιχμηρές γωνίες, αλλά είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθούν τέτοια κανάλια μέσα σε μια στερεή μεταλλική δομή με συμβατικά μέσα, ενώ ένας εκτυπωτής 3D μπορεί να το κάνει εύκολα».

Η 3T RPD, μια βρετανική εταιρεία που προσφέρει υπηρεσίες προσθετικής παραγωγής, εκτύπωσε ένα κιβώτιο ταχυτήτων για ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο με ομαλές εσωτερικές διαδρομές για να ρέει το υδραυλικό λάδι αντί για διάτρητες στροφές. Το κουτί όχι μόνο επιτρέπει ταχύτερες αλλαγές ταχυτήτων, αλλά είναι περίπου 30% ελαφρύτερο, αναφέρει ο Ian Halliday, διευθύνων σύμβουλος της εταιρείας. Ένα μαχητικό Boeing F-18 από την άλλη, περιέχει έναν αριθμό τυπωμένων μερών όπως αεραγωγούς, για παρόμοιους λόγους.

### 3.2.7 Οικιακές εφαρμογές

Οι μελέτες την τελευταία δεκαετία δείχνουν ότι η τεχνολογία εκτύπωσης 3D είναι επικερδής στη χρήση της από τους μέσους καταναλωτές. Η μελέτη των Wittbrodt B. et al. (2013), δικαιολογεί την αγορά 500 \$ για συστατικά ενός RepRap<sup>10</sup>. Ωστόσο, δεδαιχθέν ολοι οι καταναλωτές τεχνικά εξελιγμένες γνώσεις και δεξιότητες για να μπορούν να κατασκευάσουν μια τόσο περίπλοκη μηχανολογική τεχνολογία, οπότε μια δεύτερη μελέτη των Petersen E. & Pearce J. (2017) εξέτασε τη χρήση ενός πλήρως συναρμολογημένου τρισδιάστατου εκτυπωτή ανοιχτού κώδικα (Lulzbot Mini, ο οποίος πωλείται στα 1250 \$).

Το κόστος της εκτύπωσης 26 δωρεάν σχεδίων συγκρίθηκε με την αγορά εμπορικών ισοδύναμων και μέσω της μελέτης διαπιστώθηκε, ότι οι καταναλωτές θα κέρδιζαν σχεδόν 1000% απόδοση της επένδυσης (ROI) από την αγορά ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή, με διάρκεια ζωής πέντε ετών, εκτυπώνοντας μόνο ένα προϊόν την εβδομάδα. Επιπλέον, προέκυψε ότι οι καταναλωτές είχαν ήδη ξεπεράσει τα 4 εκατομμύρια δολάρια σε αγορές μόνο

<sup>10</sup> Το RepRap είναι η πρώτη αυτοαντιγραφόμενη μηχανή παραγωγής γενικής χρήσης. Το RepRap λαμβάνει τη μορφή ενός δωρεάν επιτραπέζιου εκτυπωτή 3D με δυνατότητα εκτύπωσης πλαστικών αντικειμένων. Δεδομένου ότι πολλά μέρη του RepRap είναι κατασκευασμένα από πλαστικό και το RepRap εκτυπώνει αυτά τα μέρη, το RepRap αναπαράγεται αυτόματα δημιουργώντας ένα κιτ από μόνο του (ένα κιτ που μπορεί να συναρμολογήσει ο καθένας δεδομένου χρόνου και υλικών).

από αυτά τα τυχαία 26 προϊόντα, κάτι που δείχνει ότι καθώς η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών στο σπίτι γίνεται πιο διαδεδομένη, η καταναλωμένη κατασκευή με σχέδια ανοιχτού κώδικα, θα μπορούσε να αρχίσει να έχει σημαντική μακροοικονομική επίπτωση.

Στις αρχές της δεκαετίας υπήρχε γενικότερα σημαντικός σκεπτικισμός αυτού του δυναμικού των 3D εκτυπωτών (Kelleher K., 2015), καθώς ο Διευθύνων Σύμβουλος της Foxconn είχε αναφερθεί στους τρισδιάστατους εκτυπωτές ως «τέχνασμα» (Bilton R., 2013) και δημοφιλείς αναπαραστάσεις τρισδιάστατων εκτυπωτών χρησιμοποιούνται μόνο για παιχνίδια στο σπίτι. Ακόμα και με αυτή την άποψη ωστόσο, η αγορά παιχνιδιών είναι σημαντική και δεν απορρίπτεται τόσο εύκολα, με τις μέσες δαπάνες των ΗΠΑ ανά παιδί στα παιχνίδια να ήταν 371 \$ / έτος, με αποτέλεσμα μια αγορά άνω των 10 δισεκατομμυρίων δολαρίων / έτος (Brandongaille, 2013). Το 2016, η υπηρεσία παρακολούθησης της λιανικής του Ομίλου NPD σημείωσε ότι η αγορά παιχνιδιών των ΗΠΑ είχε αυξηθεί στα 20,36 δισεκατομμύρια δολάρια (Toy Association, 2017).

Για να διερευνήσει τον πιθανό οικονομικό αντίκτυπο της οικιακής χρήσης της τεχνολογίας εκτύπωσης 3D, σε αυτή τη μελέτη διερευνάται στενά η χρήση ενός δημοφιλούς δωρεάν ιστότοπου (MyMiniFactory) από τους καταναλωτές για τα εκτυπώσιμα προϊόντα 3D. Μια οικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε από την οπτική γωνία των χρηστών που παράγουν παιχνίδια για τον εαυτό τους, στα σπίτια τους. Συγκεκριμένα, η οικονομική πλευρά των κορυφαίων 100 πιο δημοφιλών σχεδίων, όπως υποδεικνύεται από λήψεις (όχι προβολές) στο MyMiniFactory, ποσοτικοποιείται για τον Ιανουάριο του 2017. Αυτές οι αναλύσεις ποσοτικοποιούνται, χρησιμοποιώντας την τεμαχισμένη μάζα από ελάσματα και την κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος ενός εκτυπωτή Lulzbot Mini 3D, των ΗΠΑ. Αξιολογείται επίσης ο τύπος προϊόντος και πραγματοποιούνται τρεις λεπτομερείς μελέτες περιπτώσεων. Πρώτον, έξι κοινά παιχνίδια με ισοδύναμα προϊόντα αξιολογούνται λεπτομερώς για τη λειτουργικότητα και την αξία τους.

Στη συνέχεια, καθώς η Lego κυριάρχησε στην αγορά παιχνιδιών (LEGO, 2014), διεξήχθη οικονομική αξιολόγηση για τη χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών μόνο μεταξύ των συμβατών εργοστασίων της Lego. Τέλος, το κόστος και η προσαρμοστικότητα αξιολογήθηκαν για ένα επιτραπέζιο παιχνίδι ανοιχτού κώδικα. Συνολικά, τα αποτελέσματα συζητήθηκαν στο κείμενο για τον κλάδο παραγωγής των καταναλωτικών σπιτιών και της οικονομίας της παραγωγής «κάν'το μόνος σου» (DIY).

Καθώς η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει μετατοπιστεί από τα ταχεία πρωτότυπα στη βιομηχανία και στην παραγωγή, η έρευνα έδειξε ότι η κατασκευή DIY στο σπίτι θα μπορούσε εύκολα να δικαιολογήσει το κόστος κεφαλαίου ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή με καταναλωτικά είδη. Επίσης φαίνεται ότι ακόμη και όταν ένας οικιακός εκτυπωτής επικεντρώνεται στην παραγωγή μόνο των παιχνιδιών, είναι σαφές ότι οι καταναλωτές μπορούν να παράγουν αντικείμενα υψηλότερης αξίας με λιγότερα χρήματα από ό, τι διατίθεται σήμερα στο εμπόριο. Πρέπει να επισημανθεί εδώ ότι αυτά τα συμπεράσματα είναι γενικά συντηρητικά, καθώς αυτή η μελέτη επικεντρώθηκε μόνο σε σχετικά απλά παιχνίδια ή παιχνίδια που απαιτούσαν ελάχιστη συναρμολόγηση. Η σύζευξη ηλεκτρονικών συσκευών ανοιχτού κώδικα με τρισδιάστατα τυπωμένα παιχνίδια επιτρέπει να παράγονται στο σπίτι πολύ πιο εξελιγμένα παιχνίδια με υψηλότερες τιμές.

Ένας τομέας όπου αυτή η μελέτη δεν ήταν συντηρητική ήταν η εκτίμηση των αποτυχημένων απορριμμάτων εκτύπωσης. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι αυτό συμβαίνει μόνο στις πρώτες εκτυπώσεις από έναν άπειρο χρήστη σε έναν πολύ λιγότερο εξελιγμένο RepRap από

ό,τι διατίθεται σήμερα για κατασκευή σε σχέση με κάποια αγορά ενός συναρμολογημένου παιχνιδιού ή σε μορφή kit. Η μελλοντική εργασία θα μπορούσε να παρέχει μια πιο ισχυρή εκτίμηση των ποσοστών αστοχίας της εκτύπωσης, μελετώντας μια μεγάλη ομάδα χρηστών που κατέχουν οικιακούς εκτυπωτές 3D.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση δίνει στους καταναλωτές τη μοναδική δυνατότητα να κατασκευάζουν σχετικά εύκολα προϊόντα μόνο για τους εαυτούς τους, γεγονός που μπορεί να διαταράξει την κατασκευή σε ένα ευρύ φάσμα αγορών (Petrick I.J. & Simpson T.W., 2013). ORifkin J. (2014) υποστήριξε ότι η κατανομημένη κατασκευή με τρισδιάστατους εκτυπωτές μπορεί να οδηγήσει σε μια κοινωνία μηδενικού οριακού κόστους. Υπήρξαν ορισμένες μελέτες που κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση θα συνέχιζε να έχει αυξημένο αντίκτυπο στην κοινωνία (Thiess F.etal., 2015), τόσο στον ανεπτυγμένο όσο και στον αναπτυσσόμενο κόσμο (Pearce J.M., 2015). Είναι σαφές ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα ταχέως αναδύομενα επιχειρηματικά μοντέλα που βασίζονται σε υλικό ανοιχτού κώδικα (Pearce, J.M., 2017) και στην ανοιχτή καινοτομία. Τα μελλοντικά σχέδια ανοιχτού κώδικα παιχνιδιών μπορούν επίσης να αρχίσουν να εκμεταλλεύονται την εκτύπωση (Saengchairat N. etal., 2017), τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του σπιτιού (Anzalone G.C., 2015), τα πολυϋλικά και τα έξυπνα υλικά εκτύπωσης 4D (Khoo Z.X., 2015) για να αυξήσουν την πολυπλοκότητα και τη δυνατότητα παιχνιδιού. Καθώς η πολυπλοκότητα αυξάνεται, θα χρειαστούν συγκεκριμένες μέθοδοι για να διασφαλιστεί ότι τέτοια οικιακά παιχνίδια πληρούν τα γνωστά πρότυπα.

Απαιτείται μελλοντική εργασία και στους δύο τεχνικούς τομείς για να συνεχιστεί η μείωση του κόστους και η βελτίωση της αξιοπιστίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών ανοιχτού κώδικα, καθώς και η επέκταση της οικονομικής ανάλυσης. Η μελλοντική εργασία μπορεί να ανιχνεύσει τον χρόνο που απαιτείται για το σχεδιασμό των παιχνιδιών χρησιμοποιώντας λογισμικό ανοιχτού κώδικα για τον προσδιορισμό των ROI για τους σχεδιαστές. Επιπλέον, μπορούν να ληφθούν πιο αναλυτικές τιμές κάνοντας μια ανάλυση στο χρόνο του χρήστη του εκτυπωτή 3D για τη ρύθμιση μιας εκτύπωσης και τη συνήθη συντήρησή του (καθώς και σχετικές δαπάνες). Απαιτείται επίσης μελλοντική εργασία για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αξίας για τον καταναλωτή καθώς δημιουργεί τα δικά του παιχνίδια.

Τέλος, απαιτείται περαιτέρω εργασία για την αντιμετώπιση της ποιότητας της ανακύκλωσης του πλαστικού. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση μπορεί να βρεθεί για μια κατανομημένη οικιακή κατασκευή και για προϊόντα που χρησιμοποιούν ανακυκλωμένο πλαστικό απόβλητο. Ωστόσο, κάθε φορά που ένα θερμοπλαστικό ανακυκλώνεται, οι μηχανικές ιδιότητές του υποβαθμίζονται. Οι Cruz et al. (2015) διερεύνησαν τον αντίκτυπο αυτού του φαινομένου στην εκτύπωση 3D ανοιχτού κώδικα, αλλά απαιτείται περισσότερη έρευνα στην περιοχή αυτή σε σχέση με την πλήρη σειρά των πολυμερών που χρησιμοποιούνται γενικότερα.

Με τόσο τη συνεχιζόμενη μείωση του κόστους των 3D εκτυπωτών ανοιχτού κώδικα όσο και του τρισδιάστατου εκτυπωτή, καθώς και την αύξηση του αριθμού και της ποιότητας των δωρεάν σχεδίων, φαίνεται σαφές ότι η κατασκευή DIY για τους καταναλωτές στο σπίτι (Rayna T. & Striukova L., 2016) αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στις αγορές παιχνιδιών στο μέλλον.

### 3.2.8 Εκτύπωση τροφίμων

Τα τρόφιμα εξελίσσονται γρήγορα. Επομένως, όλοι οι επαγγελματίες στον τομέα της παραγωγής τροφίμων πρέπει να παρακολουθήσουν τις τελευταίες τάσεις, τις βέλτιστες

πρακτικές και τα εργαλεία για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Η εξατομίκευση έχει χαρακτηριστεί ως κινητήρια δύναμη για να διαταράξει τους παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής και παράδοσης φαγητού. Η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων (3DFP) συνδέεται συνεχώς ως μια πιθανή εναλλακτική λύση για την επίτευξη της εξατομίκευσης και γοητεύει μια ποικιλία πελατών. Θα πρέπει, ωστόσο, να θυμάται κανείς ποιος είναι ο τύπος εξατομίκευσης που απαιτείται από κάθε πληθυσμό.

Το πιο σημαντικό είναι ότι η έρευνα στο 3DFP (Εικόνα 3.9) δεν έχει σκοπό να αλλάξει τον τρόπο κατανάλωσης τροφής. Στο 3DFP με βάση την εξώθηση, για παράδειγμα, το εκτυπώσιμο φαγητό θα πρέπει να παρουσιάζει συνεκτικότητα σαν πάστα και συγκεκριμένα, συνιστάται η εκτύπωση ζύμης, πουρέ λαχανικών ή κρέατος και ζαχαροπλαστικής. Στο 3DFP με βάση τη σκόνη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρόφιμα σε σκόνη όπως η ζάχαρη και η σοκολάτα. Ως εκ τούτου, η κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη της εμπειρογνομosύνης στο 3DFP βασίζεται στην εύρεση της ιδανικής εφαρμογής η οποία, με τη σειρά της, εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών των τροφίμων.



*Εικόνα 3.9: 3D εκτύπωση ζαχαροπλαστικών προϊόντων*

(Πηγή: <https://www.qimtek.co.uk/blog/shape-food-come-how-3d-printing-changing-food-industry> 5/11/2020)

Για παράδειγμα, η μοντελοποίηση απόθεσης τήξης (FDM, η πιο κοινή τεχνική για 3DFP) χρησιμοποιείται συνεχώς ως εναλλακτική λύση για την αντικατάσταση των διαδικασιών χύτευσης των υλικών πάστας. Η αποτελεσματική αντικατάσταση των μεθόδων χύτευσης από το FDM θα συμβεί μόνο σε εφαρμογές όπου το σύνολο των υγρών ή των ημιστερεών τροφίμων σε καλούπι δεν καλύπτει τις βασικές ανάγκες των καταναλωτών, όπως:

- Ο σχεδιασμός των εσωτερικών κατασκευών: αυτό το χαρακτηριστικό δεν μπορεί να επιτευχθεί με τις συμβατικές μεθόδους χύτευσης που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση των τροφίμων. Ωστόσο, από το 3DFP, η εσωτερική δομή του αντικειμένου του τροφίμου μπορεί να προσαρμοστεί με

ποσοστά (μέσω της εξώθησης από ένα ακροφυσίο) και μέσω παραλλαγών του διατροφικού προγράμματος στη δομή του πυρήνα (απαιτούνται βέβαια περισσότερα από ένα ακροφύσια).

