



Πανεπιστήμιο Πειραιώς
University of Piraeus

ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ
Π.Μ.Σ. ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ - ΟΛΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΜΕ ΔΙΕΘΝΗ
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ

Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΣΑΛΤΑΓΙΑΝΝΗ ΝΕΦΕΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΛΑΓΟΔΗΜΟΣ Α.

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

στη «Διοίκηση Επιχειρήσεων – Ολική Ποιότητα» με διεθνή προσανατολισμό

ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

(περιλαμβάνεται ως ξεχωριστή (δευτερή) σελίδα στο σώμα της διπλωματικής εργασίας)

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η διπλωματική εργασία για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών, του Πανεπιστημίου Πειραιώς, στη Διοίκηση Επιχειρήσεων - Ολική Ποιότητα με διεθνή προσανατολισμό με τίτλο:

« Η Τεχνολογία των Τριδιάστατων Μικρών και η
Επίδρασή της στην Εργασιακή Αφασία »

έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και στο σύνολό της. Δεν έχει υποβληθεί ούτε έχει εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού προγράμματος ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών, στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό, ούτε είναι εργασία ή τμήμα εργασίας ακαδημαϊκού ή επαγγελματικού χαρακτήρα.

Δηλώνω επίσης υπεύθυνα ότι οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, αναφέρονται στο σύνολό τους, κάνοντας πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.

Υπογραφή Μεταπτυχιακού Φοιτητή/ τριας *Σ.Α. Διαμαντίδης*

Όνοματεπώνυμο *Σ.Α. Διαμαντίδης Νικητή*

Ημερομηνία *14/03/2023*



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Λαγοδήμο Αθανάσιο, καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Χουντάλα Παναγιώτη για τη σπουδαία και ουσιαστική βοήθειά τους σε όλα τα στάδια εκπόνησης αυτής, από την επιλογή και την οριοθέτηση του θέματος μέχρι και την τελική συγγραφής της.

Επίσης, ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για τη βαθιά αγάπη και την απεριόριστη στήριξή της.

Στη μητέρα μου, Κατερίνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ικανότητα ανταπόκρισης στις απαιτήσεις των πελατών και της αγοράς εν γένει αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή λειτουργία των σύγχρονων επιχειρήσεων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια επαναστατική τεχνολογία, η οποία μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα αυτή, καθώς επιτρέπει την αύξηση της ευελιξίας της αλυσίδας εφοδιασμού. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την επίτευξη του οποίου πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα, είναι η μελέτη της συγκεκριμένης τεχνολογίας, καθώς και της επίδρασής της στην εφοδιαστική αλυσίδα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η δυνατότητα ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευής προϊόντων περίπλοκων γεωμετρικών χωρίς προηγουμένως να απαιτείται η ανάπτυξη εργαλείων και μητρώων. Έτσι, καθίσταται εφικτή η παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων, αποφεύγοντας την πρόσθετη οικονομική επιβάρυνση και την αύξηση του χρόνου παράδοσης που συνεπάγεται η κατά παραγγελία παραγωγή. Παράλληλα, μειώνονται οι ανάγκες για υψηλό αριθμό φυσικών αποθεμάτων, ενώ χάρη στη δυνατότητα εκτύπωσης και ένωσης πολλών εξαρτημάτων σε ένα ενιαίο προϊόν, εξαλείφεται η ανάγκη για παραγωγή ή εναλλακτικά προμήθεια, μεταφορά και αποθήκευση των επιμέρους αυτών εξαρτημάτων. Όλα τα παραπάνω συντελούν στη δημιουργία πιο ευέλικτων εφοδιαστικών αλυσίδων, ικανών να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς. Προς το παρόν, ο κύριος όγκος της βιβλιογραφίας αφορά τη χαμηλού όγκου παραγωγή περίπλοκης γεωμετρίας προϊόντων, η ζήτηση των οποίων είναι δύσκολο να προβλεφθεί (π.χ. ανταλλακτικά). Αν και τα συμπεράσματα για τη δυναμική της τρισδιάστατης εκτύπωσης, στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, είναι θετικά, υπάρχουν ακόμα αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, καθώς πρόκειται για μια εξελισσόμενη τεχνολογία. Επίσης, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων της σε όλο το μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας, ενώ ακόμα δεν έχει εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα σχετικά με την καταλληλότητά της σε εφαρμογές μαζικής παραγωγής.

SUMMARY

The customer response capability is key to the successful operation of businesses. 3D printing is a disruptive technology that it can enhance this capability, by allowing for increased supply chain flexibility. The purpose of this master thesis is to study the 3D printing technology and its impact on supply chain, based on the literature research that was conducted. The greatest advantage of 3D printing is the capability to digitally design and print geometric complicated parts without the need for tools and molds development. This enables the production of customized products without cost penalties and lead time increasement. The need for high safety stock is also reduced, while the ability to print and assemble many components into a single part eliminates the need to produce or alternative purchase, transport and store all the different components that are required. All the above contribute to the configuration of more flexible supply chains, which are capable to adapt to changing market conditions. At present, most of the research in the literature concerns the low-volume production of complex geometry products, the demand of which is difficult to predict (e.g., spare parts). Although the evidence of the 3D printing's potential in these cases is positive and encouraging, there are still several challenges - given the technology's immaturity - that need to be addressed. Further research is also required to evaluate the potential of the technology, considering the changes in the entire supply chain, while no conclusion has yet been drawn regarding the suitability of 3D printing for mass production applications.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
SUMMARY	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Αντικείμενο εργασίας	11
1.2 Σκοπός εργασίας	13
1.3 Μεθοδολογία	13
1.4 Δομή εργασίας	13
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	14
2.1 Ορισμός και ιστορική αναδρομή	14
2.2 Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης	14
2.3 Τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης	15
2.4 Υλικά	20
2.5 Επισκόπηση	22
2.6 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	25
3. ΚΛΑΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	26
3.1. Ιατρική	26
3.2. Αεροδιαστημική	27
3.3 Αυτοκινητοβιομηχανία	28
3.4 Υποδομές	28
3.5 Βιομηχανία μόδας	30
3.6 Τρόφιμα	30
3.7 Ηλεκτρονικά είδη	31
3.8 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	33
4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ	34
4.1 Προμήθειες	34
4.2 Σχεδιασμός	35
4.3 Παραγωγή	36
4.4 Διανομή	40

4.5 Εξυπηρέτηση μετά την πώληση – Παραγωγή ανταλλακτικών	40
4.6 Επισκόπηση	41
4.7 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	44
5. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ	45
5.1 Περιβαλλοντική βιωσιμότητα.....	45
5.2 Οικονομική βιωσιμότητα.....	49
5.3 Κοινωνική βιωσιμότητα.....	55
5.4 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	55
6. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	58
6.1 Ποιότητα.....	58
6.2 Έλλειψη προτύπων	61
6.3 Ασφάλεια δεδομένων και προστασία πνευματικών δικαιωμάτων	64
6.4 Κόστος και χρόνος	65
6.5 Όγκος χώρου κατασκευής	65
6.6 Διαθέσιμα υλικά.....	66
6.7 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	66
7. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΕΤΑΡΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ.....	69
7.1 Προσομοίωση και προσθετική κατασκευή.....	69
7.2 IIoT και προσθετική κατασκευή.....	70
7.3 Ανάλυση μεγάλων δεδομένων και προσθετική κατασκευή	71
7.4 Κυβερνοασφάλεια και προσθετική κατασκευή	72
7.5 Υπολογιστικό νέφος και προσθετική κατασκευή.....	74
7.6 Επαυξημένη πραγματικότητα και προσθετική κατασκευή.....	75
7.7 Αυτόνομα ρομπότ και προσθετική κατασκευή.....	77
7.8 Οριζόντια/κάθετη ολοκλήρωση και προσθετική κατασκευή.....	78
7.8 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	79
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ, ΥΛΙΚΑ, ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ, ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΟΦΕΛΗ.	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ 3D ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ (TOFAIL, ET AL., 2018).....	66

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (O'CONNOR AND KENNEDY, 2021)	15
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ ΣΕ ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ DIGITAL CONSTRUCTION PLATFORM (ΔΕΞΙΑ ΡΑΟΛΙΝΙ, ET AL., 2019; ΧΙΑΟ, ET AL., 2021).....	29
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΦΑΓΗΤΟΥ ΓΙΑ ΗΛΙΚΙΩΜΕΝΟΥΣ ΜΕ ΔΥΣΦΑΓΙΑ – PERFORMANCE PROJECT.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: ΑΥΤΟΚΟΛΛΗΤΟΣ (3D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΟΣ) ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΡΔΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (TAN, ET AL., 2022).....	32
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ: (Α) ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ ΨΥΞΗΣ, (Β) ΣΥΜΜΟΡΦΟ ΚΑΝΑΛΙ ΨΥΞΗΣ (DURAKOVIC, 2018).	36
ΕΙΚΟΝΑ 5.1: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΓΚΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (BAUMERS AND HOLWEG, 2019).	50
ΕΙΚΟΝΑ 6.1: ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΟΜΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (NGO, ET AL., 2018).	59
ΕΙΚΟΝΑ 6.2: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΚΑΛΟΠΑΤΙΟΥ (DIEGEL, ET AL., 2011).	59
ΕΙΚΟΝΑ 7.1: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ ΑΣΘΕΝΟΥΣ ΜΕ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ (REYES-RUIZ AND HERNANDEZ-HERNANDEZ, 2020).	76
ΕΙΚΟΝΑ 7.2: ΧΡΗΣΗ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΕΦΑΛΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (EIRIKSSON, ET AL., 2017).....	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1.1: ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ ΜΕ ΘΕΜΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΑΠΟ ΤΟ 1980 – 2020 (ZHANG, ET AL., 2022).	12
ΣΧΗΜΑ 3.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΤΑΣ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (PRAVIN AND SUDHIR, 2018).....	26
ΣΧΗΜΑ 5.1: ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΑΝΑΛΟΓΙΑΣ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ – ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ. ΣΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΥΠΟΨΗ Η ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ (INGARAO AND PRIARONE, 2020).	47
ΣΧΗΜΑ 5.2: ΣΧΕΣΗ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (RUFFO, ET AL., 2006).	51
ΣΧΗΜΑ 5.3: ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΟΓΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ, ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΜΕ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ, ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΜΕ LASER (ACHILLAS, ET AL., 2017).	54
ΣΧΗΜΑ 6.1: ΔΟΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΤΥΠΩΝ (MONZON, ET AL., 2015).	63
ΣΧΗΜΑ 7.1: ΦΑΣΕΙΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ (MAJEED, ET AL., 2021).	72
ΣΧΗΜΑ 7.2: ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΝΝΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΤΟΥ INDUSTRY 4.0.....	79