- Η ενθυλάκωση προβιοτικών, βιταμινών και θρεπτικών συστατικών μέσω της συνεξώθησης 3DF.
- Η ανάμιξη των πρόσφατων φρέσκων συστατικών για τη διασφάλιση της ιδανικής υφής.

Τα περισσότερα από τα παραδείγματα που αναφέρονται παραπάνω πληρούν την ανάγκη ενός πληθυσμού, καθώς η εφαρμογή της τεχνολογίας 3DP για υλικά τροφίμων βασίζεται στα ακόλουθα σημεία:

- Υλικό: Επιλογή υλικού και βαθιά κατανόηση των φυσικών-χημικών και ρεολογικών ιδιοτήτων του.
- Τεχνική 3DP: Η επιλογή της τεχνικής 3DP βασίζεται στις ιδιότητες των υλικών, στις δυνατότητες εφαρμογής και μετά την επεξεργασία.
- Σχεδιασμός 3D και σχεδιασμός διαδρομής: Το περιεχόμενο 3D είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ως πρώτο βήμα υλοποίησης του 3DP. Διατίθεται μεγάλη ποικιλία λογισμικού, από αρχάριους έως και προχωρημένους, για να σχεδιαστεί κατασκευή που θα εκτυπωθεί (π.χ. SketchUp, Tinkercad και OnShape). Στη συνέχεια, ο σχεδιασμός μετατρέπεται σε .stl αρχείο μέσω της χρήσης λογισμικού τεμαχισμού (π.χ. Cura, Repetier και Simplify3D). Επιπλέον, δημιουργείται οκώδικας G με τις απαραίτητες εντολές για την καθοδήγηση της κεφαλής εκτύπωσης σε προκαθορισμένες συνθήκες ταχύτητας, ροής και θερμοκρασίας. Αυτό είναι ένα σημαντικό βήμα, αφού η επιτυχημένη εκτύπωση σχετίζεται στενά με την επιλογή του σχεδιασμού διαδρομής για το σχέδιο.
- Αξιολόγηση των παραμέτρων εκτύπωσης και της ποιότητας του τυπωμένου αντικειμένου: Οι παράμετροι εκτύπωσης και η ποιότητα του έντυπου υλικού μπορούν να εκτιμηθούν ως προς την ευκρίνεια του σχήματος (σε σύγκριση με τον αρχικό σχεδιασμό) και τις μηχανικές ιδιότητες.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ποιότητα και η ακρίβεια των τυπωμένων αντικειμένων εξαρτώνται από τις ιδιότητες των υλικών και τους παράγοντες επεξεργασίας. Κάθε τρισδιάστατη τεχνική εκτύπωσης τροφίμων έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

Η εκτύπωση βασισμένη στην εξώθηση για παράδειγμα, έχει εφαρμοστεί ευρέως για τη δημιουργία προσαρμοσμένων προϊόντων σοκολάτας 3D (Mantihal et al., 2017). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης, το λιωμένο ημιστερέο πολυμερές τροφίμων εξωθείται από μια κινητή κεφαλή εκτύπωσης και στερεώνεται και συγκολλάται στα προηγούμενα στρώματα σχεδόν αμέσως μετά την εξώθηση.

Κατά την τήξη της εξώθησης της σοκολάτας, η κατανόηση των ιδιοτήτων της σοκολάτας είναι κρίσιμη για την ποιότητα των τυπωμένων αντικειμένων λόγω των σύνθετων

χαρακτηριστικών και έξι διαφορετικών κρυσταλλικών φάσεων του βουτύρου κακάο (Marangoni &McGaughey, 2003). Το μελάνι σοκολάτας θα πρέπει να μπορεί να διατηρεί τη δομή του κατά τη διάρκεια και μετά τη διαδικασία εναπόθεσης στρώματος προς το υπόλοιπο στρώμα. Αυτή η «αυτο-υποστηριζόμενη» ικανότητα βασίζεται σε θερμικές ιδιότητες όπως η θερμοκρασία μετάβασης ( $T_g$ ) και το σημείο τήξεως, το οποίο είναι κρίσιμο στη διαδικασία στερεοποίησης μετά την απόθεση του αποτιθέμενου στρώματος.

Η εκτύπωση τήξης της σοκολάτας τον πρώτο καιρό πραγματοποιούνταν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα Fab@home<sup>11</sup>.

Έχουν διερευνηθεί αρκετοί παράγοντες επεξεργασίας όπως η θερμοκρασία και ο ρυθμός εξώθησης που επηρεάζουν την ακρίβεια της εκτύπωσης κατά την κατασκευή σοκολάτας (Hao et al., 2010). Η εκτύπωση μέσω της εξώθησης της σοκολάτας έχει διατεθεί στο εμπόριο από τους ChocCreatorChocEdge, το ChefJet του 3D System, το Hershey's CocoJet και το Chocabyte (Zhuo, 2015). Ένας εκτυπωτής με βάση την εξώθηση τήξης έχει δημιουργηθεί από την Natural Machines για χρήση επίσης, σε εκτύπωση σοκολάτας (Galdeano, 2015). Ερευνητές από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης χρησιμοποίησαν τη λιωμένη σοκολάτα ως υγρό διανομής και ανέπτυξαν έναν εκτυπωτή με το όνομα «Digital Chocolatier» (Zoran & Coelho, 2011). Οι Mantihal et al. (2017) διερεύνησαν τη συσχέτιση της τρισδιάστατης συμπεριφοράς της εκτύπωσης σοκολάτας με θερμικές ιδιότητες και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή των 32 C έδειξε την καλύτερη απόδοση.

### 3.3 Κόστος

Η προσθετική παραγωγή έχει συλλάβει τη φαντασία πολλών παρατηρητών τεχνολογίας και επαγγελματιών του κλάδου. Η τεχνολογία έχει προωθηθεί ευρέως ως μέσο επανεξέτασης του σχεδιασμού, της ψηφιοποίησης της παραγωγής, της παραγωγής στη ζήτηση και της προσαρμογής των προϊόντων. Ενώ οι τεχνολογικές ικανότητες των συστημάτων προσθετικής παραγωγής έχουν συζητηθεί ευρέως, εξακολουθεί να μην υπάρχει λεπτομερής κατανόηση των βασικών μεταβλητών που υποστηρίζουν την επιχειρηματική περίπτωση της προσθετικής παραγωγής. Υπάρχει ανάγκη λοιπόν, για την ανάπτυξη ενός μοντέλου συνολικού κόστους των λειτουργιών της προσθετικής παραγωγής, ως μια θεμελιώδη πρόδρομος διαδικασία, για τον καθορισμό βιώσιμων επιχειρηματικών περιπτώσεων για νέες, καθώς και αναδιανεμημένες, κατασκευαστικές εφαρμογές.

Οι διαδικασίες προσθετικής παραγωγής συνδέονται γενικά με δύο πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών τεχνικών κατασκευής. Πρώτον, αποφεύγουν πολλούς από τους περιορισμούς που σχετίζονται με τα εργαλεία και τις γεωμετρίες που μπορούν να επιτευχθούν μέσω των συμβατικών μεθόδων κατασκευής. Δεύτερον, επιτρέπουν την αποτελεσματική δημιουργία προϊόντων σε πολύ χαμηλούς όγκους, σε μία μόνο μονάδα, επιτρέποντας την κατασκευή εξατομικευμένων ή εξαιρετικά διαφοροποιημένων προϊόντων.

Οι τεχνολογικές ευκαιρίες που παρουσιάζει η προσθετική παραγωγή δεν αμφισβητούνται. Ωστόσο, δεν υπάρχει ακόμη μια θεμελιώδη κατανόηση των οικονομικών που υποστηρίζουν την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, η οποία αποτελεί θεμελιώδη πρόδρομο για την ανάπτυξη μιας επιχειρηματικής υπόθεσης για την εφαρμογή της. Συχνά, υποστηρίζεται ότι τα

<sup>11</sup>Ο Fab@Home ήταν ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής πολλαπλών υλικών που ήταν διαθέσιμος στο κοινό και ένας από τους δύο πρώτους εκτυπωτές 3D ανοιχτού κώδικα DIY στον κόσμο, σε μια εποχή που όλες οι άλλες μηχανές προσθετικής παραγωγής ήταν ακόμα ιδιόκτητες. Το Fab@Home και το RepRap πιστώνονται για την προαγωγή της επανάστασης του 3D Printing προς τους καταναλωτές.

γενικά πλεονεκτήματα που συνδέονται με την προσθετική παραγωγή, θα οδηγήσουν σε ακμάζουσα καινοτομία στην εφοδιαστική αλυσίδα, προκαλώντας το υφιστάμενο παράδειγμα της κεντρικής μαζικής παραγωγής. Ωστόσο, η επιτυχής και ουσιαστική υιοθέτηση της προσθετικής παραγωγής θα εξαρτηθεί από μια ευνοϊκή επιχειρηματική περίπτωση της οποίας, επί του παρόντος, βασικές πτυχές δεν μετριοούνται και κατανοούνται πλήρως. Ως κεντρικό στοιχείο για την επιχειρηματική υπόθεση προς την υιοθέτηση της προσθετικής παραγωγής, οι υπάρχουσες προσεγγίσεις κοστολόγησης έχουν επικεντρωθεί σε μεγάλο βαθμό σε επενδύσεις κεφαλαίου και αναλώσιμα, με έμφαση στα δομικά υλικά.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι αναλύσεις τέτοιων «καλά δομημένων δαπανών» με τη χρήση της διαθέσιμης χωρητικότητας του μηχανήματος αποτελεί προϋπόθεση για αποτελεσματικές λειτουργίες. Αυτή είναι επίσης, μια βασική αρχή της παραδοσιακής κατασκευής, η οποία αποσκοπεί στην επίτευξη οικονομιών κλίμακας και ως αποτέλεσμα, οδήγησε στο σχηματισμό παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού σε πολλές βιομηχανίες. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την προσθετική παραγωγή, όπου ο υποκείμενος λόγος για τις διαφορετικές απαιτήσεις για πλήρη χρήση είναι ότι η τεχνολογία είναι εγγενώς παράλληλη, επιτρέποντας τη σύγχρονη εναπόθεση πολλαπλών γεωμετριών. Επιπλέον, οι υπάρχουσες αναλύσεις της κατανάλωσης πόρων αγνοούν σε μεγάλο βαθμό το κρυφό ή το λεγόμενο «μη δομημένο» κόστος που σχετίζεται με την αποτυχία της κατασκευής, την απόρριψη κάποιου μέρους της και τις βοηθητικές χειροκίνητες διαδικασίες, όπως η αφαίρεση της υποστήριξης και η τελική επεξεργασία. Αυτή η παράλειψη έρχεται σε βάρος της βιομηχανικής εφαρμογής, οδηγώντας επίσης στην έλλειψη ρεαλιστικών εργαλείων λήψης αποφάσεων για την υποστήριξη της υιοθέτησης της τεχνολογίας, τα οποία αποτελούν ουσιαστική προϋπόθεση για την επιτυχή διάδοση.

Η έρευνα έχει δείξει ότι οι τεχνολογικές καινοτομίες επηρεάζουν τις επιχειρήσεις και τη δομή της αγοράς (KhannaT., 1995). Συγκεκριμένα, τα ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS) είχαν μεγάλες επιπτώσεις στους κατασκευαστές και στη δομή της αγοράς (WomackJ. P. et al., 1991) επειδή έχουν την ικανότητα να παράγουν εύκολα μια ποικιλία διαφορετικών ανταλλακτικών, χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους της κατασκευής. Η έρευνα επιπλέον έχει δείξει τις δυνατότητες της τεχνολογίας της προσθετικής παραγωγής, να πυροδοτήσει δυνητικά μια νέα βιομηχανική επανάσταση επεκτείνοντας τα χαρακτηριστικά της συμβατικής τεχνολογίας FMS (AndersonC., 2012).

Ως βασικό πλεονέκτημα όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τεχνολογία προσθετικής παραγωγής επιτρέπει την ευέλικτη παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων χωρίς κυρώσεις κόστους, χρησιμοποιώντας άμεσες ψηφιακές διαδικασίες παραγωγής που μετασχηματίζουν άμεσα τα δεδομένα 3D σε φυσικά μέρη. Η τεχνολογία αυτή επηρεάζει το κόστος της ευελιξίας, το κόστος του κεφαλαίου και το οριακό κόστος παραγωγής σε μεγάλο βαθμό (BermanB., 2012). Η τεχνολογία αυτή επίσης, μπορεί να επεκτείνει τις δυνατότητες των συμβατικών FMS. Παρ' όλα αυτά, οι αποφάσεις επιλογής και επένδυσης παραμένουν στο επίπεδο μιας στρατηγικής ανάλυσης (Mellor et al., 2014). Από τη μία πλευρά, η προσθετική παραγωγή προσφέρει οφέλη σχετικά με την υψηλή ευελιξία της κατασκευής και το χαμηλό κόστος εξατομικευσης, ενώ από την άλλη πλευρά, έχει ορισμένους περιορισμούς (π.χ. διαθέσιμα υλικά, ταχύτητα παραγωγής, φινίρισμα επιφάνειας κ.λπ.). Επομένως, το συγκεκριμένο πλαίσιο μιας κατασκευαστικής εταιρείας πρέπει να αξιολογηθεί πριν τελικά κριθεί το σκεπτικό των πιθανών επενδύσεων στην τεχνολογία προσθετικής παραγωγής. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή επηρεάζει τη διάρθρωση της αγοράς πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις στις διαδικασίες παραγωγής μιας εταιρείας.

Υπάρχει μια αυξανόμενη κοινότητα "Makers" που μοιράζεται τρισδιάστατα μοντέλα, παρέχει κιτ αυτοσυναρμολόγησης για οικιακούς εκτυπωτές 3D, πουλάει εκτυπωμένα προϊόντα 3D σε αγορές και προσφέρει ακόμη και τους πόρους εκτύπωσης 3D (Lipson H. & Kurman M., 2013). Επιπλέον, ένας συνεχώς αυξανόμενος αριθμός εκτυπωτών 3D για οικιακή και βιομηχανική χρήση επεκτείνει την κλίμακα και το εύρος των πιθανών επιλογών κατασκευής.

Η τεχνολογία της προσθετικής παραγωγής βρίσκεται ακόμη και σε πολιτικές ατζέντες, με αξιοσημείωτη παρατήρηση αυτή ενός προέδρου των ΗΠΑ να την προωθεί ως «τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο που κάνουμε σχεδόν τα πάντα» (Obama B., 2013). Ο Gartner (2014) κάνει διάκριση μεταξύ των καταναλωτικών και βιομηχανικών χρήσεων της προσθετικής παραγωγής. Το πρώτο θεωρείται κατά την άποψή του ότι είναι σχετικά ανώριμο και υποτιμημένο, ενώ η βιομηχανική χρήση της, είναι πιθανό να φτάσει σε ένα επίπεδο γενικής προσαρμογής.

Παρά την τρέχουσα διαφημιστική εκστρατεία γύρω από την προσθετική παραγωγή και τις αυξανόμενες εφαρμογές της, υπάρχει λίγη έρευνα σχετικά με τις οικονομικές επιπτώσεις της τεχνολογίας αυτής. Απαιτείται λοιπόν, η σκιαγράφηση των πιθανών οικονομικών επιπτώσεων στις μεταποιητικές εταιρείες και τις αγορές.

### 3.3.1 Τεχνολογικό υπόβαθρο και μελέτες στο κόστος των 3D εκτυπωτών

Τη σημερινή εποχή η προσθετική παραγωγή εφαρμόζεται σε ένα ευρύ πεδίο με διάφορες μεθόδους. Πράγματι, οι ειδικοί της αγοράς από την αρχή της δεκαετίας που διανύουμε προέβλεπαν ότι έως το 2021, τα προϊόντα και οι υπηρεσίες της προσθετικής παραγωγής θα φθάσουν σε συνολικό όγκο αγοράς 10,8 δισεκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ (Wohlers T., 2013) κυρίως λόγω βιομηχανικών χρήσεων. Ενώ το συνολικό μέγεθος της αγοράς ήταν συγκριτικά μικρό, η δυναμική της ανάπτυξης φαινόταν σημαντική.

Η προσθετική παραγωγή επιτρέπει την εξατομίκευση των προϊόντων χωρίς την επιβολή κόστους στην κατασκευή. Προσθέτοντας υλικό ανά στρώμα έως ότου οριστικοποιηθεί το προϊόν, υπάρχουν λιγότεροι περιορισμοί στη διαδικασία και στο σχεδιασμό. Επιπλέον, η αύξηση της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού δεν σημαίνει υψηλότερο κόστος παραγωγής. Σε αντίθεση, με την κλασσική τεχνολογία κατασκευής εκτός της προσθετικής παραγωγής, το κόστος παραγωγής ανά μονάδα συνήθως αυξάνεται με υψηλότερη πολυπλοκότητα σχεδιασμού προϊόντος. Επιπλέον, επιτρέπεται υψηλή ευελιξία στην κατασκευή (εκτός από τα αναλώσιμα και τον εκτυπωτή, απαιτείται μόνο το ψηφιακό μοντέλο 3D του προϊόντος). Επιπλέον, το κόστος εγκατάστασης και μετάβασης είναι αμελητέο. Πρέπει να φορτωθεί μόνο ένα διαφορετικό αρχείο CAD στο μηχάνημα κατά την αλλαγή του προϊόντος που πρόκειται να παραχθεί (δεν απαιτούνται ούτε εργαλεία, ούτε καλούπια, κάτι που δεν συμβαίνει με τις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής). Επίσης, η προσθετική παραγωγή επιτρέπει την παραγωγή λειτουργικά ολοκληρωμένων σχεδίων των προϊόντων σε μια διαδικασία κατασκευής ενός σταδίου. Ορισμένα συστήματα και λειτουργίες όπως τα κινούμενα μέρη ή τα συστήματα ψύξης μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας στα παραγόμενα μέρη χωρίς να απαιτούνται πρόσθετα στάδια κατασκευής ή συναρμολόγησης.

Μελέτες περιπτώσεων δείχνουν ότι η τεχνολογία αυτή μπορεί να μειώσει σημαντικά τις απαιτούμενες πρώτες ύλες και τα απορρίμματα σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνολογία κατασκευής, ιδιαίτερα στα μεταλλικά μέρη (Lipson H. & Kurman M., 2013). Ωστόσο, η τεχνολογία προσθετικής παραγωγής έχει αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά τις εφαρμογές της. Για παράδειγμα, τα διαθέσιμα υλικά καθώς και η επιλογή των χρωμάτων και των



φινιρισμάτων των επιφανειών εξακολουθούν να είναι περιορισμένα. Επιπλέον, ο χώρος κατασκευής των εκτυπωτών θέτει ένα φυσικό όριο στις γεωμετρίες των προϊόντων. Με την τρέχουσα τεχνολογία, τα ζητήματα ποιότητας είναι επίσης ανησυχητικά. Τα ανταλλακτικά ενδέχεται να μην έχουν την απαραίτητη αντίσταση στις περιβαλλοντικές επιδράσεις και να αποτύχουν με την έκθεσή τους σε υψηλές πιέσεις. Επιπλέον, η ακρίβεια των παραγόμενων ανταλλακτικών χρειάζεται βελτίωση. Επομένως, η αναπαραγωγή των ανταλλακτικών δε μπορεί να διασφαλιστεί και η παγκόσμια ποιότητα καθώς και τα πρότυπα δοκιμών δεν έχουν ακόμη καθοριστεί.

Στη μελέτη των Baumanns M. et al. (2019) πραγματοποιήθηκαν 20 πειράματα κατασκευής σε πλατφόρμες τελευταίας τεχνολογίας πολυμερούς συγχρονισμένου λέιζερ (LS) και επιλεκτικής τήξης λέιζερ (SLM). Το πολυμερές LS αποτελεί ένα από τα πιο κοινά υιοθετούμενα υλικά για την προσθετική παραγωγή συστατικών τελικής χρήσης και είναι ικανό να προσφέρει χρήσιμες ιδιότητες. Έχουν εντοπιστεί τρεις πτυχές που έχουν αποδειχθεί ότι έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη διαμόρφωση της συνολικής προοπτικής κόστους:

- Είναι γνωστό ότι το κόστος μιας μονάδας που μπορεί να επιτευχθεί με το LS εξαρτάται από τον βαθμό χρήσης του όγκου κατασκευής. Αυτή η σχέση βασίζεται στην προσέγγιση που ακολουθείται στο αντίστοιχο έργο.
- Οι διαδικασίες προσθετικής παραγωγής δε λειτουργούν μεμονωμένα. Ενσωματώνονται σε μια ακολουθία βοηθητικών βημάτων διαδικασίας που μπορούν, όπως έχει προσδιοριστεί από το έργο, να καταγραφούν επαρκώς μέσω χαρτογράφησης των διεργασιών.
- Στην τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας, οι διεργασίες προσθετικής παραγωγής είναι επιρρεπείς στη δημιουργία συμβάντων αποτυχίας διαφόρων ειδών, τα οποία όλα έχουν επιζήμια επίδραση στο κόστος και συνεπώς πρέπει να ενσωματωθούν σε οποιοδήποτε μοντέλο κοστολόγησης.

Επιπλέον παρέχεται στην ίδια μελέτη μια επισκόπηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι προδιαγραφές του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε και οι παρουσιάσεις του μοντέλου συνολικού κόστους που αναπτύχθηκε για το σύστημα EOSINT P100 LS. Συμπεριλαμβανομένης μιας πρόσθετης δόμησης για την αντικατάσταση των απορριφθέντων γεωμετρικών δοκιμών, κατασκευάστηκαν συνολικά 63 γεωμετρικές δοκιμής και 56 δείγματα εφελκυσμού με συνολικό ονομαστικό όγκο 2521 cm<sup>3</sup>. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, συνολικά 13,09 kg σκόνης PA2200 εισήχθησαν στο μηχάνημα. Το υλικό αγοράστηκε από τον πωλητή συστήματος στην τιμή των 45,05 £ ανά κιλό. Στη σειρά των πειραμάτων κατασκευής, το σύστημα EOSINT P100 εκτελέστηκε στις εργοστασιακές ρυθμίσεις και διαμορφώθηκε σε πάχος στρώσης 100 μm.

Η σειρά των προγραμματισμένων πειραμάτων κατασκευής περιλάμβανε 14 εκδόσεις. Από αυτά τα 14 πειράματα, 10 κατασκευές αντικατοπτρίζουν τη λειτουργία του συστήματος σε πλήρη χωρητικότητα, χρησιμοποιώντας πλήρως τον τεμαχισμό σε 30 mm του όγκου της κατασκευής. Η εφαρμογή ενός αυτόματου αλγορίθμου συσκευασίας όγκου της κατασκευής είχε ως αποτέλεσμα την εισαγωγή πέντε γεωμετρικών δοκιμών στη διαθέσιμη ζώνη του όγκου της κατασκευής. Τα δεδομένα του κόστους της συγκεκριμένης μελέτης παρατίθενται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Υπολογισμένο κόστος χρήσης 3D εκτυπωτή (σύστημα EOSINTP100 LS)

Έμμεσο κόστος		Κόστος εργασίας	
Γενικός ρυθμός παραγωγής	£4.53 / ώρα	Πλήρες ετήσιο κόστος εργασίας	£32,420 / χρόνο
Γενικά έξοδα διαχειριστή	£0.31 / ώρα	Εργάσιμες ημέρες εκτός των διακοπές	228 ημέρες
Αγορά μηχανήματος	£140,500	Συνολικές ώρες εργασίας ανά έτος	1653 ώρες
Περίοδος απόσβεσης	8 χρόνια	Ρυθμός κόστους εργασίας	£19.61 / h
Ετήσιος χρόνος λειτουργίας	5,000 ώρες	Άμεσο κόστος	
Εκτιμώμενη συντήρηση και αναλώσιμα	£8,516 / χρόνο	Τιμή πρώτων υλών	£45.05 / kg
Συνολικός ρυθμός κόστους μηχανήματος	£5.22 / ώρα	Πυκνότητα υλικού, όπως εναποτίθεται	0.93 g / cm <sup>3</sup>
Συνολικός ρυθμός έμμεσου κόστους	£10.06 / ώρα	Τιμή ενέργειας	£0.02 / MJ
		Σταθερή κατανάλωση ενέργειας ανά κατασκευή	25.23 MJ
		Ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας	1,407.50 J / s

Πηγή: Baumers M. et al. (2019)

Στο μοντέλο που περιλαμβάνεται ο κίνδυνος αστοχίας της κατασκευής, το κόστος ανά μονάδα μειώνεται ταχέως αρχικά, αλλά στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνεται ελαφρώς καθώς η χρήση της χωρητικότητας πλησιάζει το μέγιστο. Αυτό οφείλεται σε αυξήσεις του αναμενόμενου κόστους αποτυχίας της κατασκευής.

### 3.3.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά της προσθετικής παραγωγής

Η προσθετική παραγωγή διευκολύνει την καινοτομία των προϊόντων επειδή οι επαναλήψεις του σχεδιασμού είναι σχετικά φθηνές και τα εξαρτήματα μπορούν να παραχθούν γρήγορα. Συγκεκριμένα, ξεδιπλώνει τα πλεονεκτήματά της σε ένα περιβάλλον αγοράς που χαρακτηρίζεται από προσαρμογή, ευελιξία, πολυπλοκότητα σχεδιασμού και υψηλό κόστος μεταφοράς για την παράδοση των τελικών προϊόντων. Η τεχνολογία αυτή λοιπόν

ελευθερώνει το χώρο λύσης για τα σχέδια προϊόντων, με «μοναδικό περιορισμό» ουσιαστικά τη δημιουργικότητα και τους φυσικούς νόμους των σχεδιαστών. Θεωρητικά, η τεχνολογία αυτή, είναι ικανή να παράγει οποιονδήποτε φυσικά εφικτό σχεδιασμό προϊόντος που έχει συνταχθεί σε τρισδιάστατο μοντέλο, επειδή τα προϊόντα κατασκευάζονται ανά στρώμα. Έτσι, τα σχέδια προϊόντων μπορούν να βελτιστοποιηθούν σύμφωνα με την επιθυμητή λειτουργία τους, αντί να περιορίζονται από την τεχνολογία παραγωγής ή τους περιορισμούς της αλυσίδας εφοδιασμού. Επιπλέον, οι εταιρείες είναι σε θέση να προσφέρουν εξαιρετικά προσαρμοσμένα προϊόντα που ταιριάζουν στις προτιμήσεις των πελατών.

Η προσαρμογή των προϊόντων αποφέρει δυνητικά μια αύξηση στην αντιληπτή αξία των πελατών και, συνεπώς, την υψηλότερη προθυμία πληρωμής (όπως στη μαζική προσαρμογή (FrankeN. et al., 2010)). Επίσης επιτρέπει στους καταναλωτές να συν-σχεδιάσουν προϊόντα που ταιριάζουν καλύτερα στη ζήτησή τους.

Η ποικιλία των προϊόντων μπορεί δυνητικά να γίνει άπειρη χωρίς να υπάρξει επιβάρυνση με επιπρόσθετο κόστος βιομηχανοποίησης. Αντίθετα, ο στόχος της συμβατικής μαζικής προσαρμογής είναι να ικανοποιήσει την ατομική ζήτηση των πελατών συνδυάζοντας προσυναρμολογημένα αρθρωτά μέρη, με αποτέλεσμα ξεχωριστές παραλλαγές του προϊόντος. Έτσι, ακολουθούνται στρατηγικές για την απόκτηση μιας μαζικής αποδοτικότητας παραγωγής, συνήθως με πολλαπλά στάδια παραγωγής (BermanB., 2012). Παρ'όλα αυτά, κάθε παραλλαγή δημιουργεί μια πρόσθετη πολυπλοκότητα και κόστος σε μια αλυσίδα εφοδιασμού που βασίζεται στη συμβατική τεχνολογία παραγωγής, κάτι που δεν συμβαίνει με την προσθετική παραγωγή. Επομένως, η τεχνολογία προσθετικής παραγωγής έχει τη δυνατότητα να επιλύσει το «δίλημμα κλίμακας-πεδίου» από την πλευρά του κόστους (δεν υπάρχουν κυρώσεις που να σχετίζονται με τον υψηλότερο βαθμό ποικιλίας προϊόντων). Επιπλέον, οι χρόνοι παράδοσης για την παραγωγή μεμονωμένων παρτίδων των παραλλαγών των προϊόντων μπορούν να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό. Από την άλλη, οι παραλλαγές των προϊόντων μπορούν να παραχθούν με οποιαδήποτε ακολουθία χωρίς πρόσθετο χρόνο μετάβασης ή κόστος αλλαγής επειδή δεν απαιτούνται εργαλεία ή καλούπια. Το υψηλό κόστος μεταφοράς για την παράδοση των τελικών προϊόντων που υπερβαίνει το κόστος μεταφοράς των πρώτων υλών, καθώς και οι κυρώσεις για καθυστερημένη παράδοση μπορούν επίσης να μετατοπίσουν την τοποθεσία παραγωγής στο σημείο χρήσης (KleerR.&PillerF. T., 2013). Ως αποτέλεσμα, τα πλεονεκτήματα του κόστους της παραγωγής σε χώρες με χαμηλούς μισθούς ενδέχεται να μειωθούν μακροπρόθεσμα. Ωστόσο, το οριακό κόστος παραγωγής παραμένει υψηλότερο από τη συμβατική τεχνολογία εκτός της προσθετικής παραγωγής, λόγω του υψηλού κόστους των υλικών και της ενέργειας. Παρ'όλα αυτά, το κόστος των υλικών είναι πιθανό να μειωθεί όταν εισέλθουν στην αγορά πρόσθετοι προμηθευτές. Επιπλέον, η ταχύτητα παραγωγής είναι χαμηλότερη από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής (π.χ., χύτευση με έγχυση).

Ενώ η ποικιλία των προϊόντων μπορεί να αυξάνεται χωρίς κυρώσεις κόστους στην κατασκευή, η προσθετική παραγωγή δε μπορεί να εκμεταλλευτεί τις οικονομίες κλίμακας όταν αυξάνεται ο όγκος παραγωγής μιας παραλλαγής του προϊόντος (BermanB., 2012). Επομένως, η μαζική παραγωγή των τυποποιημένων ανταλλακτικών πιθανότατα θα παραμείνει στον τομέα της συμβατικής κατασκευής. Επιπλέον, τα ζητήματα ποιότητας ενδέχεται να αποθαρρύνουν ορισμένους δυνητικούς πελάτες από την αγορά προϊόντων που παράγονται με την τεχνολογία προσθετικής παραγωγής. Σε συνδυασμό με τις βελτιωμένες δυνατότητες σάρωσης 3D και της αντίστροφης μηχανικής, η προσθετική παραγωγή ενέχει κινδύνους για τα δικαιώματα της πνευματικής ιδιοκτησίας (IP) των σχεδίων των προϊόντων (KurfessT.&CassW. J., 2014). Η αντιγραφή ενός φυσικού προϊόντος και η μετατροπή του σε

κοινόχρηστα δεδομένα σχεδιασμού 3D μπορεί να γίνει τόσο εύκολα όσο η αντιγραφή ενός έντυπου εγγράφου.