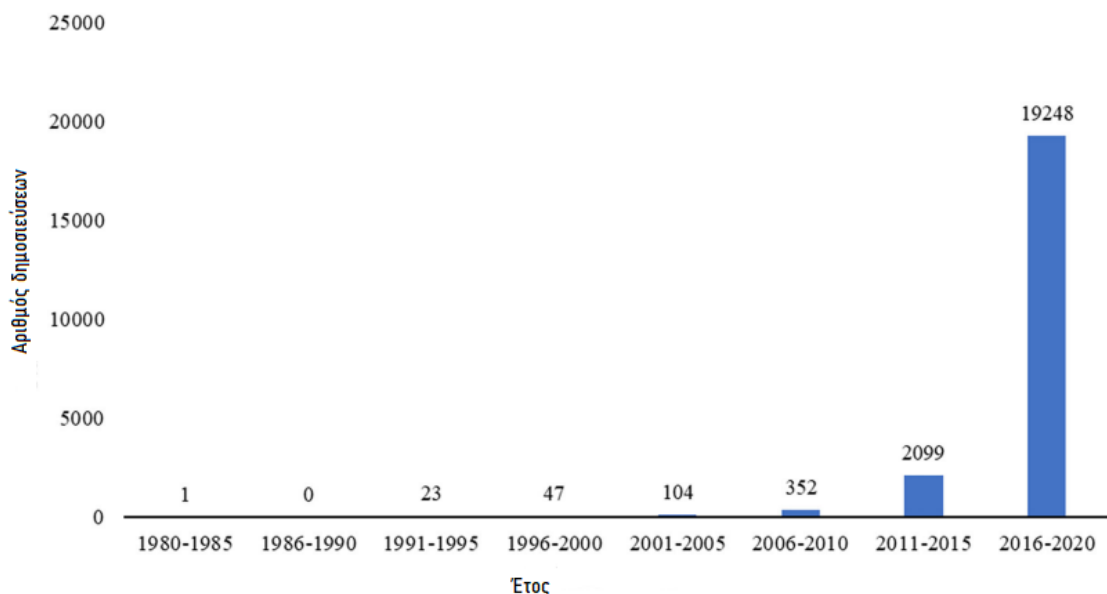
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Η σύγχρονη βιομηχανία έρχεται αντιμέτωπη με όλο και περισσότερες προκλήσεις, μεταξύ των οποίων οι ασταθείς αγορές, οι σύντομοι κύκλοι καινοτόμων τεχνολογιών, οι περιορισμένοι πόροι και το υψηλό κόστος. Ταυτόχρονα, οι προκλήσεις αυτές μπορούν να αποτελέσουν ευκαιρία για όσες εταιρίες είναι σε θέση να προσαρμόζονται γρήγορα στις μεταβολές της αγοράς, να παράγουν προϊόντα, προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις του κάθε πελάτη, διατηρώντας παράλληλα την ταχύτητα και το χαμηλό κόστος της μαζικής παραγωγής και εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη χρήση των πόρων. Ωστόσο, η παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων οδηγεί συνήθως σε υψηλό μοναδιαίο κόστος, ενώ η επίτευξη της βέλτιστης χρήσης των πόρων μέσω του σχεδιασμού υψηλά αυτοματοποιημένων συστημάτων παραγωγής περιορίζει τη δυνατότητα ευελιξίας σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Στην αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων μπορεί να συμβάλει η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (ή αλλιώς «προσθετική κατασκευή»), η οποία επιτρέπει την κατασκευή φυσικών τρισδιάστατων αντικειμένων, εναποθέτοντας υλικό σε επάλληλα στρώματα, σύμφωνα με τις οδηγίες ψηφιακών αρχείων σχεδιασμού, που δημιουργούνται με τη βοήθεια συγκεκριμένου είδους λογισμικών (Computer – aided design software). Το κύριο πλεονέκτημά της έγκειται στη δημιουργία περίπλοκων και προσαρμοσμένων στην κάθε εφαρμογή γεωμετριών, χωρίς την ανάγκη ανάπτυξης ειδικών εργαλείων και καλουπιών, τα οποία αυξάνουν το κόστος και τον χρόνο σχεδιασμού. Έτσι, είναι εφικτή η - σε σύντομο χρόνο και χαμηλό κόστος - κατά παραγγελία παραγωγή και επομένως η αύξηση της ικανότητας ανταπόκρισης σε συνθήκες ασταθούς ζήτησης. Παράλληλα, η προσθετική φύση της τεχνολογίας οδηγεί σε αποδοτικότερη χρήση των πρώτων υλών, ενώ λόγω της σχεδιαστικής ελευθερίας καθίσταται δυνατή η ολοκλήρωση της παραγωγής σε ένα μόνο στάδιο και επομένως δεν απαιτούνται πρόσθετες εργασίες συναρμολόγησης. Η δυνατότητα παραγωγής με μοναδικές εισροές τα ψηφιακά αρχεία σχεδιασμού και τις βασικές πρώτες ύλες, η απουσία ημιτέτοιμων προϊόντων και η εξάλειψη της ανάγκης προμήθειας εργαλείων και εξαρτημάτων οδηγούν στην απλοποίηση και στην αύξηση της ευελιξίας της αλυσίδας τροφοδοσίας (Niaki, et al., 2019; Piller, et al., 2015).

Παρόλο που η προσθετική κατασκευή αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980, ο αριθμός των δημοσιεύσεων τα πρώτα τριάντα χρόνια ήταν μικρός (Σχήμα 1.1). Η τεχνολογία άρχισε να ερευνάται περισσότερο τα τελευταία δέκα χρόνια, με τον αριθμό των δημοσιεύσεων να οχταπλασιάζεται σχεδόν την τελευταία πενταετία (Zhang, et al., 2022).

Αρχικά, η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή τελικών προϊόντων αλλά μόνο για τη γρήγορη παραγωγή προτύπων, η οποία απαιτούσε πολλές δοκιμές και με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ήταν χρονοβόρα και κοστοβόρα. Έτσι, οι πρώτες έρευνες αφορούσαν την ταχεία προτυποποίηση. Ωστόσο, η ταχεία προτυποποίηση είχε περιορισμένο αντίκτυπο στα επιχειρηματικά μοντέλα, καθώς δεν άλλαζε την παραγωγική διαδικασία, απλά μείωνε τον χρόνο έναρξής της. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα επικεντρώθηκε στην προσπάθεια εύρεσης τρόπων βελτίωσης της τεχνολογίας, ώστε να μπορεί να καταστεί μια βιώσιμη εναλλακτική λύση και για την παραγωγή τελικών προϊόντων. Σταδιακά άρχισαν να αναπτύσσονται διαφορετικές τεχνολογίες, οι οποίες αν και έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας και περιγράφονται από τον γενικό όρο «προσθετική κατασκευή», διαφέρουν ως προς τον τρόπο σχηματισμού των στρωμάτων, τα χρησιμοποιούμενα υλικά και τις ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων (Maresch and Gartner, 2020).



Σχήμα 1.1: Αριθμός δημοσιεύσεων με θέμα την τρισδιάστατη εκτύπωση από το 1980 – 2020 (Zhang, et al., 2022).

Το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης βιβλιογραφίας είναι αφιερωμένο στις υπάρχουσες τεχνολογίες, την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους, καθώς και τη μεταξύ τους σύγκριση (Ronis, et al., 2021). Η διερεύνηση των πιθανών εφαρμογών της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η εύρεση της κατάλληλης τεχνολογίας για αυτές είναι επίσης ένα πεδίο που έχει μελετηθεί αρκετά. Εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν την παραγωγή μικρού όγκου, αλλά πολύπλοκης γεωμετρίας προϊόντων, είναι ιδανικές για την ανάδειξη της δυναμικής της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτός είναι και ο λόγος που οι περισσότερες μελέτες πρακτικών εφαρμογών της συγκεκριμένης τεχνολογίας αφορούν τον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής και της ιατρικής. Από την άλλη πλευρά, η οικονομική βιωσιμότητα αποτελεί προϋπόθεση για την υιοθέτηση μιας τεχνολογίας. Η ανάπτυξη μοντέλων κόστους και η σύγκριση της προσθετικής κατασκευής με συμβατικές μεθόδους παραγωγής είναι ένα πεδίο που πλέον ερευνάται (Maresch and Gartner, 2020). Η κατανάλωση υλικών και ενέργειας μελετάται επίσης τόσο στο πλαίσιο της οικονομικής βιωσιμότητας (αφού σχετίζεται άμεσα με το κόστος) όσο και στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Ωστόσο, οι περισσότερες από τις υπάρχουσες στη βιβλιογραφία έρευνες επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής, εξετάζοντας τα οφέλη και τους περιορισμούς της, συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής. Παρόλο, δηλαδή, που η τρισδιάστατη εκτύπωση θεωρείται μια επαναστατική τεχνολογία και αναμένεται να φέρει αξιοσημείωτες αλλαγές στον τρόπο διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, δεν αξιολογείται στο πλαίσιο ενός ευρύτερου συστήματος, που να περιλαμβάνει ολόκληρη την αλυσίδα αξίας, αλλά μόνο σε επίπεδο παραγωγής. Επιπλέον, εντοπίζονται αρκετές αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με τις δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής (Belhadi, et al., 2022). Είναι σημαντικό, επομένως, να εξεταστεί ποια από τα οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πραγματικά και δεν αποτελούν απλά προσδοκίες, ποια είναι τα κύρια εμπόδια και βάσει των στοιχείων αυτών ποιες επιχειρήσεις ή ποιοι κλάδοι μπορούν να επωφεληθούν από την υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Προφανώς η επίτευξη του παραπάνω στόχου απαιτεί εκτεταμένη και συστηματική έρευνα, η οποία ακόμα βρίσκεται σε αρχικά στάδια.

1.2 Σκοπός εργασίας

Ο κύριος σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, των εφαρμογών και της επίδρασής της στην εφοδιαστική αλυσίδα. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού έχουν καθοριστεί οι ακόλουθοι επιμέρους στόχοι:

- Κατανόηση της αρχής λειτουργίας και των χαρακτηριστικών που τη διακρίνουν από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής
- Αναγνώριση των πλεονεκτημάτων που επιτυγχάνονται χάρη στα μοναδικά αυτά χαρακτηριστικά
- Διερεύνηση του τρόπου επίδρασης των πλεονεκτημάτων της τεχνολογίας σε κάθε κόμβο της αλυσίδας τροφοδοσίας
- Σύγκριση συμβατικών μεθόδων και προσθετικής κατασκευής σε επίπεδο κόστους, κατανάλωσης ενέργειας και υλικών και αναγνώριση περιπτώσεων που ενδείκνυται η εφαρμογή της
- Αναζήτηση των αιτιών της περιορισμένης έως τώρα εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία

1.3 Μεθοδολογία

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η μηχανής αναζήτησης «Google Scholar» για την εύρεση σχετικών με το θέμα της προσθετικής κατασκευής βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων, θεωρητικών και εμπειρικών μελετών. Οι μελέτες αυτές ταξινομήθηκαν σε επιμέρους θεματικές ενότητες, οι οποίες εμπλουτίστηκαν με νέα επιστημονικά άρθρα και στη συνέχεια αναλύθηκαν ξεχωριστά. Αποτέλεσμα της ανάλυσης, που περιλάμβανε την αξιολόγηση, οργάνωση και παρουσίαση των συλλεχθέντων δεδομένων, ήταν η σύνθεση ενός νέου ενιαίου κειμένου. Παράλληλα εντοπιστήκαν πεδία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και βάσει αυτών παρουσιάστηκαν προτάσεις μελλοντικής έρευνας.