### 3.4 Επιδράσεις στο περιβάλλον

Παρόλο που έχουν μελετηθεί διάφορες πτυχές της μηχανικής σχετικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση με την πάροδο των ετών (MohanV. &BhattacharyyaD., 2019) η βιβλιογραφική επισκόπηση δείχνει ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν έχουν τεκμηριωθεί καλά. Σε μια μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαδικασιών της πρόσθετης κατασκευής, μπορούν να ληφθούν υπόψη διάφορες πτυχές. Για παράδειγμα, μπορεί να αναγνωριστεί η κατανάλωση ενέργειας, ο κύκλος ζωής του προϊόντος, τα απόβλητα, το αποτύπωμα νερού, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη και η ατμοσφαιρική ρύπανση ως πρωταρχικά ζητήματα, σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πρόσθετης κατασκευής. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πρόσθετης κατασκευής εξαρτώνται από διαφορετικές παραμέτρους, όπως η τυπική διαδικασία και το χρησιμοποιούμενο υλικό.

Όσον αφορά τη σημαντική ανάπτυξη της πρόσθετης κατασκευής, έχουν ολοκληρωθεί διάφορα ερευνητικά προγράμματα παγκοσμίως για να διασφαλιστεί η πρόοδος. Οι ΗΠΑ έχουν αναπτύξει ένα μοντέλο αξιολόγησης ενέργειας για την πρόσθετη κατασκευή, για να συγκρίνουν την κατανάλωση ενέργειας με αυτή και με τις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής (Americaprojects, 2019). Επιπλέον, έχει καθοριστεί ένα μεγάλο έργο στην Ευρωπαϊκή Ένωση (EE), δηλαδή «πρόσθετη κατασκευή με στόχο τα μηδενικά απόβλητα και την αποτελεσματική παραγωγή μεταλλικών προϊόντων υψηλής τεχνολογίας» (Europerprojects, 2019). Αναλυτικά, το έργο της EE περιλαμβάνει εταιρίες από τη βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό χώρο και στοχεύει στην παραγωγή μεγάλων μεταλλικών εξαρτημάτων πρόσθετης κατασκευής, χωρίς ελαττώματα, με σχεδόν μηδενικά απόβλητα. Κατά συνέπεια, έχει κατασκευαστεί ένα μεταλλικό τμήμα σε αρχικό σχήμα ελαφρύτερο από το αρχικό εξάρτημα.

Κατά τους Garg A. etal. (2018), η τρισδιάστατη εκτύπωση θεωρήθηκε ως φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία κατασκευής. Στην πραγματικότητα, αναφέρθηκε ότι μια συγκεκριμένη διαδικασία πρόσθετης κατασκευής υποδηλώνει βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η οποία οδηγεί σε ένα καθαρό και υγιές περιβάλλον. Πρόσφατα, οι Faludi J. etal. (2019), δοκίμασαν διαφορετικά υλικά για την εκτύπωση μέσω εξώθησης μιας πάστας, για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της πρόσθετης κατασκευής. Σε αυτό το πλαίσιο, παρασκευάστηκαν πάστες με βάση το νερό που μπορούν να συνδεθούν χημικά σε θερμοκρασία δωματίου. Οι ερευνητές, πραγματοποίησαν μια σειρά δοκιμών συμπίεσης και εφελκυσμού και ισχυρίστηκαν ότι η ενέργεια εκτύπωσης και οι ενσωματωμένες επιπτώσεις των υλικών μειώθηκαν κατά 75% και 82%, αντίστοιχα. Επιπλέον, μια περιβαλλοντική αξιολόγηση της πρόσθετης κατασκευής στην αυτοκινητοβιομηχανία συζητήθηκε από τους Böckin D. και Tillman A. (2019). Αναλυτικά, χρησιμοποιήθηκε μια εκτίμηση του κύκλου ζωής σε μια μεταλλική τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση χαμηλού αντίκτυπου υλικών ως πρώτη ύλη μαζί με την τεχνολογική ανάπτυξη οδηγούν σε περιβαλλοντικές βελτιώσεις. Επιπλέον, συνήχθη το συμπέρασμα ότι τα ελαφριά συστατικά πρέπει να θεωρηθούν ως βασικός παράγοντας για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Κατά την ανάπτυξη των διαδικασιών κατασκευής, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορες πτυχές, όπως η αξιολόγηση της συνολικής κατασκευής, η συντήρηση του εξοπλισμού και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες. Αν και οι διαδικασίες παραγωγής επηρεάζουν το περιβάλλον, η

καθαρή παραγωγή, η παραγωγή με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα «πράσινα προϊόντα» είναι σημαντικά θέματα στις εξελίξεις της διαδικασίας παραγωγής (Moustafa H. et al., 2019). Ωστόσο, όλες οι διαδικασίες παραγωγής καταναλώνουν ενέργεια, χρησιμοποιούν υλικά και απελευθερώνουν ρύπους. Το ίδιο ισχύει για τις τεχνολογίες προσθετικής παραγωγής.

Επί του παρόντος, η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) και ο σχεδιασμός για το περιβάλλον (DFE) είναι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των παραγωγικών διαδικασιών (Venkata Rao R., 2016). Επιπλέον, έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαφορετικών διαδικασιών παραγωγής με την πάροδο των ετών (Kumar M. & Mani M., 2019). Αν και οι εφαρμογές τεχνολογιών της προσθετικής παραγωγής έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, οι κατάλληλες μετρήσεις και τα κατάλληλα πρότυπα είναι ανεπαρκή, για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαδικασιών αυτών. Ως εκ τούτου, προηγούμενες έρευνες κατέληξαν σε διαφορετικά συμπεράσματα (Yosofi M. et al., 2018). Για παράδειγμα, οι Liu Z. et al. (2018), ανέφεραν ότι η προσθετική παραγωγή δεν προσφέρει περιβαλλοντικά οφέλη στην κατασκευή εργαλείων υψηλής ταχύτητας, ενώ από την άλλη, οι Long W.J. (2019), συμπέραναν ότι η αντίστοιχη διαδικασία επιδεικνύει θετικά περιβαλλοντικά οφέλη στην εκτύπωση με σύνθετα υλικά που έχουν ως βάση τους, το τσιμέντο.

Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία αναφέρονται επίσης από τους Rejeski D. και Huang Y. (2015), των οποίων το εργαστήριο χρηματοδοτήθηκε από το Εθνικό Επιστημονικό Ίδρυμα τον Οκτώβριο του 2014. Σε αυτό το πλαίσιο, συζητήθηκαν ιδέες σχετικά με την προσθετική παραγωγή και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και την επαγγελματική υγεία. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών. Για παράδειγμα, το πάχος στρώσης, ο χρόνος διεργασίας και ο τύπος υλικού είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την περιβαλλοντική εκτίμηση των τεχνολογιών. Οι τρεις σημαντικότερες πτυχές των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της προσθετικής παραγωγής είναι οι εξής:

- κατανάλωση ενέργειας
- διαχείριση αποβλήτων και
- ατμοσφαιρική ρύπανση

Η σύγκριση και η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεχνικών της προσθετικής παραγωγής εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων LCA για τις διαδικασίες. Τα διαθέσιμα δεδομένα LCA σχετικά με τις διαδικασίες και τις διεργασίες μετά τη χρήση έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές μελέτες στη βιβλιογραφία όπως έχουν ήδη αναφερθεί.

### 3.4.1 Κατανάλωση ενέργειας

Κατά τη διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της διαδικασίας κατασκευής, η αποδοτική χρήση της ενέργειας θεωρείται βασικός παράγοντας. Η ηλεκτρική ενέργεια φαίνεται να είναι ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός αντίκτυπος των διαδικασιών προσθετικής παραγωγής. Στη μαζική παραγωγή, η προσθετική παραγωγή απαιτεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σύγκριση με τη διαδικασία χύτευσης με έγχυση. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για την

παραγωγή δειγμάτων (Shahrubudin N. et al., 2019). Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους:

- **Υλικό:** Επί του παρόντος, διάφορα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες προσθετικής παραγωγής. Καθώς διαφορετικά υλικά έχουν διάφορες πυκνότητες και θερμικές ικανότητες, απαιτούνται διαφορετικές ενέργειες στην κατασκευή μέσω των διαδικασιών προσθετικής παραγωγής. Ως εκ τούτου, η χρήση υλικών χαμηλής θερμοκρασίας παρουσιάζει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.
- **Όγκος κατασκευής:** Αυτή η παράμετρος καθορίζει τον αριθμό των στοιχείων που μπορούν να εκτυπωθούν ταυτόχρονα σε μια συγκεκριμένη μηχανή εκτύπωσης 3D. Επομένως, εκτυπωτές με δυνατότητα παράλληλης κατασκευής και εκείνοι που μπορούν να εκτυπώσουν περισσότερα εξαρτήματα ταυτόχρονα, κατατάσσονται σε εκτυπωτές υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης.
- **Πάχος στρώσης:** Το χαμηλό πάχος στρώσης είναι ένα από τα κριτήρια για την κατασκευή επιφανειών υψηλής ποιότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εκτύπωση χαμηλής ταχύτητας, με αποτέλεσμα την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, ένα χαμηλό πάχος στρώματος οδηγεί σε μεγαλύτερο συνολικό αριθμό στρωμάτων στα τυπωμένα εξαρτήματα, γεγονός που αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας.
- **Ταχύτητα διαδικασίας:** Στις τεχνικές προσθετικής παραγωγής, επιτυγχάνονται διαφορετικές ταχύτητες διαδικασίας. Επιπλέον, άλλες παράμετροι όπως το υλικό και το πάχος επηρεάζουν την ταχύτητα εκτύπωσης. Σε όλες τις διαδικασίες, καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια της μεγαλύτερης διαδικασίας και η γρήγορη εκτύπωση μειώνει την κατανάλωση ενέργειας.

Σε διάφορες διαδικασίες προσθετικής παραγωγής, θα πρέπει να εξεταστούν και άλλοι σχετικοί παράγοντες για τη σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας. Για παράδειγμα, η πυκνότητα σκόνης έχει σημαντική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαδικασία PBF (Σύντηξη σε σκόνη). Κατά τη διερεύνηση της κατανάλωσης ενέργειας στις διεργασίες προσθετικής παραγωγής έχουν ληφθεί υπόψη διαφορετικές πτυχές. Για παράδειγμα, οι Walachowicz F. et al. (2017) ανέφεραν ότι τα περισσότερα μηχανήματα εκτύπωσης 3D δεν είναι καλά σχεδιασμένα για μια αποτελεσματική κατανάλωση ενέργειας. Στη συνέχεια, οι Kamps T. et al. (2018), επιβεβαίωσαν ότι η μείωση του βάρους του εξαρτήματος εκτύπωσης είναι βασικός παράγοντας για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Η κατανάλωση της ενέργειας μπορεί να εξεταστεί σε τρεις κύριες φάσεις: (α) προθέρμανση ή προθέρμανση μηχανής, (β) διαδικασία εκτύπωσης και (γ) διαδικασία ψύξης. Η χρήση υψηλής τεχνολογίας σε αυτές τις φάσεις μπορεί να μειώσει τη χρήση ενέργειας. Ωστόσο, η έλλειψη δεδομένων που σχετίζονται με την ενέργεια εμποδίζει την πρόοδο σε αυτόν τον τομέα. Καθώς το σύστημα ψύξης είναι ζωτικής σημασίας για την κατανάλωση ενέργειας, αναφέρεται από τους Ford S. και Despreisse M. (2016), ότι ένα πολύ αποδοτικό σύστημα ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί, βελτιώνοντας το σύστημα ψύξης ενσωματώνοντας τα κανάλια ψύξης στη δομή.

Κατά την αξιολόγηση και ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας σε διάφορες διαδικασίες προσθετικής παραγωγής, η χρήση της μεθοδολογίας LCA είναι απαραίτητη και επωφελής. Ωστόσο, οι μελέτες LCA σε αυτόν τον τομέα είναι ακόμα σπάνιες. Για παράδειγμα, οι Faludi J. et al. (2015), πραγματοποίησαν ένα LCA για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη διαδικασία άλεσης CNC και στη διαδικασία FDM. Ωστόσο, για να ληφθούν ολοκληρωμένες πληροφορίες, απαιτούνται διαφορετικά πειράματα και πρέπει να συγκεντρωθούν ολοκληρωμένα δεδομένα για ένα LCA με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, η μονάδα kWh / kg χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας.

Όχι μόνο ο τύπος υλικού, αλλά και ο τύπος της μηχανής εκτύπωσης 3D επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας. Τα τεκμηριωμένα δεδομένα απέδειξαν ότι τα νέα μοντέλα είναι συνήθως πιο αποτελεσματικά. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι προδιαγραφές των ανταλλακτικών δεν είναι πανομοιότυπες στις διάφορες διαδικασίες. Για παράδειγμα, η διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος που παράγεται από κάποια διαδικασία, μπορεί να είναι περιορισμένη σε σύγκριση με την παραγωγή μέσω μιας άλλης διαδικασίας. Αυτό το σημαντικό ζήτημα πρέπει να εξεταστεί για μια αξιόπιστη ανάλυση. Εδώ, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι λόγω της βιωσιμότητας της προσθετικής παραγωγής, η οποία εξαρτάται από διαφορετικές παραμέτρους, δε μπορεί να γίνει μια γενική δήλωση σχετικά με την κατανάλωση της ενέργειας των διαδικασιών αυτών. Η χρήση μιας βάσης δεδομένων LCA είναι απαραίτητη για περαιτέρω έρευνα.

### 3.4.2 Απόβλητα υλικά

Καθώς τα απόβλητα επηρεάζουν σημαντικά το περιβάλλον, έχει συγκεντρωθεί αυξανόμενη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Επί του παρόντος, η παγκόσμια παραγωγή αποβλήτων είναι περίπου 1,3 δισεκατομμύρια τόνοι ετησίως και αναμένεται να αυξηθεί σε 2,2 δισεκατομμύρια τόνους έως το 2025 (Hooijweg D. & Bhada-Tata P., 2012). Η διαχείριση των αποβλήτων των υλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες: (α) χρήση ανακυκλωμένων υλικών σε εκτυπωτές 3D και (β) ανακύκλωση των απορριμμάτων των υλικών που παράγονται στις διαδικασίες εκτύπωσης 3D. Και οι δύο αυτές δραστηριότητες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της προσθετικής παραγωγής. Λόγω αλλαγών στις ιδιότητες των υλικών μετά την εκτύπωση, η ανακύκλωση όλων των τύπων απορριμμάτων υλικών στη διαδικασία αυτή είναι διαφορετική. Ωστόσο, τα συστήματα ανακύκλωσης για εκτυπωτές 3D είναι ένα ενδιαφέρον θέμα αυτήν τη στιγμή.

Διαφορετικά απόβλητα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων συστατικών. Για να χρησιμοποιηθούν ανακυκλωμένα υλικά σε διεργασίες προσθετικής παραγωγής, τα πολυμερή απόβλητα μπορούν να ανακυκλωθούν και να χρησιμοποιηθούν. Στην πραγματικότητα, μπορούν να ανακυκλωθούν και να χρησιμοποιηθούν διάφορα πολυμερή, όπως το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE). Επί του παρόντος, όχι μόνο τα LDPE και HDPE, αλλά και τα πολυμερή υψηλής ακαμψίας, όπως το πολυπροπυλένιο, το PLA και το ABS έχουν ανακυκλωθεί μέσω των τεχνικών ανακύκλωσης. Στην πραγματικότητα, αυτά τα υλικά έχουν ανακυκλωθεί επιτυχώς σε νήματα (Hart K.R. et al. 2018). Καθώς τα νήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τρισδιάστατη εκτύπωση πολυμερών δομών, αυτός ο τύπος ανακύκλωσης μπορεί να αποφύγει τη σπατάλη αρκετών εκατομμυρίων ετησίως.

Τα πλαστικά απορρίμματα ταξινομούνται σύμφωνα με τον κωδικό αναγνώρισης της ρητίνης. Λαμβάνοντας υπόψη τις πολυάριθμες εφαρμογές των διαδικασιών και την αυξανόμενη ζήτηση της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης, θα πρέπει να προστεθεί ένας κωδικός ανακύκλωσης

για τα τρισδιάστατα τυπωμένα μέρη. Στην πραγματικότητα, η αύξηση των απορριμμάτων των πλαστικών υλικών που παράγονται από διαφορετικές διεργασίες μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες, ειδικά όταν πραγματοποιείται μια πολύπλοκη εκτύπωση.

Η σύγκριση της προσθετικής παραγωγής και των παραδοσιακών διαδικασιών παραγωγής δείχνει ότι οι τεχνικές της πρώτης κατηγορίας απαιτούν πολύ συγκεκριμένα υλικά πρώτων υλών. Αυτή η ειδική απαίτηση απαιτεί συγκεκριμένα και πρόσθετα βήματα στην προετοιμασία υλικών που έχουν ως αποτέλεσμα κάποιες πρόσθετες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Εν τω μεταξύ, η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών σε διαδικασίες 3D εκτύπωσης συμβάλλει θετικά στο περιβάλλον.

Σχετικά με τη χρήση των ανακυκλωμένων υλικών στους εκτυπωτές 3D, μπορεί να δημιουργηθεί ένα νήμα που έχει κατασκευαστεί έως και 95% από το ανακυκλωμένο πλαστικού. Καθώς το πλαστικό λιώνει, οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των πλαστικών μορίων καταστρέφονται και γίνονται πιο αδύναμοι. Επομένως, η προσθήκη μιας μικρής ποσότητας πρωτότυπου πλαστικού διευκολύνει σημαντικά την παραγωγή ενός ισχυρού υλικού μέσω της ανακύκλωσης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα απόβλητα υλικά πρέπει να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τον κωδικό αναγνώρισης της ρητίνης. Αυτή η διαλογή αποτελεί ένα σημαντικό βήμα στη διαδικασία ανακύκλωσης. Σύμφωνα με τον κωδικό αναγνώρισης της ρητίνης ASTM (ASTM D7611, 2018), διατίθεται ένα σύνολο συμβόλων (Πίνακας 3.2) σε πλαστικά προϊόντα για την αναγνώριση των πλαστικών ρητινών. Η αρχική του μορφή αντιπροσωπεύεται από βέλη που περιστρέφονται δεξιόστροφα και σχηματίζουν ένα τρίγωνο που περικλείει έναν αριθμό. Ο αριθμός δηλώνει τον τύπο πλαστικού που χρησιμοποιείται στο προϊόν.

Πίνακας 2.2: Κωδικός αναγνώρισης ρητίνης με βάση το ASTM D7611.

Αριθμός ανακύκλωσης	Υλικό	Εφαρμογές
1	Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)	Θερμοδιαμορφωμένες πολυεστερικές ίνες
2	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	Εξοπλισμός για γεωργικούς σωλήνες
3	Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	Παιδικά παιχνίδια
4	Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας, (LDPE)	Πλαστικοί σάκοι, εξοπλισμός εργαστηριακών δοχείων
5	Βιομηχανικές ίνες από πολυπροπυλένιο (PP)	Δοχεία τροφίμων και ανταλλακτικά αυτοκινήτων
6	Πολυστυρένιο (PS)	Πλαστικά σκεύη συσκευασίας
7	Άλλα πλαστικά (O)	Φιάλες, γυαλιά ασφαλείας των φακών των προβολέων



Η ανακύκλωση των αποβλήτων, των πολυμερών υλικών και η μετατροπή τους σε χρήσιμα νήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικά στάδια: (α) κοπή των αποβλήτων σε μικρά κομμάτια, (β) τήξη και εξώθηση με κατάλληλο εξωθητή νήματος. Αν και το πρώτο βήμα φαίνεται να είναι εύκολο, παραμένει δύσκολο σε πολλές περιπτώσεις. Στην πραγματικότητα, η κοπή μεγάλων συστατικών απαιτεί έναν ακριβό βιομηχανικό τεμαχιστή. Παρόλο που τα απορρίμματα εκτύπωσης 3D μπορούν να ανακυκλωθούν, η καλύτερη μέθοδος είναι να αποφευχθεί η παραγωγή αποβλήτων. Σε αυτό το πλαίσιο, ο σχεδιασμός εξαρτημάτων με την ελάχιστη υποστήριξη και η εξάλειψη των πρόσθετων στηριγμάτων μπορεί να μειώσει σημαντικά τα απορρίμματα.

Παρόλο που η ανακύκλωση των αποβλήτων έχει προχωρήσει, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμοί που εμποδίζουν τις γρήγορες εξελίξεις στην ανακύκλωση των απορριμμάτων των υλικών από τις τεχνολογίες 3D εκτύπωσης, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης προτύπων στο υλικό και στον ποιοτικό έλεγχο. Επιπλέον, τα ελλείποντα τεχνικά δεδομένα και η ανταλλαγή δεξιοτήτων είναι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την ανακύκλωση των απορριμμάτων της 3D εκτύπωσης. Θα πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω μελέτες για να ληφθούν βασικές λύσεις για την ανακύκλωση απορριμμάτων υλικών στο σπίτι, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης.

### 3.4.3 Μόλυνση του αέρα

Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει γίνει παγκόσμιο ζήτημα και έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή τις τελευταίες δεκαετίες. Όσον αφορά το ρόλο της προσθετικής παραγωγής στην ατμοσφαιρική ρύπανση, υπάρχουν δύο πρωτεύοντες τομείς: (α) ατμοσφαιρική ρύπανση που παράγεται από διαδικασίες 3D εκτύπωσης. (β) μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην κατασκευή με τη χρήση της προσθετικής παραγωγής. Ένα μεγάλο μέρος της βιομηχανικής ρύπανσης παράγεται στην κατασκευή συστατικών από πρώτες ύλες. Αναλυτικά, το 19% των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στον κόσμο σχετίζεται με τις διαδικασίες παραγωγής (Diaz N. et al., 2010). Επομένως, η ατμοσφαιρική ρύπανση από αυτές τις διεργασίες πρέπει να ελέγχεται χρησιμοποιώντας τις σωστές και πιο κατάλληλες τεχνολογίες. Η ατμοσφαιρική ρύπανση ποικίλλει ανάλογα με τις διαδικασίες κατασκευής. Λόγω της αυξανόμενης εφαρμογής των τεχνολογιών προσθετικής παραγωγής σε ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς τομείς, ο ρόλος τους στη δημιουργία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχει καταστεί ένα κρίσιμο ζήτημα. Ως εκ τούτου, έχουν διερευνηθεί τα αποτελέσματα των επιτραπέζιων εκτυπωτών 3D στην ατμοσφαιρική ρύπανση (Wujtyla S. et al., 2019). Στην πραγματικότητα, οι επιπτώσεις των διαδικασιών 3D εκτύπωσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση έχουν αξιολογηθεί σε ειδικές μελέτες περιπτώσεων ή συζητήθηκαν σε συγκεκριμένες καταστάσεις.

Η διαδικασία εξώθησης των θερμοπλαστικών δημιουργεί σωματίδια και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC), μερικές από τις οποίες είναι επικίνδυνες και προκαλούν βλάβη στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Στην πραγματικότητα, μπορούν να δημιουργήσουν ένα δυνητικό κίνδυνο για την υγεία των εργαζομένων. Ως εκ τούτου, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται προσωπικές προστατευτικές μάσκες και ρούχα. Η εκπομπή VOC μπορεί να σχετίζεται με τη θερμική αποικοδόμηση πολυμερών και προσθέτων. Επειδή πολλοί επιτραπέζιοι εκτυπωτές 3D βασίζονται σε θερμαινόμενη θερμοπλαστική εξώθηση, μπορούν να θεωρηθούν δυνητικά επικίνδυνοι για ορισμένα εσωτερικά περιβάλλοντα. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν διεξαχθεί ορισμένες ερευνητικές μελέτες και οι εκπομπές VOC έχουν αναλυθεί από διαφορετικές διαδικασίες 3D εκτύπωσης (Byrley P. et al., 2019). Ωστόσο, δεν υπάρχει τυπική μέθοδος δοκιμής, καθώς έχουν αναφερθεί

διαφορετικά αποτελέσματα. Απαιτείται μία τυποποιημένη πειραματική έρευνα και ανάλυση για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών μελετών. Αρκετές παράμετροι επηρεάζουν τις εκπομπές των σωματιδίων: (α) το αφρώδες υλικό, (β) η θερμοκρασία του εξωθητή, (γ) το χρώμα του νήματος, (δ) η θέρμανση της πλάκας κατασκευής και (ε) το μοντέλο του εκτυπωτή.

Κατά τη διάρκεια των διαφορετικών διεργασιών 3D εκτύπωσης μπορούν να εκπέμπονται σωματιδιακά υλικά, αέρια υλικά και νανοσωματίδια, τα οποία ενέχουν δυνητικούς κινδύνους για την υγεία (Davis A.Y. et al., 2019). Για τον προσδιορισμό των εκπομπών αυτών των υλικών από διαφορετικές τεχνικές εκτύπωσης 3D, απαιτείται μια σειρά πειραματικών πρακτικών. Με βάση τα αποτελέσματα που αναφέρονται από τους Kim Y. et al. (2015), το FDM μπορεί να είναι επικίνδυνο λόγω της υψηλής συγκέντρωσης εκπεμπόμενων νανοσωματιδίων και αλδεϋδών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σωματίδια που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών πρόσθετης κατασκευής είναι νανοσωματιζόμενα και εκπέμπονται κυρίως στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας εκτύπωσης. Για τη μείωση αυτών των εκπομπών, έχουν προταθεί ορισμένες προτάσεις, όπως για παράδειγμα, προετοιμασία κλειστών εκτυπωτών, χρήση συστήματος εξαερισμού και χρήση υψηλής απόδοσης φίλτρων αέρα για τα σωματίδια.

Επειδή οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται επί του παρόντος, ως επί το πλείστον σε μικρές επιχειρήσεις, νεοσύστατες επιχειρήσεις και αίθουσες διδασκαλίας, είναι απαραίτητη η εξεύρεση των λύσεων και των στρατηγικών για τη μείωση των κινδύνων για την υγεία. Μια σύγκριση μεταξύ της τεχνολογίας και των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής αποκάλυψε ότι οι διεργασίες πρόσθετης κατασκευής χρησιμοποιούν λιγότερα επιβλαβή χημικά υλικά. Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές πρέπει να χρησιμοποιούνται προσεκτικά και απαιτούνται περαιτέρω έρευνες για τον προσδιορισμό της τοξικότητας και των επικινδύνων επιπτώσεων.

Στον τομέα της μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με χρήση της πρόσθετης κατασκευής, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις. Η χρήση μη τοξικών θερμοπλαστικών υλικών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα παράδειγμα της άμεσης επίδρασης στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα κατασκευαστικά στοιχεία που βρίσκονται πιο κοντά στην τοποθεσία του καταναλωτή μπορούν να μειώσουν τη μεταφορά και ένα βελτιωμένο αποτύπωμα άνθρακα είναι ένα έμμεσο όφελος αυτής της τεχνολογίας, στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Στις διεργασίες πρόσθετης κατασκευής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα μη τοξικών θερμοπλαστικών υλικών που διατίθεται στο εμπόριο για την άμεση μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Κατά την ανάπτυξη εκτυπώσιμων υλικών πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές παράμετροι και βασικοί παράγοντες, όπως οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, η εμφάνιση και το κόστος. Με βάση τις εξελίξεις των υλικών, διαφορετικά και βιοαποικοδομήσιμα υλικά χρησιμοποιούνται επί του παρόντος. Καθώς αυτοί οι τύποι υλικών είναι φιλικοί προς το περιβάλλον, μπορούν να προσφέρουν περιβαλλοντικά οφέλη. Τα πολυμερή βιολογικής βάσης απαιτούν χαμηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας. Τα νήματα βιοπολυμερούς είναι βιοαποικοδομήσιμα, μη τοξικά και προσφέρουν οικονομικά πλεονεκτήματα. Επιπλέον, επειδή τα περισσότερα από αυτά τα υλικά μπορούν να παρασκευαστούν τοπικά, δεν απαιτούνται ειδικές δεξιότητες. Επομένως, μπορούν να εφαρμοστούν ευρύτερα στο εγγύς μέλλον. Τα πλαστικά δεν είναι τα μόνα υλικά που

χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες εκτύπωσης 3D. Ως εκ τούτου, αναμένονται μεταβολές στο μέλλον προς την κατεύθυνση των «πράσινων πόλεων» και πιο βιώσιμων περιβαλλόντων.

Η προσθετική παραγωγή χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο από τους καταναλωτές και μπορεί να αναβιώσει τη βιομηχανία μεταφορών. Αν και οι υπάρχουσες μελέτες δεν παρέχουν ολοκληρωμένα δεδομένα σχετικά με την επίδραση της στην εφοδιαστική αλυσίδα και τη μεταφορά, η κατασκευή εξαρτημάτων πλησιέστερα σε τοποθεσίες καταναλωτών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη μεταφορά.

Οι Peng T. et al. (2018), δηλώνουν ότι, λόγω της εφαρμογής της τεχνολογίας προσθετικής παραγωγής στα μεταλλικά εξαρτήματα αεροδιαστημικής, ο ελαφρύς σχεδιασμός είναι ιδιαίτερα επιθυμητός, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας (καύσιμα) στη συγκεκριμένη βιομηχανία. Όπως αναφέρεται από τους Gebler M. et al. (2018), με βάση την τρισδιάστατη αγορά εκτύπωσης, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να αποφευχθούν έως το 2025. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση καυσίμου στη βιομηχανία αερομεταφορών διαθέτει το μεγαλύτερο δυναμικό μείωσης μέσω της 3D εκτύπωσης. Παρόλο που οι πρώτες ύλες πρέπει να μεταφερθούν στην κατασκευή μέσω της 3D εκτύπωσης, η μεταφορά του τελικού προϊόντος σε μεγάλες αποστάσεις θα παραμείνει λόγω των μίνι-εργοστασίων και των τοπικών τυπογραφικών καταστημάτων. Επιπλέον, λόγω των αυξανόμενων εφαρμογών, αναμένεται λιγότερος εναέριος φόρτος καθώς τα εξαρτήματα μπορούν να κατασκευαστούν όταν και όπου απαιτούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μία έμμεση επίδραση της 3D τεχνολογίας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Με βάση τις συζητούμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σημαντικοί παράγοντες, χαρακτηριστικά και παράμετροι για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαδικασιών 3D.

Παρόλο, που η κατασκευή των ανταλλακτικών μέσω της τεχνολογίας εκτύπωσης 3D έχει χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε πολλές περιπτώσεις, ορισμένες συνιστώσες μπορούν να κατασκευαστούν πιο αποτελεσματικά μέσω των παραδοσιακών διαδικασιών κατασκευής. Ως εκ τούτου, η επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου κατασκευής είναι το πρώτο βήμα για τη βελτιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Καθώς το LCA παρέχει ποσοτική σύγκριση όπως έχει αναφερθεί, θα πρέπει να αναλύεται για τις διαδικασίες κατασκευής και για τις διαφορετικές τεχνικές 3D. Αυτό μπορεί να παρέχει περισσότερες πληροφορίες και μετρήσεις μιας πηγής, στις οποίες ομαλοποιούνται διαφορετικοί παράγοντες. Μέσω μιας συνολικής σύγκρισης μεταξύ των παραδοσιακών παραγωγικών διαδικασιών και των 3D, οι χρήστες μπορούν να κατανοήσουν τις προτεραιότητες.