1.4 Δομή εργασίας

Η εργασία αποτελείται από οχτώ κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 2 που ακολουθεί, γίνεται μια ιστορική αναδρομή, περιγράφεται η διαδικασία της προσθετικής κατασκευής, αναλύονται οι υπάρχουσες τεχνολογίες, καθώς και οι κύριες κατηγορίες των χρησιμοποιούμενων υλικών. Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι κλάδοι, στους οποίους αξιοποιείται η τρισδιάστατη εκτύπωση και παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών της. Στη συνέχεια, μελετάται ο αντίκτυπος της υιοθέτησης της συγκεκριμένης τεχνολογίας στην εφοδιαστική αλυσίδα και πιο συγκεκριμένα, στις προμήθειες, στον σχεδιασμό και την παραγωγή των προϊόντων, στη διανομή και την εξυπηρέτηση μετά την πώληση. Στο κεφάλαιο 5 εξετάζεται η περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική βιωσιμότητα της προσθετικής κατασκευής. Μάλιστα, επιχειρείται η σύγκρισή της με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας και κόστους. Ακολουθούν η αναλυτική παρουσίαση των κύριων προκλήσεων, που πρέπει να αντιμετωπιστούν, προκειμένου η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία να είναι μεγαλύτερης κλίμακας (Κεφάλαιο 6) και η διερεύνηση του ρόλου της προσθετικής κατασκευής στο πλαίσιο του «Industry 4.0» μέσω της εξέτασης των αλληλεπιδράσεών της με τους υπόλοιπους τεχνολογικούς πυλώνες του (Κεφάλαιο 7). Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, εντοπίζονται οι τάσεις της επιστημονικής έρευνας και τα κενά που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, ενώ παρατίθενται και συγκεκριμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

2.1 Ορισμός και ιστορική αναδρομή

Σύμφωνα με την Αμερικάνικη Εταιρία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) και τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), ο όρος «προσθετική κατασκευή» (Additive Manufacturing) ή αλλιώς «τρισδιάστατη εκτύπωση» ορίζεται ως το σύνολο των τεχνολογιών που επιτρέπουν την ένωση υλικών σε επάλληλες στρώσεις, με στόχο την κατασκευή φυσικών αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων, τα οποία έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας εργαλεία λογισμικού (Prashar, et al., 2022).

Η προσθετική κατασκευή είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία, καθώς αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980. Ορόσημο στην ιστορία της ήταν το έτος 1983, όταν ο Charles W. Hull εκτύπωσε με επιτυχία ένα φλιτζάνι τσαγιού στο πρώτο σύστημα AM, τη συσκευή στερεολιθογραφίας SLA - 1, την οποία και κατασκεύασε ο ίδιος. Μάλιστα, του χορηγήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία της στερεολιθογραφίας, κατά την οποία στερεοποιούνται στρώματα υγρού πολυμερούς με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (Jiménez, et al., 2019; Wohlers and Gornet, 2014). Από τότε σημειώθηκε σημαντική πρόοδος και κατοχυρώθηκαν νέες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα και σήμερα, όπως η μέθοδος της εναπόθεσης τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM) και η επιλεκτική σύντηξη με laser (Selective Laser Sintering – SLS). Παράλληλα, από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 έως και το 1990 ιδρύθηκαν οι πρώτες εταιρίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, δύο από τις οποίες – η 3D Systems και η Stratasys, Ltd. – κατέχουν ακόμα ηγετικό ρόλο στον κλάδο. Η περίοδος που ακολούθησε, 1990 – 2005, χαρακτηρίζεται από την ωρίμανση της τεχνολογίας, η οποία ευνοήθηκε και από την ταυτόχρονη ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων και εργαλείων τρισδιάστατης απεικόνισης (Prashar, et al., 2022). Κομβικό σημείο στην εξέλιξη της προσθετικής κατασκευής υπήρξε ωστόσο και το RepRap Project του Πανεπιστημίου Bath, μια πρωτοβουλία ανοιχτού κώδικα για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή, ικανού να εκτυπώνει ο ίδιος τα περισσότερα από τα δικά του στοιχεία. Με τον τρόπο αυτό, ήταν δυνατή μέσω της «αυτό - αναπαραγωγής» η ακριβής αντιγραφή του αρχικού εκτυπωτή. Όραμα του συγκεκριμένου έργου ήταν η κατασκευή και η διάθεση σε όλους τους ανθρώπους του κόσμου τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους, ώστε να μπορούν να εκτυπώνουν τα δικά τους προϊόντα (Jiménez, et al., 2019). Έτσι, σηματοδοτήθηκε μια νέα εποχή (2005 – 2012), η οποία σε συνδυασμό με τη λήξη των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, οδήγησε στην ευρύτερη υιοθέτηση και αποδοχή της τεχνολογίας από την βιομηχανία, ενώ παράλληλα ανακαλύπτονταν συνεχώς νέες εφαρμογές της. Το 2010, για παράδειγμα, εκτυπώθηκαν τα πρώτα τρισδιάστατα αιμοφόρα αγγεία από την εταιρία Organovo (Choudhury, et al., 2018). Τέλος, από το 2013 έως και σήμερα σημειώνεται διαρκής πρόοδος σχετικά με τις διαφορετικές μεθόδους AM και αύξηση των διαθέσιμων προς εκτύπωση υλικών, γεγονός που καθιστά την προσθετική κατασκευή όλο και πιο δημοφιλή (Prashar, et al., 2022).

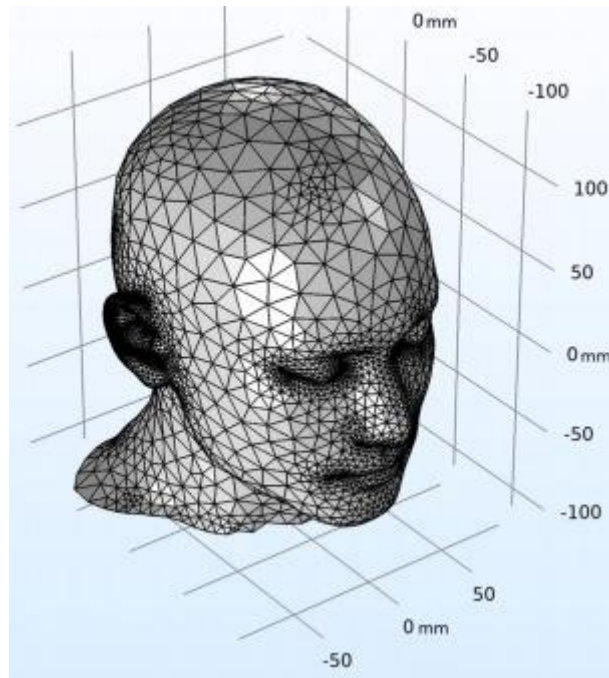
2.2 Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης συνοψίζεται στα εξής παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργία εικονικού μοντέλου: Αξιοποιώντας λογισμικά σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer aided – design, CAD), όπως το AutoCAD, σχεδιάζονται τρισδιάστατα μοντέλα των διαφόρων μερών του εκάστοτε προϊόντος. Σε περίπτωση επιθυμητής αναπαραγωγής ενός αντικειμένου που υπάρχει ήδη σε φυσική μορφή, το βήμα αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αντίστροφο μηχανισμό, χρησιμοποιώντας δηλαδή εξοπλισμό σάρωσης με laser, ώστε να ληφθεί το αρχικό σχέδιο του αντικειμένου.

2. Δημιουργία αρχείου STL: Το ψηφιακό μοντέλο μετατρέπεται σε αναγνωρίσιμο από το λογισμικό του τρισδιάστατου εκτυπωτή αρχείο. Το αρχείο STL περιγράφει, μέσω μιας σειράς

συνδεδεμένων τριγώνων, τη γεωμετρία της επιφάνειας του μοντέλου, χωρίς όμως να δίνει στοιχεία, όπως το χρώμα, η εσωτερική δομή, η αναγλυφότητα, τα οποία υπάρχουν στο αρχείο CAD. Προφανώς, όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων για την περιγραφή της επιφάνειας τριγώνων, αυξάνεται και η ανάλυση του 3D μοντέλου (Εικόνα 2.1), (Hu, 2017; O'Connor and Kennedy, 2021).



Εικόνα 2.1: Δημιουργία επιφανειακού πλέγματος (O'Connor and Kennedy, 2021)

3. Προετοιμασία αρχείου STL για τη μεταφορά στον 3D εκτυπωτή: Το μοντέλο 3D προετοιμάζεται για τον εκτυπωτή και δημιουργείται το αρχείο G – code, το οποίο μεταφέρει ουσιαστικά όλες τις απαραίτητες για την κατασκευή οδηγίες στον εκτυπωτή. Με τη βοήθεια ενός λογισμικού «τεμαχισμού», το ψηφιακό μοντέλο διαιρείται σε λεπτές εγκάρσιες διατομές (στρώματα), ορίζεται ο προσανατολισμός και η θέση των μερών του αντικειμένου στη βάση εκτύπωσης, δημιουργούνται οι βοηθητικές δομές, που είναι απαραίτητες για την υποστήριξη του αντικειμένου κατά την κατασκευή του, και ρυθμίζονται οι παράμετροι της εκτύπωσης, όπως η ταχύτητα, το πάχος στρώματος, η ποσότητα του υλικού και η θερμοκρασία.

4. Κατασκευή: Στο βήμα αυτό δεν απαιτείται συνήθως ανθρώπινη επίβλεψη. Μάλιστα, δεδομένης της υπάρχουσας τάσης για αυτοματοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών, το συγκεκριμένο πλεονέκτημα, το οποίο και προσφέρει η προσθετική κατασκευή, είναι πολύ σημαντικό.

5. Τελική επεξεργασία αντικειμένου: Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το αντικείμενο απομακρύνεται από την μηχανή και ακολουθούν περαιτέρω επεξεργασίες όπως η λείανση ή η στίλβωση (Gibson, et al., 2015).

2.3 Τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης

Βάσει της προτυποποίησης κατά ISO και ASTM, οι τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης διακρίνονται σε επτά κύριες κατηγορίες, οι οποίες είναι οι εξής:

2.3.1 Εξώθηση υλικού (Material Extrusion)

Η τεχνολογία της εξώθησης υλικού αναπτύχθηκε από τον Scott Crump το 1989 και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ως Fused Deposition Modeling (FDM) (Khosravani and Reinicke, 2020). Πλέον αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, λόγω του χαμηλού κόστους και του μικρού μεγέθους του εξοπλισμού, της υψηλής ταχύτητας, της δυνατότητας κατασκευής αντικειμένων μεγάλου όγκου και της ποικιλίας των διαθέσιμων υλικών, συμπεριλαμβανομένων των θερμοπλαστικών, των κεραμικών, του σκυροδέματος, των μετάλλων, ακόμα και των κυττάρων (Oleff, et al., 2021; Suwanpreecha and Manonukul, 2022). Η εξώθηση υλικού έχει χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα εφαρμογών, όπως η ανάπτυξη ικριωμάτων, η κατασκευή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (π.χ. αντιστάτης) και μερών αεροσκαφών (π.χ. πτερύγια στροβίλου) (Zhuo, et al., 2021). Μάλιστα, αξιοποιήθηκε και κατά τη διάρκεια της πανδημίας του COVID-19 για την παραγωγή εξοπλισμού προσωπικής προστασίας (Tareq, et al., 2021). Αναλυτικότερη παρουσίαση των εφαρμογών της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα γίνει στην Ενότητα 3.

Ο τρόπος λειτουργίας της τεχνολογίας της εξώθησης υλικού είναι ο εξής: Η κεφαλή της μηχανής τροφοδοτείται με υλικό (συνήθως πλαστικό), το οποίο βρίσκεται σε μορφή νήματος. Βέβαια έχουν αναπτυχθεί και συστήματα εξώθησης υλικού, των οποίων η τροφοδοσία έχει τη μορφή σφαιριδίων, ράβδων ή και πούδρας (Suwanpreecha and Manonukul, 2022). Επειδή η κεφαλή είναι θερμαινόμενη, το υλικό αρχίζει να τήκεται, να ρέει και να εξωθείται μέσω ενός ακροφύσιου στη βάση κατασκευής. Καθώς εναποτίθεται σε στρώματα πάχους 100 – 800 μm, ψύχεται και στερεοποιείται. Αξίζει να αναφερθεί, ότι η κεφαλή κινείται σε δύο άξονες και η βάση στον τρίτο άξονα, γεγονός που διευκολύνει την κατασκευή αντικειμένων πολύπλοκων γεωμετριών. Ωστόσο, οι πολύπλοκες γεωμετρίες πιθανό να περιλαμβάνουν και προεξοχές ή κοιλότητες, με αποτέλεσμα η ύπαρξη βοηθητικών δομών να καθίσταται απαραίτητη. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας, όπως επίσης και η «ευαλωτότητα» των μηχανικών ιδιοτήτων απέναντι σε παραμέτρους όπως η θερμοκρασία και ο προσανατολισμός εκτύπωσης. Πλέον όμως, η έρευνα προσανατολίζεται στην χρήση ενισχυμένων με άνθρακα πολυμερών που αναμένεται να ενισχύσουν την μηχανική αντοχή των παραγόμενων προϊόντων (Khosravani and Reinicke, 2020; Oleff, et al., 2021). Τέλος, ένα ακόμη πρόβλημα, που μπορεί να προκύψει κατά τη διαδικασία της εξώθησης υλικού, είναι το φράξιμο του ακροφυσίου λόγω της συσσώρευσης υπολειμμάτων υλικού. Η λύση για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η θέρμανση του ακροφυσίου στη συνιστώμενη για την εξώθηση του εκάστοτε υλικού θερμοκρασία και η εξώθηση ενός νέου νήματος, το οποίο θα συμπαρασύρει τα προσκολλημένα στο ακροφύσιο υπολείμματα (Hsiang Loh, et al., 2020).

2.3.2 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε το 1987 και αποτέλεσε μια από τις πρώτες εμπορεύσιμες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής (Singh, et al., 2021). Βασίζεται στην επιλεκτική (σύμφωνα με το αρχείο CAD) σύντηξη του υλικού, το οποίο βρίσκεται σε μορφή πούδρας και τοποθετείται σε διαδοχικά στρώμα πάχους 20 – 90 μm πάνω στη βάση κατασκευής, λόγω θερμικής ενέργειας. Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πηγή θερμότητας, υπάρχουν και διαφορετικές τεχνολογίες, οι οποίες όμως στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Οι δύο πιο διαδεδομένες τεχνολογίες είναι η Επιλεκτική Σύντηξη με Laser (Selective Laser Sintering) και η Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting). Στην πρώτη κατηγορία, η θερμοκρασία αυξάνεται σε συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας μέχρι να επιτευχθεί η σύντηξη και η ένωση των κόκκων του υλικού και να σχηματιστούν οι εγκάρσιες τομές του επιθυμητού αντικειμένου. Ωστόσο, ως υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο πολυμερή. Όσον αφορά στη δεύτερη τεχνολογία, χρησιμοποιούνται μόνο μέταλλα, η τήξη των οποίων επιτυγχάνεται μέσω της μετατροπής της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε

θερμική (Mehrpouya, et al., 2022; Vock, et al., 2019; Singh, et al., 2021). Γενικά, ως βασικά πλεονεκτήματα της PBF τεχνολογίας θεωρούνται η υψηλή ποιότητα επιφανειών, η υψηλή ακρίβεια, η απουσία βοηθητικών δόμων και άρα η γεωμετρική ελευθερία. Στα μειονεκτήματα, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνονται η χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, και το σχετικά υψηλό κόστος του εξοπλισμού (Jiménez, et al., 2019; Khosravanani and Reinicke, 2020). Οι περισσότερες εφαρμογές της συγκεκριμένης μεθόδου αφορούν τον κλάδο της ιατρικής (π.χ. εμφυτεύματα) της αεροδιαστημικής (π.χ. εγχυτήρας καυσίμου), της αυτοκινητοβιομηχανίας (π.χ. μεταλλικές ζάντες), καθώς και τη βιομηχανία της μόδας (π.χ. ρολόγια ή κοσμήματα) (Singh, et al., 2020; Chakraborty and Biswas, 2020).

2.3.3 Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)

Η τεχνολογία του φωτοπολυμερισμού αναπτύχθηκε από τον Charles (Chuck) Hull στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και στηρίζεται στη σκλήρυνση και τη στερεοποίηση φωτοευαίσθητων ρευστών πολυμερών, που λαμβάνουν χώρα παρουσία φωτός (Khosravanani and Reinicke, 2020). Πιο συγκεκριμένα, στη διαδικασία του φωτοπολυμερισμού, ένα φωτοπολυμερές, ρευστής μορφής, αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή, η οποία ακτινοβολείται με υπεριώδες ή ορατό φως. Στην ίδια δεξαμενή βρίσκεται βυθισμένη και η βάση εκτύπωσης (Zhang, et al., 2021). Όταν το υλικό εκτεθεί στο φως, ξεκινάει μια σειρά αντιδράσεων πολυμερισμού, που καταλήγει στον σχηματισμό μακρομορίων και τη δημιουργία ισχυρών μεταξύ τους χημικών δεσμών, οδηγώντας στη στερεοποίηση του υλικού. Έτσι, διαμορφώνονται διαδοχικά στρώματα ρητίνης, όπως αυτά υπαγορεύονται από το αρχείο STL (Pagac, et al., 2021). Μάλιστα, επειδή η παραπάνω διαδικασία μεταβάλλει τις χημικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, αυτό δεν μπορεί να επανέλθει στην προηγούμενή του κατάσταση, να γίνει δηλαδή ξανά ρευστό (Bozkurt and Karayel, 2021). Όταν ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το αντικείμενο αφαιρείται από τη δεξαμενή. Ο φωτοπολυμερισμός έχει χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα εφαρμογών, όπως είναι η κατασκευή ικριωμάτων, ακουστικών βαρυκοΐας, ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (π.χ. αισθητήρες γλυκόζης αίματος), υποδημάτων και κοσμημάτων (Pagac, et al., 2021). Σημαντικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η κατασκευή αντικειμένων υψηλής ακρίβειας, ανάλυσης και ποιότητας, η επίτευξη λείων επιφανειών και άρα η αποφυγή επιπλέον επεξεργασίας, καθώς και η υψηλή ταχύτητα. Ωστόσο, η αδυναμία χρήσης και διαφορετικών υλικών εκτός των φωτοπολυμερών, η ευθραστότητα και η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων με την πάροδο του χρόνου αποτελούν σημαντικούς περιορισμούς, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή της VP τεχνολογίας (Khosravanani and Reinicke, 2020). Τέλος αξίζει να αναφερθεί, ότι όταν το υλικό εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία προερχόμενη από laser, τότε η τεχνολογία ονομάζεται Στερεολιθογραφία (Stereolithography). Υπάρχει, ωστόσο και η τεχνολογία της Ψηφιακής Επεξεργασίας Φωτός (Digital Light Processing), κατά την οποία το φως προέρχεται από έναν προβολέα. Ο προβολέας εμφανίζει την εικόνα του τρισδιάστατου μοντέλου πάνω από τη δεξαμενή και έτσι εκτίθενται στο φως του μόνο τα σημεία που πρέπει να πολυμεριστούν και να στερεοποιηθούν. Συγκρίνοντας τις δύο αυτές τεχνολογίες, συμπεραίνεται, ότι η Στερεολιθογραφία προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με την DLP τεχνολογία, καθώς στην τελευταία η ακρίβεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανάλυση του προβολέα. Ωστόσο, η DLP εξασφαλίζει μεγαλύτερη ταχύτητα, αφού όλες οι περιοχές του στρώματος εκτίθενται ταυτόχρονα στο φως, αντί να σαρώνονται διαδοχικά με laser (Pagac, et al., 2021).

2.3.4 Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)

Κατά τη διεργασία της κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας χρησιμοποιείται μια πηγή θερμικής ενέργειας, συνήθως laser ή δέσμη ηλεκτρονίων, με στόχο την τήξη του υλικού τροφοδοσίας, καθώς αυτό εναποτίθεται στην βάση κατασκευής (Ahn, 2021). Τα συνηθέστερα

χρησιμοποιούμενα υλικά είναι τα μέταλλα και τα υβρίδια αυτών, σε μορφή πούδρας ή σύρματος, ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κεραμικά ή πολυμερή (Shahrubudin, et al., 2019). Γενικά, παρά τα πλεονεκτήματα της εναπόθεσης με σύρμα (λιγότερη απώλεια υλικού), προτιμάται η πούδρα, καθώς το σύρμα δε διευκολύνει την κατασκευή αντικειμένων πολύπλοκων γεωμετριών και αυξάνει την τραχύτητα των επιφανειών (Saboori, et al., 2019). Αν και η DED τεχνολογία θυμίζει την PBF τεχνολογία, διαφέρουν, καθώς στη δεύτερη το υλικό τήκεται αφού έχει τοποθετηθεί στη βάση, ενώ στην πρώτη η τήξη γίνεται κατά την εναπόθεσή του. Στην DED τεχνολογία δηλαδή, η αρχική ποσότητα (το πρώτο στρώμα) υλικού τήκεται καθώς εναποτίθεται στη βάση, δημιουργώντας μια «λίμνη» τήγματος, η οποία στη συνέχεια ψύχεται με ρυθμό που κυμαίνεται μεταξύ $10^3 - 10^5$ °C/s και τελικά στερεοποιείται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο (Ahn, 2021). Επιπλέον, σε αντίθεση με την εξώθηση υλικού, το ακροφύσιο που τροφοδοτεί το υλικό στηρίζεται σε έναν βραχίονα που κινείται σε πολλούς άξονες, ενώ παράλληλα κινείται και η πηγή θερμότητας, γεγονός που προσδίδει μεγαλύτερη ελευθερία στον σχεδιασμό (Khosravanian and Reinicke, 2020).