Επειδή ο τύπος της διαδικασίας της προσθετικής παραγωγής έχει σημαντική επίδραση στην κατανάλωση της ενέργειας και στην κατασκευή των εξαρτημάτων, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια κατάλληλη μέθοδος για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Με άλλα λόγια, ορισμένες διαδικασίες είναι πιο αποτελεσματικές (π.χ. SLA). Επιπλέον, εκτυπωτές που βασίζονται σε FDM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή κοίλων στοιχείων, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας.

Οι παράμετροι επεξεργασίας (π.χ. πάχος στρώσης) και οι λειτουργικές παράμετροι (π.χ., μερικός προσανατολισμός) είναι κρίσιμες για την περιβαλλοντική επίδραση της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης. Επομένως, ένα σύνολο κατάλληλων παραμέτρων λειτουργίας και

βελτιστοποιημένων παραμέτρων διεργασίας μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Καθώς η πιθανότητα αστοχίας της εκτύπωσης αυξάνεται όταν εκτελούνται πολλές εκτυπώσεις ταυτόχρονα, θα πρέπει να αποφεύγονται οι ταυτόχρονες εκτυπώσεις 3D πολλών στοιχείων. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τα περιττά απόβλητα. Ωστόσο, η εκτύπωση πολλών εξαρτημάτων ταυτόχρονα μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση την προσωπική εμπειρία του χρήστη και τις δυνατότητες εκτύπωσης.

Όσον αφορά τη συνεχιζόμενη ταχεία ανάπτυξη της προσθετικής παραγωγής πρέπει να διεξαχθούν μελέτες, σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, πριν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές γίνουν πιο προσιτοί στα σπίτια. Αυτό θα επέτρεπε προσαρμογές σε πρώιμο στάδιο. Επιπλέον, επειδή οι τοξικολογικοί κίνδυνοι της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες σε αυτό το πλαίσιο.

Για να συγκριθούν τα διάφορα αποτελέσματα των μετρήσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των τρισδιάστατων εκτυπωτών, απαιτείται μια τυπική μέθοδος δοκιμής που μπορεί να καθορίσει την ποιότητα του εσωτερικού αέρα. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα ευρύ φάσμα επιτραπέζιων εκτυπωτών 3D για την αξιολόγηση των επιπτώσεών τους σε εσωτερικούς χώρους.

Οι επιπτώσεις των διαδικασιών 3D στο περιβάλλον μπορούν να μειωθούν εφαρμόζοντας διαφορετικές στρατηγικές. Για παράδειγμα, (α) με τη χρήση εκτυπωτή 3D με το χαμηλότερο απόβλητο υλικό, (β) με τη χρήση ανακυκλώσιμης πρώτης ύλης, (γ) με την παροχή συστήματος επιστροφής αποβλήτων στον προμηθευτή και (δ) με τη βελτίωση της ρύθμισης εκτυπωτή 3D για την επίτευξη της καλύτερης ποιότητας και ταυτόχρονα την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων.

Οι διεργασίες αυτές μπορούν να φέρουν επανάσταση στη βιομηχανία μεταφορών γιατί τότε η κατασκευή μπορεί να μετατοπιστεί από τα κεντρικά εργοστάσια στα σπίτια των καταναλωτών. Επομένως, πρέπει να διερευνηθούν οι επιπτώσεις τους στη μεταφορά, στο πλαίσιο της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η χρήση «πράσινων υλικών» μπορεί να μειώσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής της μεθόδου κατασκευής. Προς το παρόν, τα «πράσινα υλικά» για 3D διαδικασίες είναι περιορισμένα. Ωστόσο, μπορούν να αναπτυχθούν περαιτέρω με χρηματοδότηση και με προσανατολισμό την ανάπτυξή τους. Αυτή η ευκαιρία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερόμενες προτάσεις, μια σειρά ολοκληρωμένων μελετών σύγκρισης μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τους χρήστες στην αγορά της τεχνολογίας. Επιπλέον, βάσει δίκαιων συγκρίσεων, οι κατασκευαστές τρισδιάστατων εκτυπωτών θα είναι πιο ενημερωμένοι σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τις προτεραιότητες των συστημάτων τους, επιτρέποντας έτσι τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σίγουρα, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν επιπλέον μελέτες για τον καθορισμό συγκεκριμένων στόχων για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

### **3.5 Διείδυση της 3D εκτύπωσης στην Ελλάδα**

Η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης έχει γνωρίσει μία ιδιαίτερη ανάπτυξη στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια. Σε επίπεδο επιχειρήσεων, υπάρχουν πλέον αρκετές εταιρείες οι οποίες εμπορεύονται και πωλούν 3D εκτυπωτές μικρής κλίμακας και αναλώσιμα σε ιδιώτες.

Επιπλέον δραστηριοποιούνται αρκετές επιχειρήσεις στη δημιουργία των 3D σχεδίων ή σαρώσεων και παράλληλα στην εκτύπωσή τους.

Μία αρκετά ανεπτυγμένη εταιρεία που χρησιμοποιεί την τεχνολογία παραγωγής πρόσθετων είναι η «3DHUB Greece». Την περίοδο του ιού «COVID-19» παράγει ιατρικά αναλώσιμα και λοιπά υλικά για τις υγειονομικές ανάγκες της χώρας σε συνεργασία με αρκετά νοσοκομεία. Επιπλέον αυτή η προσπάθεια στηρίζεται από μια μεγάλη ομάδα εθελοντών. Ο κύριος στόχος είναι η δημιουργία οφθαλμικών ασπίδων προστασίας του προσώπου και μάσκες για χρήση από το υγειονομικό προσωπικό. Εκτός από τον παραγόμενο εξοπλισμό και τα αναλώσιμα, η ίδια ομάδα αναπτύσσει παράλληλα και το κατάλληλο λογισμικό. Επιπλέον στην Ελλάδα υπάρχουν παρόμοιες εταιρείες οι οποίες αναπτύσσουν εξαρτήματα σε ιδιώτες οι οποίοι δε μπορούν να βρουν κάποιο αντίστοιχο ανταλλακτικό στην αγορά.

Η Ελλάδα, για το λόγο ότι δεν έχει αρκετά ανεπτυγμένο το βιομηχανικό και τον κατασκευαστικό κλάδο, δεν έχει αντίστοιχα αναπτύξει και τον κλάδο των μεγάλων βιομηχανικών εκτυπωτών 3D. Από την άλλη πλευρά, βρίσκεται σε αρκετά καλό επίπεδο στην εκτύπωση 3D στους τομείς της οδοντιατρικής και των κοσμημάτων. Σε αυτό βοήθησε αρκετά και το επενδυτικό πλάνο των τελευταίων ετών όπου υπήρξε μια πολιτική επιδοτήσεων στις νεοφυείς επιχειρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο μπόρεσαν αρκετές άλλες επιχειρήσεις να προσαρμοστούν, ανανεωθούν, καθώς και άλλες να δημιουργηθούν εκ νέου. Επιπλέον το ίδιο το ελληνικό κράτος δεν έχει θεσμοθετήσει ακόμα κάποιο συγκεκριμένο ΚΑΔ για τη λειτουργία τέτοιου είδους επιχειρήσεων. Γενικότερα απαιτείται μία μεγαλύτερη προβολή στο ελληνικό κοινό για το τι μπορεί να δημιουργηθεί με έναν εκτυπωτή 3D καθώς και τις πραγματικές δυνατότητές του.

### 3.6 Μελλοντική εξέλιξη

Η παγκόσμια κατανάλωση τρισδιάστατων συστημάτων εκτύπωσης, λογισμικού υλικού και συναφών ζητημάτων αναμένεται να οδηγήσει σε ετήσια αύξηση 22,3% τα επόμενα χρόνια (DizonJ. etal., 2018). Επιπλέον, η IDTechEx προβλέπει ότι η παγκόσμια αγορά υλικών εκτύπωσης 3D θα ανέρχεται σε 23 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το έτος 2029 (B. Core, 2019), καταδεικνύοντας μια σημαντική πιθανή ευκαιρία ανάπτυξης την επόμενη δεκαετία. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη σημαντική ανάπτυξη, πρέπει να διεξαχθούν διάφορες έρευνες σε αυτόν τον τομέα, όπως στην «έξυπνη κατασκευή» στην υπάρχουσα τεχνολογία πρόσθετης κατασκευής, στα απόβλητα των υλικών της 3D εκτύπωσης, στην υγεία στην εργασία, στο σχεδιασμός πόρων και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνικών.

Οι ψηφιακές τεχνολογίες μπορούν να προσφέρουν ουσιαστική συνεισφορά στην τεκμηρίωση, την ανάλυση και την επακόλουθη χρήση ακόμη και των πολιτιστικών στοιχείων, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές μορφές και για διαφορετικούς ισχυρισμούς: μελέτη και έρευνα, διάγνωση, επιδιόρθωση, συντήρηση, προστασία, επικοινωνία και σχηματισμό της πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα τελευταία χρόνια η χρήση ηλεκτρονικών και τεχνολογιών πληροφοριών (IT) έχει αυξηθεί εκθετικά, δημιουργώντας νέα τοπία και δυνατότητες στον τομέα της προσθετικής παραγωγής. Αυτή η εξέλιξη των οργάνων και των μεθόδων είναι σε συνεργασία με μια διάχυση τεχνικών οργάνων για έρευνες. Συγκεκριμένα, η τρισδιάστατη σάρωση για παράδειγμα, επιτρέπει την παρατήρηση πολύπλοκων γεωμετριών, η οποία είναι αδύνατη για ανάλυση μέσω των παραδοσιακών μεθόδων.

Η σταθερή εκτύπωση έχει αποκτήσει έναν ιδιαίτερο ρόλο σε αυτήν την τεχνολογική ανάπτυξη. Η ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων είναι μια τεχνική που επιτρέπει την παραγωγή

υλικών και αντιγράφων αντικειμένων με πολύπλοκες γεωμετρίες, απευθείας από το μαθηματικό μοντέλο, σε σχετικά σύντομες χρονικές περιόδους και συχνά χωρίς να είναι μια δαπανηρή διαδικασία.

Τα τελευταία χρόνια, αυτή η τεχνική γνώρισε μια πολύ ισχυρή ανάπτυξη χάρη στη μεγάλη διάδοση της στην αγορά των επιτραπέζιων εκτυπωτών 3D (εκτυπωτών που είναι αρκετά φθηνοί και των οποίων οι διαστάσεις είναι λογικές). Αυτό το καινοτόμο σύστημα επέτρεψε την ταχεία ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας για " εμπορικές χρήσεις, επιτρέποντας σε λιγότερο έμπειρους χρήστες να εισέλθουν στον κόσμο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Προβλέπεται από ορισμένους υποστηρικτές της προσθετικής παραγωγής ότι αυτή η τεχνολογική ανάπτυξη θα αλλάξει τη φύση του εμπορίου, επειδή οι τελικοί χρήστες θα είναι σε θέση να δημιουργούν μεγάλο μέρος της παραγωγής τους, αντί να ασχολούνται με το εμπόριο για να αγοράσουν προϊόντα από άλλους ανθρώπους και εταιρείες. Τρισδιάστατοι εκτυπωτές με δυνατότητα παραγωγής χρώματος και πολλαπλών υλικών υπάρχουν ήδη και θα συνεχίσουν να βελτιώνονται σε ένα σημείο όπου τα λειτουργικά προϊόντα θα μπορούν να εξάγονται. Με επιπτώσεις στη χρήση της ενέργειας, τη μείωση των αποβλήτων, την προσαρμογή, τη διαθεσιμότητα των προϊόντων, την ιατρική, την τέχνη, τις κατασκευές και τις επιστήμες, η τρισδιάστατη εκτύπωση θα αλλάξει τον κατασκευαστικό κόσμο όπως τον γνωρίζουμε.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν πολλές υποσχόμενες περιοχές πιθανής μελλοντικής εφαρμογής. Οι νέες διαδικασίες εκτύπωσης 3D έχουν μειώσει το χρόνο που απαιτείται για τους σχεδιαστές και τους μηχανικούς για να σχεδιάσουν, να δημιουργήσουν και να δοκιμάσουν τα πρωτότυπα. Για την εκτύπωση 3D και για μία ταχέως μεταβαλλόμενη μεταποιητική βιομηχανία, θα πρέπει να θεωρείται από τις εταιρείες, λιγότερο ως μια συναρπαστική τεχνολογική αναβάθμιση και περισσότερο ως μια καθημερινή επιχειρηματική απόφαση. Ορισμένες από τις πιο υποσχόμενες περιοχές περιλαμβάνουν ιατρικές εφαρμογές, εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, εφαρμογές στα κοσμήματα και στις τέχνες και γενικότερα στην αντικατάσταση προσαρμοσμένων ανταλλακτικών, με στόχο προσαρμοσμένα καταναλωτικά προϊόντα. Καθώς τα υλικά βελτιώνονται και το κόστος μειώνεται, άλλες εφαρμογές που μπορεί κανείς να φανταστεί σήμερα, μπορούν γίνουν δυνατές.

Όπως αναφέρεται και από τον Stigler G. (1939), η ευελιξία δεν είναι δωρεάν αγαθό (με συγκεκριμένη ζήτηση και ομοιόμορφα προϊόντα, δεν υπάρχει αξία στην αύξηση της ευελιξίας των διαδικασιών κατασκευής). Ωστόσο, εάν το περιβάλλον της αγοράς χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα, υψηλή ποικιλία προϊόντων ή κυμαινόμενες προτιμήσεις των καταναλωτών, οι εταιρείες οι οποίες είναι εξοπλισμένες με ευέλικτη τεχνολογία κατασκευής, ενδέχεται να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Επομένως, προσδιορίζοντας τις εφαρμογές για τις οποίες τα οφέλη της προσθετικής παραγωγής, μπορεί να υπάρξει πρόσθετη αξία για τους παραγωγούς και τους πελάτες.

Η τεχνολογία προσθετικής παραγωγής προσφέρει νέες ευκαιρίες στην αγορά (η καινοτομία ενδυναμώνεται με χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης, μικρότερο χρόνο για αγορές και χαμηλότερη ένταση κεφαλαίου, ενώ η παραγωγή χαρακτηρίζεται από ευελιξία και κατασκευή εξαιρετικά εξατομικευμένων προϊόντων χωρίς κόστος και με λίγες χειροκίνητες εργασίες συναρμολόγησης). Η τεχνολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να διαταράξει ακόμη και τις σχετικά ώριμες αγορές αφού οι καθιερωμένες εταιρείες επιταχύνουν τη διαδικασία καινοτομίας των προϊόντων τους ή μπορούν να χρησιμοποιούν την προσθετική παραγωγή για να παράγουν άμεσα προϊόντα με νέα χαρακτηριστικά σχεδίασης. Από την άλλη, οι νεοεισερχόμενες εταιρείες προσφέρουν καινοτόμα προϊόντα, βασισμένες στις στρατηγικές προσαρμογής. Αυτές οι νεοεισερχόμενες εταιρείες αντιμετωπίζουν μικρά εμπόδια κατά τη χρήση της τεχνολογίας προσθετικής παραγωγής, ενώ η προσαρμογή των προϊόντων γίνεται χωρίς κυρώσεις κόστους στην κατασκευή (Jorson B., 2013). Επίσης η τεχνολογία προσθετικής παραγωγής υιοθετείται ευκολότερα μάλλον σε εξειδικευμένες αγορές με συνολικά χαμηλότερες οικονομίες κλίμακας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι αγορές για τις οποίες χρησιμοποιείται η προσθετική παραγωγή χαρακτηρίζονται συνήθως από (α) μικρή παραγωγή (π.χ. εφαρμογές πρωτότυπου), (β) υψηλή πολυπλοκότητα προϊόντων (π.χ. ελαφριές κατασκευές στην αεροδιαστημική βιομηχανία), (γ) υψηλός βαθμός προσαρμογής προϊόντων, προσαρμοσμένων στις ανάγκες των πελατών (π.χ. ιατρικά / οδοντικά εμφυτεύματα, προθέσεις ή κοσμήματα) ή (δ) χωρικά απομακρυσμένη ζήτηση για προϊόντα (π.χ. αποκεντρωμένη παραγωγή ανταλλακτικών στη μεταλλευτική βιομηχανία).