Η τεχνολογία κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας αποτελεί ιδανική επιλογή για επιδιόρθωση ή προσθήκη επιπλέον υλικού σε ήδη υπάρχοντα αντικείμενα, λόγω χαμηλής εισροής θερμότητας και άρα αποφυγής σχηματισμού παραμενουσών τάσεων, που οδηγούν σε παραμορφώσεις (Saboori, et al., 2019). Επιπλέον, επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός ελέγχου της μικροδομής (δεδομένης της δυνατότητας αλλαγής της σύνθεσης του μίγματος τροφοδοσίας και του ρυθμού στερεοποίησης), με αποτέλεσμα την παραγωγή προϊόντων καλύτερης ποιότητας και βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων, γεγονός που δικαιολογεί την προτίμηση της τεχνολογίας σε κλάδους όπως η αεροδιαστημική (π.χ. πτερύγια στροβίλου). Παράλληλα, η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας επιτρέπει την κατασκευή αντικειμένων μεγάλου όγκου και έτσι υπερέρχει της PBF τεχνολογίας ως προς το σημείο αυτό. Επίσης, το φάσμα των διαθέσιμων υλικών είναι αρκετά ευρύ, συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες. Στα μειονεκτήματα, από την άλλη πλευρά, ανήκουν η ανάγκη για ύπαρξη βοηθητικών δομών, η περιορισμένη δυνατότητα ανακύκλωσης της χρησιμοποιούμενης πούδρας, και η υψηλή τραχύτητα των επιφανειών, που καθιστά την επιπλέον επεξεργασία μετά την εκτύπωση απαραίτητη (Svetlizky, et al., 2021).

2.3.5 Εκτόξευση συνδετικού μέσου (Binder jetting)

Η τεχνολογία εκτόξευσης συνδετικού μέσου αναπτύχθηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 1990 στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο Μασαχουσέτης (MIT). Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο υλικά, ένα υλικό (μέταλλο, κεραμικό ή πολυμερές), που βρίσκεται σε μορφή πούδρας και από το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί το εκάστοτε αντικείμενο και ένα συνδετικό υλικό, υγρής μορφής, που θα ενώνει τα διαδοχικά στρώματα πούδρας. Κατά την διαδικασία εκτύπωσης τοποθετείται στην κινητή βάση κατασκευής ένα στρώμα πούδρας, πάχους 30 – 200 μm, και στη συνέχεια εκτοξεύεται από την κεφαλή εκτύπωσης μία ποσότητα συνδετικού υλικού στο σημείο και τη χρονική στιγμή που απαιτείται, στοιχεία που υπαγορεύονται από το αρχείο STL. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο (Konda, et al., 2017). Σημαντικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η απουσία βοηθητικών δομών, αφού η ίδια η σκόνη που απομένει ασκεί τον ρόλο αυτό, η δυνατότητα έγχρωμης εκτύπωσης και κατασκευής μεγάλου όγκου αντικειμένων, καθώς και η ανακύκλωση της εναπομείνουσας πούδρας. Δεδομένου ότι η εκτύπωση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία δωματίου και συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, αποφεύγονται φαινόμενα οξείδωσης, σχηματισμού παραμενουσών τάσεων ή αλλαγών φάσεων και έτσι το υλικό τροφοδοσίας μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, παρόλο που ο απαραίτητος για την εκτύπωση χρόνος είναι μικρός, και μάλιστα μπορεί να μειωθεί περαιτέρω αυξάνοντας τον αριθμό των οπών της κεφαλής εκτύπωσης, το γεγονός ότι στο τέλος της διαδικασίας απαιτείται επιπλέον

επεξεργασία (π.χ. απομάκρυνση περίσσειας σκόνης και συνδετικού υλικού, φινίρισμα κ.ά.) καθιστούν την τεχνολογία αυτή συνολικά χρονοβόρα. Επίσης, η χρήση συνδετικού μέσου πιθανό να οδηγεί σε αύξηση του πορώδους των παραγόμενων αντικειμένων, χαρακτηριστικό το οποίο δεν επιτρέπει την αξιοποίησή τους σε τομείς όπως η αεροδιαστημική ή η αυτοκινητοβιομηχανία. Δύο ακόμα μειονεκτήματα της εκτόξευσης συνδετικού μέσου είναι η χαμηλή ακρίβεια (ως προς τις διαστάσεις) και η υψηλή τραχύτητα των επιφανειών των παραγόμενων προϊόντων (Mostafaei, et al., 2021; Kumar, et al., 2017; Bozkurt and Karayel, 2021; Konda, et al., 2017). Τέλος, αν και η κύρια χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας ήταν η κατασκευή κεραμικών μητρώων έγχυσης, τα τελευταία πέντε χρόνια έχουν αρχίσει να κατασκευάζονται διάφορα εξαρτήματα και προϊόντα, όπως είναι τα οδοντικά εμφυτεύματα, τα φίλτρα ραδιοσυχνότητας, οι κεραίες και τα κοσμήματα (Ziaee and Crane, 2019; Du, et al., 2020).

2.3.6 Εκτόξευση υλικού (Material jetting)

Η τεχνολογία εκτόξευσης υλικού είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και αρκετά παρόμοια με τη δισδιάστατη εκτύπωση. Μια σειρά από ακροφύσια εναποθέτουν επιλεκτικά υλικό, σε μορφή υγρών σταγονιδίων, στη βάση κατασκευής, το οποίο στη συνέχεια στερεοποιείται και σκληραίνει από μια πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι οι φωτοσκληρυνόμενες ρητίνες (πολυμερή) και οι κηρώδεις πρώτες ύλες, ενώ το πάχος του κάθε στρώματος κυμαίνεται μεταξύ 10 – 100 μm. Το μικρό αυτό πάχος οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων υψηλής ακρίβειας και λείων επιφανειών και αποτελεί το σημαντικότερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας, αφού μειώνει τις ανάγκες για περαιτέρω επεξεργασία. Μάλιστα, η υψηλή ακρίβεια που επιτυγχάνεται, καθιστά την εκτόξευση υλικού ιδανική τεχνολογία για ιατρικές εφαρμογές. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η κατασκευή χειρουργικών ναρθηκών, οι οποίοι επιτρέπουν την ακριβή τοποθέτηση των οδοντικών εμφυτευμάτων, καθώς και η κατασκευή ανατομικών μοντέλων για εκπαιδευτικούς λόγους. Η εκτόξευση υλικού χρησιμοποιείται, επίσης, για την παραγωγή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, όπως είναι οι πυκνωτές και τα τρανζίστορ. Στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας, ωστόσο, περιλαμβάνονται το υψηλό κόστος, η χαμηλή ταχύτητα (λόγω του μικρού πάχους στρώματος), ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων υλικών και η ανάγκη για βοηθητικές δομές. Επιπλέον, χαρακτηριστικό των χρησιμοποιούμενων ρητινών είναι η υψηλή ευθραστότητα, γεγονός που οδηγεί στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων (Bozkurt and Karayel, 2021; Khosravani and Reinicke, 2020; Gülcan, et al., 2021).

2.3.7 Συγκόλληση Φύλλων (Sheet Lamination)

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύχθηκε το 1991 και χρησιμοποιείται για την κατασκευή αντικειμένων μέσω συγκόλλησης στρωμάτων υλικού, τα οποία βρίσκονται σε μορφή φύλλων. Ως υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέταλλα, πολυμερή, χαρτί και κεραμικά. Διακρίνονται δύο υποκατηγορίες της τεχνολογίας, η Laminated Object Manufacturing και η Ultrasonic Additive Manufacturing. Στην πρώτη περίπτωση κάθε φύλλο υλικού, το οποίο αναπαριστά μια εγκάρσια τομή του αντικειμένου, είναι επικαλυμμένο με κολλητική ουσία, η οποία το συνδέει με το επόμενο φύλλο. Στην συνέχεια, μια κεφαλή laser κόβει τη νέα διατομή που έχει σχηματιστεί, σύμφωνα με τις οδηγίες του αρχείου STL. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί το επιθυμητό αντικείμενο. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση, τοποθετείται αρχικά το πρώτο φύλλο στη βάση κατασκευής και όταν το δεύτερο έρθει σε επαφή με το πρώτο, η κεφαλή συγκόλλησης της μηχανής (sonotrode) υποβάλλει το δεύτερο φύλλο σε ταλάντωση με υπερηχητική συχνότητα, προκαλώντας τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στο φύλλο και τελικά την συγκόλληση. Στο τέλος, μια μηχανή κοπής, που ελέγχεται από τον υπολογιστή, αφαιρεί την περίσσεια υλικού, ώστε το αντικείμενο να αποκτήσει το επιθυμητό

σχήμα (Zhang, et al., 2018; Kamran and Saxena, 2016). Σημαντικά πλεονεκτήματα της SL τεχνολογίας αποτελούν το χαμηλό κόστος, η υψηλή ταχύτητα, ο εύκολος χειρισμός των υλικών, η δυνατότητα έγχρωμης εκτύπωσης καθώς και η δυνατότητα ανακύκλωσης της περίσσειας υλικού. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή δεν ενδείκνυται για πολύπλοκες γεωμετρίες και δεν επιτυγχάνει εκτύπωση υψηλής ανάλυσης (Shahrubudin, et al., 2019; Khosravanian and Reinicke, 2020). Αν και προς το παρόν οι εφαρμογές της συγκόλλησης φύλλων είναι περιορισμένες, έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την κατασκευή τρισδιάστατων τοπογραφικών χαρτών, ανατομικών μοντέλων, καθώς και μητρών χύτευσης, αφού χάρη στη δυνατότητα αφαίρεσης του υλικού με την CNC μηχανή επιτρέπει την εύκολη δημιουργία κοιλοτήτων εντός των μεταλλικών εξαρτημάτων (Gibson, et al., 2021; Szymczyk-Ziółkowska, et al., 2020).

2.4 Υλικά

Γενικά, στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά υλικά. Βέβαια, το είδος και η μορφή του υλικού που τελικά θα επιλεγεί καθορίζεται από την τεχνολογία που θα εφαρμοστεί. Όσον αφορά στη μορφή, το υλικό μπορεί να είναι σε πούδρα, σε φύλλα, σε νήματα ή και ρευστό. Η διάκριση των υλικών, ωστόσο, αφορά κυρίως στο είδος τους, με τις συνηθέστερες κατηγορίες να είναι οι εξής:

2.4.1 Πολυμερή

Τα πολυμερή είναι τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα στην τρισδιάστατη εκτύπωση υλικά. Διακρίνονται για το χαμηλό κόστος, τις καλές μηχανικές ιδιότητες και την υψηλή διαθεσιμότητά τους. Στα υλικά αυτά περιλαμβάνονται τα συμπολυμερή ABS (ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου), το νάιλον, το πολυγαλακτικό οξύ ή αλλιώς PLA, το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), το πολυανθρακικό πολυμερές (PC) και άλλα. Από αυτά, τα πιο δημοφιλή είναι το συμπολυμερές ABS λόγω της οικονομικής και εύκολης παραγωγής του, των καλών μηχανικών ιδιοτήτων και της δυνατότητας ανακύκλωσής τους, ενώ ευρέως χρησιμοποιούμενο είναι και το PLA. Το PLA είναι ένα βιοαποικοδομήσιμο υλικό, προερχόμενο από πηγές όπως το ζαχαροκάλαμο ή το καλαμπόκι και παρουσιάζει και αυτό καλές μηχανικές ιδιότητες. Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής που αξιοποιούν αυτού του είδους τα υλικά είναι κυρίως η εναπόθεση τηγμένου υλικού (FDM) και η στερεολιθογραφία (SLA), ενώ οι εφαρμογές τους αφορούν συνήθως τους κλάδους της υγειονομικής περίθαλψης, της αεροπορικής βιομηχανίας, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της βιομηχανίας ηλεκτρονικών ειδών (Bhatia and Sehgal, 2021).

2.4.2 Μέταλλα

Δύο από τις κυρίαρχες τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η σύντηξη πούδρας σε κλίνη (PBF) και η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (DED) χρησιμοποιούν ως υλικά μέταλλα και κράματα αυτών, λόγω των εξαιρετικών μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων τους (Bourell, et al., 2017; Singh, et al., 2020). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα κράματα κοβαλτίου, τα κράματα τιτανίου, τα κράματα νικελίου και ο ανοξείδωτος χάλυβας. Τα κράματα κοβαλτίου είναι κατάλληλα για την παραγωγή οδοντιατρικών εμφυτευμάτων λόγω της υψηλής ειδικής δυσκαμψίας και της αντοχής τους στη φθορά. Τα κράματα τιτανίου, από την άλλη πλευρά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο στην ιατρική αλλά και στον κλάδο της αεροδιαστημικής, χάρη στην υψηλή αντίσταση στην οξείδωση και τη διάβρωση, τη χαμηλή πυκνότητα και την υψηλή θερμική αντοχή. Παρόμοιες ιδιότητες, δηλαδή υψηλή αντοχή στη διάβρωση και θερμική αντοχή (έως 1200 °C) έχουν και τα κράματα νικελίου, οπότε και ενδείκνυται η χρήση τους σε εφαρμογές της αεροδιαστημικής (Shahrubudin, et al., 2019; Singh,

et al., 2020). Τέλος, στην αγορά της προσθετικής κατασκευής διατίθενται και μέταλλα όπως ο χαλκός, ο χρυσός και το ασήμι (Bhatia and Sehgal, 2021).

2.4.3 Κεραμικά

Τα κεραμικά υλικά διακρίνονται για την υψηλή σκληρότητα, την θερμική αντίσταση και την ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Οι ιδιότητες αυτές τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογές στους τομείς της οδοντιατρικής, της ανάπλασης οστών και της αεροδιαστημικής (Bhatia and Sehgal, 2021). Ωστόσο, το υψηλό σημείο τήξης τους, η ευθραστότητα και η εύκολη διάδοση ρωγμών αποτελούσαν σημαντικές προκλήσεις για τη χρήση τους στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Πλέον οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής μπορούν να παράγουν κεραμικά αντικείμενα χωρίς ρωγμές ή μεγάλο πορώδες μέσω της ανάμιξης των κεραμικών με συνδετικά υλικά χαμηλού σημείου τήξης, της ενσωμάτωσης εργασιών πύκνωσης μετά την εκτύπωση, της βελτιστοποίησης των παραμέτρων (π.χ. ταχύτητα) της διαδικασίας και της ανάπτυξης ειδικά σχεδιασμένων για την επεξεργασία κεραμικών υλικών μηχανών. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα κεραμικά είναι η ζirkονία και η αλουμίνα, η οποία μάλιστα διακρίνεται και για το χαμηλό της κόστος, ενώ οι τεχνολογίες που ενδείκνυνται για τη χρήση κεραμικών είναι η εξώθηση υλικού, η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας, η εκτόξευση συνδετικού μέσου και η συγκόλληση φύλλων (Lee, et al, 2017; Lakhdar, et al., 2021; Bourell, et al., 2017).

2.4.4 Σύνθετα Υλικά

Τα σύνθετα υλικά προκύπτουν από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών, διαφορετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων και οι ιδιότητες που παρουσιάζουν είναι καλύτερες συγκριτικά με τις μεμονωμένες ιδιότητες των συστατικών υλικών τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, τα πολυμερή ενισχυμένα με γυαλί, τα σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα και τα σύνθετα υλικά με κεραμική μήτρα (Bhatia and Sehgal, 2021; Bourell, et al., 2017). Τα πολυμερή με ίνες άνθρακα αξιοποιούνται ιδιαίτερα στην αεροδιαστημική λόγω του συνδυασμού υψηλής ακαμψίας, αντίστασης στη διάβρωση και χαμηλού βάρους (Shahrubudin, et al., 2019). Τα πολυμερή με ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται επίσης σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των κλάδων των ηλεκτρονικών ειδών (π.χ. πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος) και της αυτοκινητοβιομηχανίας (π.χ. πλαίσια αμαξώματος), όχι μόνο λόγω της υψηλής μηχανικής και θερμικής αντοχής, αλλά και του χαμηλού βάρους και κόστους τους (Sathishkumar, et al., 2014; Shahrubudin, et al., 2019). Ευρεία εφαρμογή παρουσιάζουν και τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, καθώς λόγω θερμικών (π.χ. χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής) και μηχανικών ιδιοτήτων (π.χ. υψηλή αντοχή) χρησιμοποιούνται σε διαστημικά λεωφορεία, ηλεκτρονικά υποστρώματα και αυτοκίνητα. Παράλληλα, οι ιδιότητες που προσφέρουν, όπως το χαμηλό βάρος, η ικανότητα απορρόφησης κραδασμών και η υψηλή αντοχή, τα καθιστούν κατάλληλα και για εφαρμογές στον τομέα του αθλητισμού, π.χ. ρακέτα γκολφ, ποδήλατο (Sreejith and Rajeev, 2021; Bahl, 2021). Τέλος, όσον αφορά στις τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η εξώθηση υλικού, η επιλεκτική σύντηξη με laser και η στερεολιθογραφία είναι από εκείνες που δύνανται να χρησιμοποιήσουν σύνθετα υλικά (Bhatia and Sehgal, 2021).

2.4.5 Έξυπνα Υλικά

Ως έξυπνα υλικά ορίζονται τα υλικά που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν με την πάροδο του χρόνου το σχήμα και το μέγεθός τους σύμφωνα με τα εξωτερικά ερεθίσματα που λαμβάνουν (π.χ. αλλαγή της έντασης του φωτός ή της θερμοκρασίας). Μπορούν να συμπεριληφθούν και στα υλικά της 4D εκτύπωσης, στην οποία η τέταρτη διάσταση είναι ο

χρόνος (Shahrubudin, et al., 2019). Παράδειγμα έξυπνων υλικών αποτελούν τα κράματα νικελίου – τιτανίου μνήμης μορφής, τα οποία είναι ιδανικά για τη δημιουργία εμφυτευμάτων, την υποκατάσταση μυών ρομποτικών βραχιόνων, την παραγωγή θερμικά ενεργοποιούμενων διακοπών κυκλώματος ή βαλβίδων, και θερμοστατών κυκλωμάτων ψύξης αυτοκινήτων. Μάλιστα υπάρχουν εφαρμογές και στην αεροδιαστημική, αφού η Boeing ανέπτυξε μια συσκευή με ενεργοποιητές από κράματα μνήμης μορφής, η οποία συνέβαλε στη μείωση του θορύβου κατά την απογείωση. Παράλληλα, ερευνάται και η δημιουργία πτερυγίων με ενσωματωμένους ενεργοποιητές, κατασκευασμένους από έξυπνα υλικά, που θα επιτρέπουν την αλλαγή του προφίλ των πτερυγίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της αεροδυναμικής τους επίδοσης (Jani, et al., 2014; Sharma, et al., 2015). Στα έξυπνα υλικά περιλαμβάνονται και τα πολυμερή μνήμης μορφής, τα οποία χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση οργάνων, που προσαρμόζουν το σχήμα τους όταν εισάγονται στο ανθρώπινο σώμα (Ashima, et al., 2021). Τέλος, οι τεχνολογίες που είναι κατάλληλες για χρήση έξυπνων υλικών είναι η εξώθηση υλικού, η επιλεκτική σύντηξη με laser, η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων και η στερεολιθογραφία (Bhatia and Sehgal, 2021).

2.4.6 Άλλα Υλικά

Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τρισδιάστατη εκτύπωση δεν περιορίζονται μόνο στα πολυμερή, τα μέταλλα, τα κεραμικά, τα σύνθετα και τα έξυπνα υλικά. Είναι δυνατή η χρήση ξύλου και γυαλιού, η εκτύπωση κατασκευών, όπως γέφυρες ή κτίρια, από δομικά υλικά, με κυρίαρχο το σκυρόδεμα, αλλά και η αξιοποίηση βρώσιμων υλικών, όπως η σοκολάτα και τα ζυμαρικά, σε μορφή πάστας ή πούδρας (Bhatia and Sehgal, 2021). Τέλος, υπάρχουν τα υλικά που λειτουργούν ως συγκολλητικές επιστρώσεις και τα συνδεδεμένα υλικά (π.χ. εποξικές ρητίνες) στις τεχνολογίες της συγκόλλησης φύλλων και της εκτόξευσης συνδεδετικού μέσου, αντίστοιχα (Bourell, et al., 2017).

2.5 Επισκόπηση

Στον Πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2.1) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα υλικά, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και οι κλάδοι εφαρμογών των επτά τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Βέβαια, οι τεχνολογίες αυτές δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή τελικών προϊόντων και εξαρτημάτων, αλλά και για την ταχεία παραγωγή εργαλείων, μητρών και προτύπων. Μάλιστα, οι τεχνολογίες που αξιοποιούνται συχνότερα στην ταχεία προτυποποίηση είναι η σύντηξη πούδρας σε κλίσης, η εξώθηση υλικού, ο φωτοπολυμερισμός, η εκτόξευση συνδεδετικού μέσου και η συγκόλληση φύλλων. Η πρώτη τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής προϊόντων υψηλής ακρίβειας και ποιότητας, ενώ οι υπόλοιπες διακρίνονται για τον σύντομο χρόνο εκτύπωσης (Rosochowski and Matuszak, 2000).

Πίνακας 2.1: Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, υλικά, πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και εφαρμογές.