Η προσθετική παραγωγή επεκτείνει τις δυνατότητες των συμβατικών μεθόδων. Οι τέσσερις βασικές αρχές της ουσιαστικά βασίζονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Πρώτον, είναι

μια καθολική διαδικασία κατασκευής που μπορεί άμεσα να μετατρέψει ένα ψηφιακό μοντέλο 3D σε φυσικό προϊόν. Δεύτερον, η προσαρμογή και η ευελιξία που παρέχει είναι δωρεάν αφού δεν απαιτούνται εργαλεία ή καλούπια. Επίσης τα σχέδια και οι όγκοι των προϊόντων μπορούν να αλλάξουν χωρίς επιβολή κόστους την κατασκευή. Τρίτον, η πολυπλοκότητα είναι δωρεάν επειδή η πρόσθετη πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και η ποικιλία των προϊόντων δεν επιβαρύνουν επιπλέον το κόστος κατασκευής. Τέταρτον, οι προσπάθειες συναρμολόγησης μειώνονται ενδεχομένως κατά την παραγωγή λειτουργικά ολοκληρωμένων προϊόντων.

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει επίσης να συγκεντρώσει εμπειρικά στοιχεία για τον αντίκτυπο της προσθετικής παραγωγής στους παραγωγούς και τις αγορές. Είναι επιτακτική η ανάγκη της καλύτερης ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της προσθετικής παραγωγής στο κόστος που σχετίζεται με την παραγωγή καθώς και στις συναλλαγές της ανοδικής και πτωτικής πορείας, κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού.

Απαιτείται επίσης, περισσότερη έρευνα η οποία θα εστιάζει στη συγκέντρωση εμπειρικών στοιχείων σχετικά με τις εφαρμογές της τεχνολογίας και την προστιθέμενη αξία της. Για παράδειγμα, ποιες απαιτήσεις αγοράς μπορούν να ικανοποιηθούν και ποια πιθανά ασφάλιστρα τιμής μπορούν να επιτευχθούν, με την ελευθερία σχεδιασμού προϊόντων που αποκτάται μέσω της τεχνολογίας προσθετικής παραγωγής.

Το μέλλον είναι αβέβαιο και πιο συχνά απρόβλεπτο. Οι τεχνολογικές εξελίξεις αποτελούν μέρος αυτής της αβεβαιότητας και υπαγορεύουν την ταχύτητα και το ρυθμό αλλαγής των κοινωνιών μας. Έτσι, υπάρχει όλο και μεγαλύτερη ανάγκη για όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη να διαχειριστούν αυτήν την αλλαγή και την αβεβαιότητα. Επομένως, τα ιδρύματα προσπαθούν να προβλέψουν τις εξελίξεις στο μέλλον καθώς και τις οικονομικές και πολιτικές επιπτώσεις τους. Για πολλές από τις τεχνολογίες που αναδύονται επί του παρόντος, τέτοιες εξελίξεις δεν επηρεάζουν μόνο κάποιες μεμονωμένες εταιρείες. Αντίθετα, δημιουργούν αλλαγές σε ένα ολόκληρο επιχειρηματικό οικοσύστημα, συμπεριλαμβανομένου του δημόσιου αλλά και του ιδιωτικού τομέα. Μέσα σε τέτοια προγράμματα πρόβλεψης, οι τεχνολογικές εξελίξεις μελετώνται συνήθως από μια συγκεκριμένη προοπτική, αντίστοιχα, έχοντας κατά νου έναν συγκεκριμένο στόχο. Όμως, η πρόβλεψη της τεχνολογικής προόδου και των εξελίξεων που είναι εγγενείς στις αναδύομενες τεχνολογίες επιδιώκει σχεδόν πάντα έναν κοινό στόχο: τη δημιουργία πιθανών μελλοντικών σεναρίων, που απεικονίζουν τάσεις και παράγοντες.

Αν και η χρήση της τεχνολογίας της 3D εκτύπωσης έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της δεν έχουν διερευνηθεί λεπτομερώς. Κατά την κατασκευή εξαρτημάτων με παραδοσιακές μεθόδους, απαιτείται συνήθως ένας συνδυασμός διαδικασιών κατασκευής, όπως χύτευση, κάμψη και συγκόλληση. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών των διεργασιών διαφέρουν και εξαρτώνται από το κατασκευασμένο συστατικό. Αυτός ο συνδυασμός κατασκευής γενικά δεν απαιτείται κατά την παραγωγή ενός ανταλλακτικού μέσω της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης. Θα πρέπει να διερευνηθούν περισσότερο οι περιβαλλοντικές επιρροές των διαδικασιών προσθετικής παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τρεις πτυχές: κατανάλωση ενέργειας, διαχείριση αποβλήτων και ρύπανση του αέρα.

Η κατανάλωση της ενέργειας στις διεργασίες προσθετικής παραγωγής εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους, οι οποίες ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τη διαδικασία. Ορισμένες παράμετροι είναι παρόμοιες σε όλες τις διαδικασίες AM. Για παράδειγμα, η βελτίωση της ανάλυσης σε οποιαδήποτε διαδικασία, αυξάνει τον χρόνο παραγωγής, με αποτέλεσμα και την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η διαχείριση των αποβλήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους που βασίζονται στην ανακύκλωση



και την επαναχρησιμοποίηση. Η ανακύκλωση απορριμμάτων πολυμερών υλικών και η παραγωγή νημάτων μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπλέον, η αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση των αποβλήτων υλικών στις διαδικασίες.

Όσον αφορά την τεχνολογία εκτύπωσης 3D στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα άμεσα και έμμεσα αποτελέσματα. Η χρήση μη τοξικών υλικών και νημάτων βιοπολυμερούς μπορεί να θεωρηθεί ως άμεση επίδραση αυτής της τεχνολογίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Η δυνατότητα τρισδιάστατης εκτύπωσης να κατασκευάζει ανταλλακτικά πιο κοντά στους καταναλωτές και να μειώνει τη μεταφορά είναι έμμεσες επιπτώσεις αυτής της τεχνολογίας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Θα πρέπει να διερευνηθούν άλλα πρακτικά ζητήματα, όπως η κατασκευή ανταλλακτικών μέσω της 3D εκτύπωσης. Για παράδειγμα υπάρχει μεγάλο όφελος για υπάρχοντα προϊόντα που δεν υποστηρίζονται από τους αρχικούς κατασκευαστές τους. Η κατασκευή ανταλλακτικών μέσω 3D εκτύπωσης έχει πραγματικές δυνατότητες στην παράταση της διάρκειας ζωής των διαφόρων προϊόντων.

Αν και υπάρχει πολύς δρόμος για μια φιλική προς το περιβάλλον κατασκευή, η 3D εκτύπωση μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία μιας βιώσιμης μεταποιητικής βιομηχανίας. Συμπερασματικά, η προσθετική παραγωγή παρέχει οφέλη στις κατασκευές γενικότερα και στο περιβάλλον. Ωστόσο, οι τυπικές μέθοδοι δοκιμής πρέπει να τροποποιηθούν για να προσδιοριστεί και να αναλυθεί με ακρίβεια η επίδραση κάθε διαδικασίας στην ποιότητα του αέρα και στο περιβάλλον.

Εάν η νέα τεχνολογία πρόκειται να μεταμορφώσει πλήρως την παγκόσμια βιομηχανία, η τρισδιάστατη εκτύπωση πρέπει να είναι σε θέση να παράγει μαζικά αγαθά στους ίδιους όγκους με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής. Προς το παρόν, η κριτική που ασκείται εξακολουθεί να υποστηρίζει το αν είναι εφικτή μια τέτοια παραδοχή. Ορισμένοι στον τομέα, όπως η GE προβλέπουν μια στιγμή που ένας ολόκληρος κινητήρας, για παράδειγμα, θα μπορούσε να εκτυπωθεί. Άλλοι πιστεύουν ότι τουλάχιστον μεσοπρόθεσμα, θα αναπτυχθούν υβριδικές λύσεις, οι οποίες θα συνδυάζουν νέες τεχνολογίες με πιο παραδοσιακές τεχνικές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abdalla I., Bouteraay., Rekik C. (2017). “DESIGN AND DEVELOPMENT OF 3D PRINTED MYOELECTRIC ROBOTIC EXOSKELETON FOR HAND REHABILITATION”. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*

Acquesta A. & Monetta T. (2020). As-Built EBM and DMLS Ti-6Al-4V Parts: Topography–Corrosion Resistance Relationship in a Simulated Body Fluid. *Metallic Biomaterials Surface Engineering*. <https://doi.org/10.3390/met10081015>

Aimar A., Palermo A., Innocenti B. (2019). The Role of 3D Printing in Medical Applications: *A State of the Art. Journal of healthcare engineering*. Volume 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5340616>

America projects (2019). America makes technology roadmap (version 2.0): standardization roadmap for additive manufacturing, <http://ammo.ncms.org/>

Anderson C. (2012). *Makers: The New Industrial Revolution*. London: Random House.

Anzalone G.C., Wijnen B., Pearce J.M. (2015). Multi-material additive and subtractive prosumer digital fabrication with a free and open-source convertible delta RepRap 3-D printer. *Rapid Prototyp. J.*

Anderson, J., Jr. (1995). *Computational Fluid Dynamics*, McGrawHill, NY

ASTM D7611 (2018). Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification, Standard, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, USA

Bartschat B. & Babel B. (2019). Untersuchung der Prozessfähigkeit des SLS-Druckers Sintratec S1. 3D-Druck; Selektives Laserstrahlsintern

Baumers M., Holweg M., Rowley J. (2019). The economics of 3D Printing: A total cost perspective. *3DP-RDM*

Berman B. (2012). 3-D Printing: The New Industrial Revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.

Bhatt P., Kabir A., Peralta M., Bruck H., Gupa S. (2019). A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing, *Addit. Manuf.* 27

Bilton R. (2013). 3D Printing Is a Gimmick, Says Foxconn Prez (and He’s Sorta Right). <https://venturebeat.com/2013/06/26/3d-printing-is-a-gimmick-says-foxconn-prez-and-hes-sortaright/>

Blain J. (2014). *The Complete Guide to Blender Graphics, Second Edition: Computer Modeling and Animation*, A. K. Peters/CRC Press, 2nd ed.

Bodley M. (2014). “3D Printing Offers Twist on Conventional Knee Replacement”, *The Baltimore Sun*.

Bockin D. & Tillman A. (2019). Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry, *J.Cleaner Prod.* 226

Bogue R. (2013). 3-D printing: the dawn of a new era in manufacturing? *Assy. Autom.* 33 307–311

Boparai K., Singh R., Chohan J. (2015). Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, *Elsevier*

Brandongaille (2013). 23 Toy Industry Statistics and Trends. Available online: <http://brandongaille.com/23toy-industry-statistics-and-trends/>

Brady, G.S., Clauser H.R., Vaccari, J.A. (2002). *Materials Handbook*. New York: McGraw-Hill.

Burns M. (1993). Automated Fabrication: improving productivity in manufacturing, *PTR Prentice Hall*

Byrley P., George B.J., Boyes W.K., Rogers K. (2019). Particle emissions from fused deposition modeling 3D printers: evaluation and meta-analysis, *Sci. Total Environ.* 655, 395–407

Campbell T., Williams C., Ivanova O. (2011). Could 3D Printing Change the World?: Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. Atlantic Council

Cheah C.M., 2004. Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*

Chua C.K., Leong, K.F., and Lim, C.S. (2010). Rapid prototyping: principles and applications. 3rd ed. Singapore: *World Scientific Publishing*.

Chua C.K. & Leong, K.F. (2015). 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Singapore, Hackensack, New Jersey: *World Scientific*.

Cline L. (2014). 3D Printing With Autodesk 123D, TinkerCAD and MakerBot, McGraw-Hill/TAB Electronics

Conner B. P., Manogharan G. P., Martof A. N., Rodomsky L. M., Rodomsky C. M., Jordan D. C., Limperos J. W. (2014). Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*, 1, 64–76

Core B. (2019). 3D printing 2019–2029: technology and market analysis, *IDTechEx*

Cruz F., Lanza S., Boudaoud H., Hoppe S., Camargo M. (2015). Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source context: Optimization of Processes and Methods. In Proceedings of the 2015 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference, Austin, TX

DARPA DSO (2010) <http://www.darpa.mil/dso/archives/mice/>

Davis A.Y., Zhang Q., Wong J.P.S., Weber R.J., Black M.S. (2019). Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printers, *Build. Environ.* 160

De La Flor M. & Bridgette M. (2010). *Digital Sculpting With Mudbox: Essential Tools and Techniques for Artists*, Focal Press

Diaz N., Redelsheimer E., Dornfeld D. (2010). Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use, 2010, (Laboratory for Manufacturing and Sustainability, University of California, Berkeley).

Dipaola M. (2018). *3D Printing in Orthopaedic Surgery*. Elsevier. Fairfax VA, United States

Dizon J., Espera A., Chen Q., Advincula R. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers, *Addit. Manuf.* 44–67

Espalin D., Muse D., MacDonald E, Wicker R. (2014). 3D Printing multifunctionality: structures with electronics. *Springer*

Europe projects (2019). Additive manufacturing aiming towards zero waste & efficient production of high-tech metal products, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/105484/factsheet/en>

Faludi J., Bayley C., Bhogal S., Iribane M. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment, *Rapid Proto. J.* 21

Faludi J., Sice C., Shi Y., Bower J., Brooks O. (2019). Novel materials can radically improve whole-system environmental impacts of additive manufacturing, *J. Cleaner Prod.* 212

Feng X., Ma B., Xu M., Zhai D., Liu Y., Xue J., Chang J., Wu C. (2020). Three-dimensional printing of scaffolds with synergistic effects of micro nano surfaces and hollow channels for bone regeneration, *ACS Biomater. Sci. Eng.* 1–9 .

Ferreira, T. (2012). Additive manufacturing in jewellery design. Advanced manufacturing processes; biomedical engineering; multiscale mechanics of biological tissues; sciences, engineering and education; multiphysics; emerging technologies for inspection. *ASME 11th biennial conference on engineering systems design and analysis*, Volume 4

Ford S. & Despeisse M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *J. Cleaner Prod.* 137

France A. (2014). *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printing*, Maker Media

Franke N., Schreier M., Kaiser U. (2010). The “I Designed It Myself” Effect in Mass Customization. *Management Science*, 56(1), 125–140.