Τεχνολογία	Υλικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές
Εξώθηση υλικού	<ul style="list-style-type: none"> • Πολυμερή • Κεραμικά • Σκυρόδεμα • Μέταλλα • Σύνθετα υλικά 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος • Μικρός μέγεθος εξοπλισμού • Υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης • Κατασκευή αντικειμένων μεγάλου όγκου 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαραίτητες βοηθητικές δομές • Υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες • Υψηλή τραχύτητα επιφανειών 	<ul style="list-style-type: none"> • Ιατρική • Αεροναυπηγική • Αυτοκινητοβιομηχανία • Ηλεκτρονικά εξαρτήματα • Έργα υποδομής
Σύντηξη πούδρας σε κλίνη	<ul style="list-style-type: none"> • Πολυμερή • Μέταλλα • Σύνθετα υλικά 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ποιότητα επιφανειών • Υψηλή ακρίβεια • Απουσία βοηθητικών δομών 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης • Υψηλή κατανάλωση ενέργειας • Υψηλό κόστος εξοπλισμού 	<ul style="list-style-type: none"> • Ιατρική • Αεροναυπηγική • Αυτοκινητοβιομηχανία • Έργα υποδομής • Μόδα
Φωτοπολυμερισμός	<ul style="list-style-type: none"> • Φωτοπολυμερή • Σύνθετα υλικά 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ποιότητα επιφανειών • Υψηλή ακρίβεια • Υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένη ποικιλία υλικών • Μεταβολή ιδιοτήτων με την πάροδο του χρόνου • Ευθραστότητα προϊόντων • Απαραίτητες βοηθητικές δομές 	<ul style="list-style-type: none"> • Ιατρική • Ηλεκτρονικά εξαρτήματα • Μόδα
Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας	<ul style="list-style-type: none"> • Μέταλλα (κυρίως) • Κεραμικά • Πολυμερή 	<ul style="list-style-type: none"> • Βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες • Κατασκευή αντικειμένων μεγάλου όγκου 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή τραχύτητα επιφανειών • Απαραίτητες βοηθητικές δομές • Αδυναμία ανακύκλωσης τροφοδοσίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Αεροδιαστημική - Επιδιόρθωση μεγάλων μεταλλικών εξαρτημάτων υψηλής αξίας
Εκτόξευση υλικού	<ul style="list-style-type: none"> • Πολυμερή • Κερί 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ποιότητα επιφανειών • Υψηλή ακρίβεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος • Χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης • Απαραίτητες βοηθητικές δομές • Ευθραστότητα προϊόντων 	<ul style="list-style-type: none"> • Ιατρική • Ηλεκτρονικά εξαρτήματα
Εκτόξευση συνδετικού μέσου	<ul style="list-style-type: none"> • Πολυμερή • Μέταλλα • Κεραμικά 	<ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα ανακύκλωσης τροφοδοσίας • Κατασκευή αντικειμένων μεγάλου όγκου • Υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης • Απουσία βοηθητικών δομών 	<ul style="list-style-type: none"> • Πολλά στάδια μετεπεξεργασίας • Χαμηλή ακρίβεια • Υψηλή τραχύτητα επιφανειών • Κατασκευή αντικειμένων μεγάλου πορώδους 	<ul style="list-style-type: none"> • Ιατρική • Μόδα • Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

<p>Συγκόλληση φύλλων</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Πολυμερή • Χαρτί • Μέταλλα • Κεραμικά 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης • Χαμηλό κόστος • Δυνατότητα ανακύκλωσης τροφοδοσίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Εκτύπωση χαμηλής ανάλυσης • Δεν ενδείκνυται για πολύπλοκες γεωμετρίες 	<ul style="list-style-type: none"> • Ιατρική • Τρισδιάστατοι τοπογραφικοί χάρτες
--------------------------	--	---	--	--

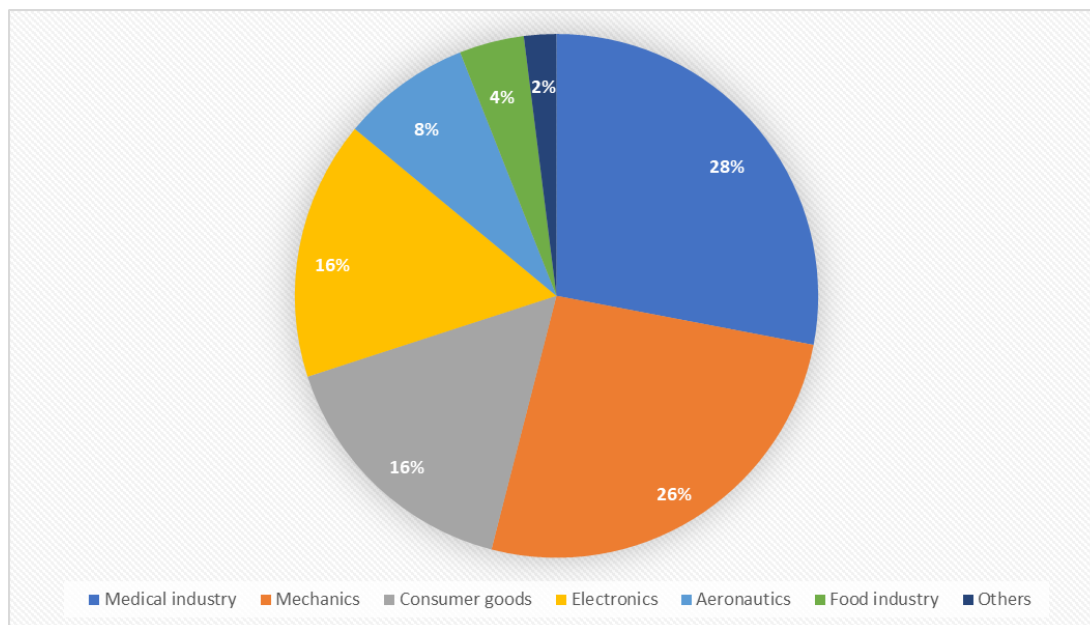
2.6 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρόλο που η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί ένα νέο σχετικά επιστημονικό πεδίο, αναπτύσσεται ταχύτατα, γεγονός που αποδεικνύεται και από τη συνεχή αύξηση των αντίστοιχων δημοσιεύσεων. Οι περισσότερες εξ αυτών αφορούν τις διαφορετικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, σε αντίθεση με τα υλικά, τα οποία έχουν εξετασθεί λιγότερο. Όσον αφορά στις τεχνολογίες, εκείνες που έχουν μελετηθεί εκτενέστερα, λόγω της δυνατότητας αξιοποίησης τους σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, είναι η εξώθηση υλικού, η σύντηξη πούδρας σε κλίνη και ο φωτοπολυμερισμός. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα κάποια σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Παράδειγμα αποτελεί η μελέτη του τρόπου επίδρασης των παραμέτρων του συστήματος (π.χ. ταχύτητα, πάχος στρώματος, θερμοκρασία κεφαλής κ.ά) στην ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, με στόχο τη βελτιστοποίηση της διεργασίας. Συγχρόνως, πρέπει να αναπτυχθούν προηγμένες μέθοδοι βελτιστοποίησης της τοπολογίας (προσδιορισμός μεγέθους, σχήματος, διάταξης δομικών στοιχείων και τρόπου σύνδεσης), ώστε να σχεδιάζονται εξαρχής δομές υψηλής επίδοσης και χαμηλού βάρους. Ένα άλλο πεδίο, στο οποίο δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση είναι η προσομοίωση διεργασιών για την καλύτερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς της διεργασίας. Τα ευρήματα της προσομοίωσης θα συμβάλουν στην κατανόηση φυσικών μηχανισμών, που δεν μπορούν να παρατηρηθούν κατά τη διάρκεια ενός πειράματος (π.χ. πώς, στην περίπτωση της PBF τεχνολογίας, οι ιδιότητες των σωματιδίων της πούδρας και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση τους θα επηρεάσουν αρχικά τον σχηματισμό του πρώτου στρώματος σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνέχεια τις ιδιότητες του παραγόμενου προϊόντος). Σημαντική, επίσης, για την ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων είναι η ενσωμάτωση συστημάτων ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο. Για να γίνει ωστόσο αυτό, θα πρέπει πρώτα να μελετηθούν τα στρώματα μεμονωμένα και να εντοπιστούν ελαττώματα σε αυτό το επίπεδο. Επιπλέον, παρόλο που μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης τα αντικείμενα κατασκευάζονται σε ένα μόνο βήμα, συνήθως απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για τη μείωση της τραχύτητας των επιφανειών. Η αύξηση της ποιότητας των εκτυπωμένων επιφανειών ή εναλλακτικά η αύξηση του βαθμού αυτοματισμού των εργασιών φινιρίσματος, οι οποίες έως τώρα γίνονται χειρωνακτικά, αποτελούν μια ακόμη πρόταση για μελλοντική έρευνα. Τέλος, ένα ακόμη ερευνητικό πεδίο θα μπορούσε να είναι η μελέτη και ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων, που συνδυάζουν διαφορετικές τεχνολογίες (π.χ. εξώθηση και εκτόξευση υλικού), ώστε να μετριάζονται τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει οποιαδήποτε τεχνολογία μεμονωμένα.

Ιδιαίτερη σημασία ωστόσο πρέπει να δοθεί και στην ανάπτυξη νέων υλικών, ώστε να υπάρχουν περισσότερες επιλογές ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής και την τεχνολογία που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η χρήση πολυμερών, μετάλλων και κεραμικών σε εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αναλυθεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, ενώ πλέον παρατηρείται μια τάση προς τα έξυπνα υλικά και την εκτύπωση τεσσάρων διαστάσεων. Επιπλέον, ερευνάται η χρήση διαφορετικών υλικών στην ίδια διαδικασία εκτύπωσης, παρόλο που έτσι καθίσταται το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ιδιαίτερα δύσκολο. Μια ακόμη πρόταση, που στοχεύει στον σχηματισμό καλύτερης εικόνας σχετικά με την επίδραση των ιδιοτήτων των υλικών στη συμπεριφορά της διεργασίας και την ποιότητα του τελικού προϊόντος, θα μπορούσε να είναι η δημιουργία μεγάλων βάσεων δεδομένων που θα περιλαμβάνουν όλες τις ιδιότητες των Α' υλών, των τελικών προϊόντων και τα χαρακτηριστικά των διεργασιών, έτσι ώστε μέσω στατιστικών μεθόδων να εξαγονται σχέσεις μεταξύ φυσικών μεγεθών, που θα διευκολύνουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της διεργασίας. Τέλος, η έλλειψη προτύπων είναι ένα κενό που πρέπει να καλυφθεί άμεσα και το οποίο αναδείχτηκε ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της πανδημίας του COVID-19, όταν η τήρηση των ίδιων προδιαγραφών με τις συμβατικές μεθόδους για την παραγωγή εξοπλισμού (π.χ. μάσκες προσώπου, στυλεό λήψης φαρυγγικού επιχρίσματος) περιόρισε σημαντικά τους κατασκευαστές στην επιλογή των υλικών.

3. ΚΛΑΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η βιομηχανία τροφίμων, μόδας και ηλεκτρονικών ειδών. Ωστόσο, ο κλάδος στον οποίο συναντώνται οι περισσότερες εφαρμογές είναι η ιατρική (Pravin and Sudhir, 2018).



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα πίτας - εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Pravin and Sudhir, 2018).