Galante R., Figueiredo-Pina C., Serro A. (2019). Additive manufacturing of ceramics for dental applications: a review, *Dent. Mater.* 35 825–846

Galdeano J.A.L. (2015). *3D Printing Food: The Sustainable Future*

Garg A., Lam J., Savalani M. (2018). Laser power based surface characteristics models for 3-D printing process, *J. Intell. Manuf.*

Gartner (2014). Gartner’s 2014 Hype Cycle for Emerging Technologies, from <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918>

Gebler M., Uiterkamp A.J.M.S., Visser C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy Policy* 74. 158–167

Gebhardt, A., 2012. Understanding additive manufacturing - rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. *Cincinnati, OH: Hanser Publishers.*

Gibson, I., Bártolo J., Paulo (2011). “History of Stereolithography.” *Stereolithography: Materials, Processes, and Applications.* 41-43. Print. 7

Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. (2010). Additive manufacturing technologies?: rapid prototyping to direct digital manufacturing. Boston, MA: *Springer Science+Business Media, LLC.*

Hao L., Mellor S., Seaman O., Henderson J., Sewell N., Sloan M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*

Hart K.R., Frketic J.B., Brown J.R. (2018). Recycling meal-ready-to-eat (MRE) pouches into polymer filament for material extrusion additive manufacturing, *Addit. Manuf.* 21

Hoornweg D. & Bhada-Tata P. (2012). What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management, *World Bank*

Hopkinson N., Hague R., Dickens P. (2006). Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age, *Wiley*

Horne R., Hausman K. (2017). 3D Printing For Dummies. John Wiley & Sons Inc, New York, United States

Houston Methodist (2014). “New Stent Graft made from a 3-D Image on the Patient’s Anatomy. Option for People Suffering From an Abdominal Aortic Aneurysm”, *Science Daily.*

ISO/ASTM52900 (2015). 15 Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology, Standard, *American Society for Testing Materials*, West Conshohocken, USA

Jopson B. (2013). New stamping ground for Nike and Adidas as 3D shoes kick off. *Financial Times.* Retrieved from <http://www.ft.com/intl/cms/s/0/1d09a66e-d097-11e2-a050-00144feab7de.html#axzz3DNniBpns>

Juechter V. , Franke M. , Merenda T. , Stichc A. , Korner C. , Singer R. (2018). Additive manufacturing of Ti-45Al-4Nb-C by selective electron beam melting for automotive applications, *Addit. Manuf.* 22 118–126

Kamps T., Lutter-Guenther M., Seidel C., Gutowski T., Reinhart G. (2018). Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 21

Kelleher K. (2015). Was 3D Printing Just a Passing Fad? *Time* 2015. Available online: [time.com/3916323/3d-printerstocks](http://time.com/3916323/3d-printerstocks)

Kelly J. (2014). 3D Modelling and Printing With TinkerCAD: Create and Print Your Own 3D Models, *Que Publishing*

Khanna T. (1995). Racing behavior technological evolution in the high-end computer industry. *Research Policy*, 24(6), 933–958.

Khajavi S.H., Partanen J., Holmstrom, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 65, 50–63.

Khoo Z.X., Teoh J.E.M., Liu Y., Chua C.K., Yang S., An J., Leong K.F., Yeong W.Y. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual Phys. Prototyp.*

Khosravani M. & Zolfagharian A. (2020). Fracture and load-carrying capacity of 3D-printed cracked components, *Extreme Mech. Lett.* 37

Knorovsky G., Cieslak M., Headley T., Romig A., Hammett A., (1989). INCONEL 718: A solidification diagram. *Metallurgical Transactions A*

Kim Y., Yoon C., Ham S., Park J., Kim S., Kwon O., Tsai P.J. (2015). Emissions of nanoparticles and gaseous material from 3D printer operation, *Environ. Sci. Technol.* 49

Kleer R., & Piller F. T. (2013). Modeling Benefits of Local Production by Users: Welfare Effects of Radical Innovation in Flexible Manufacturing Utilizing Additive Manufacturing and 3D Printing. *Presented at the 73rd Annual Meeting of the Academy of Management*

Kohli R., Melville N. P. (2019). Digital innovation: A review and synthesis. *Information Systems Journal*, 29(1), 200–223. <https://doi.org/10.1111/isj.12193>

Kong L., Ambrosi A., Nasir M., Guan J., Pumera M. (2019). Self-propelled 3D-printed aircraft carrier of light-powered smart micromachines for large-volume nitroaromatic explosives removal, *Adv. Funct. Mater.* 19 1–9

Kringelbach M., Jenkinson N., Owen S., Aziz T. (2007). "Translational principles of deep brain stimulation". *Nature Reviews. Neuroscience*. 8 (8): 623–35. doi:10.1038/nrn2196. PMID 17637800.

Kumar M. & Mani M. (2019). A systems-based sustainability assessment framework to capture active impacts in product life cycle/manufacturing, *Procedia Manuf.* 33

Kurfess T. & Cass W. J. (2014). Rethinking Additive Manufacturing and Intellectual Property Protection. *Research-Technology Management*, 57(5), 35–42.

LEGO (2014). We Will Continue To Dominate The Global Toy Market. Available online: <http://www.businessinsider.com/lego-we-will-continue-to-dominate-the-global-toy-market-2014--2>

Levoy M., Pulli P., Curless B., Rusinkiewicz S., Koller D., Pereira L., Ginzton M., Anderson S., Davis J., Ginsberg J., Shade J., and Fulk F. (2000). The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. *In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '00)*. ACM Press/Addison-Wesley 131–144. DOI: <https://doi.org/10.1145/344779.344849>

Lipson H. & Kurman M. (2013). *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons.

Liu Z., Jiang Q., Cong W., Li T., Zhang H. (2018). Comparative study for environmental performances of traditional manufacturing and directed energy deposition processes, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 15

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, *J. Cleaner Prod.* 239

Lopes .A.J, Navarrete M., Medina F., Palmer J., MacDonald E., Wicker R.B. (2006). Expanding rapid prototyping for electronic systems integration of arbitrary form. *17th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*

Lu L., Zheng J., Mishra. S. (2014). "A Model-Based Layer-to-Layer Control Algorithm for Ink-Jet 3D Printing." *Proceedings of the ASME 2014, IC Engines, V002T35A001*. ASME. <https://doi.org/10.1115/DSCC2014-5914>

Magisetty R. & Cheekuramelli N. (2019). Additive manufacturing technology empowered complex electromechanical energy conversion devices and transformers, *Appl. Mater* 35–50

Mantihal S., Prakash S., Godoi F.C., Bhandari B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and low properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*

Marangoni A.G., McGauley S.E. (2003). Relationship between crystallization behavior and structure in cocoa butter. *Crystal Growth and Design*

Medina F., Lopes A.J., Inamdar A.V., Hennessey R., Palmer J.A., Chavez B.D., Wicker R.B. (2005). Integrating multiple rapid manufacturing technologies for developing advanced customized functional devices. *Rapid Prototyping & Manufacturing 2005 Conference Proceedings* 10–12

Mellor S., Hao L., Zhang D. (2014). Additive Manufacturing: A Framework for Implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194–201.

Mohan V. & Bhattacharyya D. (2019). Mechanical, electrical and thermal performance of hybrid polyethylene-graphene nanoplatelets-polypyrrole composites: a comparative analysis of 3D printed and compression molded samples, *Polymer Plst. Technol. Mater.*

Molitch-Hou M. (2020). Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications, *Elsevier*

Moustafa H., Youssef A., Darwish A., Abou-Kandil A. (2019). Eco-friendly polymer composites for green packaging: future vision and challenges, *Compos. Part B* 172

Mueller J., Shea K. (2018). Buckling, build orientation, and scaling effects in 3D printed lattices, *Mater. Today Commun.* 69–75

Murray C. (2013). "Ford Builds Metal Prototypes With 3D Printing", *Design News*

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (2018). Wright 1903 Aircraft Engine. *Glenn Research Center*

Navarrete M., Lopes A., Acuna J., Estrada R., MacDonald E., Palmer J., Wicker R. (2007). Integrated layered manufacturing of a novel wireless motion sensor system with GPS. *18th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. pp. 575–585

Ngo T., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K., Hui K. (2018). Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges, *Compos. Part B* 143

Nijdam T.J. & Gestel R.V. (2010). Service experience with single crystal superalloys for high pressure turbine shrouds. *National Aerospace Laboratory NLR*. Report no. (NLR-TP- 2011–547, 20140118).

Obama B. (2013). State of the Union 2013 - The White House. (2013), from <http://www.whitehouse.gov/state-of-the-union-2013>

Palanivel S. (2015). Friction stir additive manufacturing for high structural performance through microstructural control in an Mg based WE43 alloy. *Materials and Design*, 65, 934–952.

Palmer J.A., Davis D.W., Gallegos P.L., Yang P., Chavez B.D., Medina F., Wicker R.B. (2005). Stereolithography: a basis for integrated meso manufacturing. 16th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. pp. 476–483

Palmer J.A., Yang P., Davis D.W., Chavez B.D., Gallegos P.L., Wicker R.B., Medina F. (2004). Rapid prototyping of high density circuitry. *Proceedings of the Rapid Prototyping & Manufacturing 2004 Conference*

Park B.K., Kim D., Jeong S. (2007). Direct writing of copper conductive patterns by ink-jet printing. *Thin Solid Films* 515:7706– 7711. doi:10.1016/j.tsf.2006.11.142

Parry-Hill J., Shih P., Mankoff J., Ashbrook D. (2017). Understanding Volunteer AT Fabricators: Opportunities and Challenges in DIY-AT for Others in e-NABLE. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Pages 6184–6194. <https://doi.org/10.1145/3025453.3026045>

Paulsen J.A., Renn M., Christenson K., Plourde R. (2012). Printing conformal electronics on 3D structures with Aerosol Jet technology. *Future of Instrumentation International Workshop (FIIW)*, 2012. pp 1–4

Pearce J.M. (2015). Applications of open source 3-D printing on small farms. *Org. Farming* 2015,1,19–35.

Pearce, J.M. (2017). Emerging Business Models for Open Source Hardware. *J. Open Hardw.*

Periard D., Malone E., Lipson H. (2007). Printing embedded circuits. 18th *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. pp. 503–512

Peng T., Kellens K., Tang R., Chen C., Chen G. (2018). Sustainability of additive manufacturing: an overview on its energy demand and environmental impact, *Addit. Manuf.* 21 694–704 .

Petersen E. & Pearce J. (2017). Emergence of Home Manufacturing in the Developed World: Return on Investment for Open-Source 3-D Printers. *Technologies*, 5, 7.

Petrick I.J. & Simpson T.W. (2013). 3D printing disrupts manufacturing: How economies of one create new rules of competition. *Res.-Technol. Manag.* 56, 12–16.

Prince J. (2014). 3D Printing: An Industrial Revolution, *Journal of Electronic Resources in Medical Libraries*, 11:1, 39-45, DOI: 10.1080/15424065.2014.877247



Ram G.D.J., Robinson C., Yang Y., Stucker B.E. (2007). Use of ultrasonic consolidation for fabrication of multi-material structures. *Rapid Prototype J* 13:226–235. doi:10.1108/13552540710776179

Rayna T., Striukova L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224.

Reddy J. N. (2005), An Introduction to the Finite Element Method, *McGraw-Hill*, NY  
Rejeski D. & Huang Y. (2015). Environmental and Health Impacts of Additive Manufacturing, *An NSF Workshop Report*

Rifkin J. (2014). The Zero Marginal Cost Society: The Internet of Things, the Collaborative Commons, and the Eclipse of Capitalism; Palgrave Macmillan: Basingstoke

Rindfleisch A., O'Hern M., Sachdev V. (2017). The digital revolution, 3D printing, and innovation as data. *Journal of Product Innovation Management*, 34(5), 681–690.

Ritland M. (2014). 3D Printing With Sketchup, *PacktPublishin*

Saengchairat N., Tran T., Chua C.K. (2017). A review: Additive manufacturing for active electronic components. *Virtual Phys. Prototyp.*

Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. (2019). An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications, *Procedia Manuf.* 35

Sharma B. (2016). “Betting big on 3D printing”. *Engineering & Technology*. doi:10.1049/et.2016.0104

Simonds B. (2013). Blender Master Class: A Hands-On Guide to Modeling, Sculpting, Materials and Rendering, *No Starch Press*

Stigler G. (1939). Production and Distribution in the Short Run. *Journal of Political Economy*, 47(3), 305–327.

Reddy, J. N. (2005). An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill, NY

Sieberth T., Ebert L., Gentile S., Fliß B. (2020). Clinical forensic height measurements on injured people using a multi camera device for 3D documentation. *Forensic Science, Medicine and Pathology*

Tallman S., Luo Y., Buckley P. J. (2018). Business models in global competition. *Global Strategy Journal*, 8 (4), 517–535. <https://doi.org/10.1002/gsj.1165>

Taminger K.M. & Hafley R.A. (2006). Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing. Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing (pp. 16-1–16-10). *Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-139*, Paper 16.

Tan H., An J., Chua C., Tran T. (2019). Metallic Nanoparticle Inks for 3D Printing of Electronics. *Printed Electronics: Advanced electronic materials*

The economist (2012). Making Things With a 3D Printer Changes the Rules of Manufacturing. <https://www.economist.com/special-report/2012/04/21/solid-print>

Thiesse F., Wirth M., Kemper H.G., Moisa M., Morar D., Lasi H., Piller F., Buxmann, P., Mortara L., Ford, S., Minshall T. (2015). Economic Implications of Additive Manufacturing and the Contribution of MIS. *Bus. Inf. Syst. Eng.*

Toy Association (2017). Annual U.S. Sales Data. Available online: [http://www.toyassociation.org/tia/industry\\_facts/salesdata/industryfacts/sales\\_data/sales\\_data.aspx?hkey=6381a73a-ce46--4caf-8bc1-72b99567df1e#.WQqVLYjys2w](http://www.toyassociation.org/tia/industry_facts/salesdata/industryfacts/sales_data/sales_data.aspx?hkey=6381a73a-ce46--4caf-8bc1-72b99567df1e#.WQqVLYjys2w)

Ulrich R. and Peters J. (2008). *Subdivision Surfaces*, Springer

Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S., 2015. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: a review of important aspects. *Journal of Aerospace Engineering*, 229 (11), 2132–2147.

Vaughan W. (2012). *Digital Modeling*, New Riders

Venkata Rao R. (2016). *Decision Making in the Manufacturing Environment*, Springer

Walachowicz F., Bernsdorf I., Papernfuss U., Zeller C., Graichen A., Navrotsky V., Rajvanshi N., Kiener C. (2017). Comparative energy, resource and recycling life-cycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing, *J. Ind. Ecol.* 21

Weng Z., Wang J., Senthil T., Wu L. (2019). Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing, *Mater. Des.* 102 276–283

Weiss L. & Prinz F. (1998). Novel applications and implementations of shape deposition manufacturing. *Naval Research Reviews, Office of Naval Research*

White Paper (2014). “Perfecting Dental Treatment via 3D Printed Models and Removable Dies”

Williamson M., 2015. Building a rocket? Press ‘P’ for print... *Engineering & Technology*, 10 (2), 40–43.

Wittbrodt B., Glover A., Laureto J., Anzalone G., Oppliger D., Irwin J., Pearce, J. (2013). Life-Cycle Economic Analysis of Distributed Manufacturing with Open-Source 3-D Printers. *Mechatronics*, 23, 713–726.

Wohlers T. (2013). *Wohlers Report 2013*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.

Womack J. P., Jones D. T., Roos D. (1991). *The machine that changed the world* (1st ed.). New York, NY: HarperPerennial.

Wong V. (2014). “A Guide to All The Food That’s Fit to 3D Print (So Far)”, *Bloomberg Business Week, Technology*

Wujtyla S., Klama P., Spiewak K., Baran T. (2019). 3D printer as a potential source of indoor air pollution, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17, 1–12

Xaar (2012). A Guide to Industrial Inkjet. Retrieved from: <https://www.xaar.com/media/1312/xaar-guide-to-inkjet.pdf>.

Yamin M. & Sinkovics R. R. (2006). Online internationalisation, psychic distance reduction and the virtuality trap. *International Business Review*, 15(4), 339–360.

Yosofi M., Kerbrat O., Mognol P. (2018). Framework to combine technical, economic and environmental points of view of additive manufacturing processes, *Pro- cedia CIRP* 69

Zhang F., Saleh E., Vaithilinga J., Li Z., Tuck C., Hague R., Wildman R., He Y. (2019). Reactive material jetting of polyimide insulators for complex circuit board design, *Addit. Manuf.*

Zhuo P. (2015). 3D Food Printer: Development of Desktop 3D Printing System for Food Processing

Zoran A. & Coelho M. (2011). Cornucopia: the concept of digital gastronomy. *Leonardo* 44, 425e431.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**