3.1. Ιατρική

Οι περισσότερες εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης αφορούν τον κλάδο της ιατρικής. Η δημιουργία ιατρικού εξοπλισμού (π.χ. στηθοσκόπιο), ακουστικών βαρυκοΐας, εμφυτευμάτων και προσθετικών μελών είναι μόνο μερικά παραδείγματα. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, η τρισδιάστατη εκτύπωση παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων εμφυτευμάτων ή προσθετικών μελών, πλήρως προσαρμοσμένων στον εκάστοτε χρήστη, υψηλής ακρίβειας διαστάσεων, σε πραγματικό χρόνο και χαμηλό κόστος. Το χαμηλό κόστος είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα προσθετικά μέλη άκρων που προορίζονται για παιδιά, αφού λόγω της ανάπτυξής τους, θα χρειάζονται συνεχώς καινούρια. Η προσπάθεια διατήρησης του χαμηλού κόστους, οδήγησε μάλιστα σε πρωτοβουλίες όπως η δημιουργία της e-NABLE, μιας κοινότητας εθελοντών μηχανικών, σχεδιαστών, κατασκευαστών και επιστημόνων υγείας που με τη βοήθεια λογισμικού ανοιχτού κώδικα σχεδιάζουν και εκτυπώνουν δωρεάν προσθετικά μέλη άνω άκρων (Dodziuk, 2016). Όσον αφορά στην προσαρμογή του μεγέθους και του σχήματος των εμφυτευμάτων, αυτή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια τεχνικών απεικόνισης όπως η ακτινογραφία, η αξονική και η μαγνητική τομογραφία, από τις οποίες αντλούνται δεδομένα σχετικά με τα οστά, τους μαλακούς ιστούς και τα αιμοφόρα αγγεία του ασθενούς. Σήμερα, πολλοί κατασκευαστές παράγουν εμφυτεύματα για την σπονδυλική στήλη, το ισχίο και τη λεκάνη. Για παράδειγμα, η SLM Solutions με έδρα την Γερμανία κατασκεύασε ένα εμφύτευμα ισχίου από τιτάνιο για Αυστραλό ασθενή, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία της επιλεκτικής σύντηξης με laser (Yan, et al., 2018). Επίσης στην περίπτωση καταστροφής ενός ιστού, είναι δυνατή η τρισδιάστατη εκτύπωση βιοδιασπώμενων ικριωμάτων από βιοϋλικά (μήτρες, όπου καλλιεργούνται τα κύτταρα που θα σχηματίσουν τον νέο ιστό), τα οποία απομακρύνονται σταδιακά από τον οργανισμό. Έτσι, αποφεύγεται η αντικατάσταση του

κατεστραμμένου ιστού από ένα μη βιολογικό πρόσθετο. Αν και ακόμα δεν έχει καταστεί εφικτή η τρισδιάστατη εκτύπωση οργάνων ικανών να μεταμοσχευθούν, η εταιρία Organovo, μία από τις πλέον ενεργές εταιρίες στον τομέα της προσθετικής κατασκευής, έχει δημιουργήσει ιστούς ήπατος και νεφρών, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμή φαρμάκων. Επίσης η εταιρία L'Oréal σε συνεργασία με την Organovo πραγματοποίησε δοκιμές καλλυντικών σε ιστούς δέρματος που κατασκεύασε η τελευταία, αντί να τις εφαρμόσει σε ζώα (Dodziuk, 2016).

Μια ακόμα πολύ σημαντική συνεισφορά της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κλάδο της ιατρικής είναι η δημιουργία μοντέλων φυσικών οργάνων υψηλής πιστότητας, που δείχνουν βάσει των αποτελεσμάτων των τεχνικών απεικόνισης την πραγματική κατάσταση των ιστών και των οργάνων κάθε ασθενή ξεχωριστά. Έτσι, δίνεται στους ιατρούς η δυνατότητα προεγχειρητικής εκπαίδευσης μέσω της προσομοίωσης της χειρουργικής διαδικασίας, με αποτέλεσμα τη μείωση πιθανών επιπλοκών. Μάλιστα, στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει η απαίτηση για βιοσυμβατά υλικά, αφού τα συγκεκριμένα μοντέλα δεν θα ενσωματωθούν στο ανθρώπινο σώμα. Στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς αρκετά τέτοια μοντέλα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την περίπτωση της πρώτης μεταμόσχευσης νεφρού από ενήλικα σε παιδί (Yan, et al., 2018; Dodziuk, 2016).

Επίσης, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να εφαρμοστεί και για την παραγωγή φαρμάκων. Το πρώτο εκτυπωμένο φάρμακο που εγκρίθηκε από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ ήταν το χάπι «Sprintam», το οποίο κυκλοφόρησε η εταιρία Aprelia Pharmaceuticals. Ωστόσο, η νέα αυτή δυνατότητα εγείρει ερωτήματα σχετικά με τις συνέπειες της ελεύθερης λήψης και χρήσης αρχείων τρισδιάστατης εκτύπωσης από αποθετήρια ανοιχτού κώδικα, με στόχο τη δημιουργία απομιμήσεων ή την κατάχρηση ουσιών. Συγκεκριμένα, τα προβλήματα που πιθανώς να αντιμετωπίσουν οι φαρμακοβιομηχανίες παρομοιάζονται με αυτά που έφερε η μουσική πειρατεία στον κλάδο της μουσικής (Dodziuk, 2016).

3.2. Αεροδιαστημική

Το πεδίο εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα της αεροδιαστημικής είναι ευρύ. Θέτοντας ως στόχο τη μείωση των εκπομπών της αεροπορίας κατά 50% έως το 2050, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας εστιάζει στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των αεροσκαφών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μείωσης της μάζας των εξαρτημάτων τους, μια δυνατότητα που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση. Σημαντικό ωστόσο πλεονέκτημα είναι και η μείωση του χρόνου παράδοσης πολύπλοκων συστημάτων, μέσω της μείωσης των βημάτων κατασκευής και συναρμολόγησης των εξαρτημάτων που τα αποτελούν. Για παράδειγμα, μια κεφαλή εγχυτήρα πυραύλων κατασκευάστηκε με προσθετική κατασκευή ως ένα ενιαίο εξάρτημα, ενώ κανονικά θα αποτελούνταν από 248 μεμονωμένα εξαρτήματα, τα οποία θα έπρεπε να κατασκευαστούν ξεχωριστά. Αντίστοιχα, η εταιρία General Electric κατασκεύασε έναν εναλλάκτη θερμότητας, 163 εξαρτημάτων, με μάζα και κόστος, 40% και 25% λιγότερο, αντίστοιχα, συγκριτικά με την παραγωγή μέσω συμβατικών μεθόδων. Άλλες εφαρμογές αφορούν την επισκευή ήδη υπαρχόντων εξαρτημάτων (π.χ. πτερύγια στροβίλου, αεροτομές), των οποίων η αντικατάσταση δε συμφέρει, καθώς αφενός τα εξαρτήματα αυτά υπόκεινται συνέχεια σε φθορά, λόγω του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται (υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες), και αφετέρου είναι κατασκευασμένα από ακριβά υλικά (π.χ. τιτάνιο). Από την άλλη πλευρά, οι παραδοσιακές μέθοδοι επισκευής περιλαμβάνουν εργασίες συγκόλλησης, οι οποίες παραμορφώνουν και αλλάζουν τη γεωμετρία τους. Επίσης, εξαρτήματα πολύπλοκων γεωμετριών, όπως ρότορες και πτερύγια συμπιεστών, κατασκευάζονται συνήθως με τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία και προσφέρει μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού. Παράδειγμα αποτελεί ο κινητήρας GE9X της GE, ο οποίος διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό τρισδιάστατα εκτυπωμένων εξαρτημάτων, συμπεριλαμβανομένων 228 πτερυγίων τουρμπίνας (Blakey-Milner, et al., 2021).

Όσον αφορά στην αστροναυτική, η NASA προσέγγισε στον Άρη ένα εξερευνητικό όχημα, το οποίο έφερε έξι εναλλάκτες θερμότητας, κατασκευασμένους με τρισδιάστατη εκτύπωση.

Μάλιστα, επειδή οι εναλλάκτες έπρεπε να είναι ανθεκτικοί σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 800 °C, χρησιμοποιήθηκαν υπερκράματα νικελίου, επιτυγχάνοντας έτσι βελτιωμένες - σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές - θερμικές ιδιότητες. Επιπλέον, τον Ιούλιο του 2017 η NASA δοκίμασε τον πρώτο εκτυπωμένο αναφλεκτήρα πυραυλοκινητήρα, ενώ το 2014 έστειλε στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή. Η λειτουργία του συγκεκριμένου εκτυπωτή βασίζεται στην τεχνολογία εξώθησης υλικού και στόχος ήταν η σύγκριση των παραγόμενων στο διάστημα (σε συνθήκες μικροβαρύτητας) εξαρτημάτων με αυτών που παράγονται στη Γη. Η ανάλυση έδειξε ότι δεν υπήρξαν σημαντικές μεταβολές στη διαδικασία της εκτύπωσης και ότι ο εκτυπωτής μπορεί να λειτουργήσει κανονικά και στο διάστημα (Kalender, et al., 2019; Dou, et al., 2022).

3.3 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η αυτοκινητοβιομηχανία ανήκει στους κλάδους που χρησιμοποιούν ευρέως την προσθετική κατασκευή και έχουν επωφεληθεί από την υιοθέτησή της. Αρχικά, αξιοποιούνταν για την κατά παραγγελία κατασκευή των απαραίτητων για την παραγωγή αυτοκινήτων εργαλείων και τη γρήγορη δημιουργία προτύπων, με στόχο την επιτάχυνση του σταδίου του σχεδιασμού, το οποίο περιλαμβάνει πολλές επαναλήψεις και βελτιώσεις μέχρι την τελική διαμόρφωση του σχεδίου. Πλέον όμως, η τρισδιάστατη εκτύπωση εφαρμόζεται και στην κατασκευή τελικών εξαρτημάτων, λόγω της δυνατότητάς της να δημιουργεί δομές πολύπλοκης γεωμετρίας, αλλά και χαμηλού βάρους. Η διατήρηση του χαμηλού βάρους είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα ηλεκτρικά οχήματα - μια αγορά στην οποία εισέρχονται όλο και περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες - αφού επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Επίσης χάρη στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι δυνατή η ένωση και ενσωμάτωση περισσότερων στοιχείων-εξαρτημάτων σε ένα ενιαίο σύστημα. Έτσι σε περίπτωση αντικατάστασης, μόνο ένα ανταλλακτικό θα είναι απαραίτητο και επομένως θα μειωθούν οι απαιτήσεις σε αποθέματα. Μερικά παραδείγματα εφαρμογής της προσθετικής κατασκευής στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η δημιουργία ταμπλό και σκελετών καθισμάτων με τη βοήθεια της στερεολιθογραφίας, η κατασκευή τροχών, ελαστικών, αναρτήσεων, προφυλακτήρων αισθητήρων και άλλων ηλεκτρονικών μερών μέσω της επιλεκτικής σύντηξης με laser, καθώς και η κατασκευή της αντλίας και των βαλβίδων του υδραυλικού συστήματος του αυτοκινήτου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της τήξης με δέσμη ηλεκτρονίων (Sarvankar and Yewale, 2019). Επιπλέον, το 2016 η εταιρεία Local Motors κατασκεύασε ένα ηλεκτρικό αυτόνομο μικρό λεωφορείο, το οποίο αποτελούταν κατά 80% από εξαρτήματα, κατασκευασμένα με τρισδιάστατη εκτύπωση. Μάλιστα, η εταιρία ανέφερε ότι ο συνολικός χρόνος παραγωγής μειώθηκε κατά 90%. Η μέγιστη ταχύτητα του λεωφορείου είναι 40 km/h (Prashar, et al., 2022). Βέβαια, την τρισδιάστατη εκτύπωση φαίνεται ότι θα διαδεχθεί η εκτύπωση τεσσάρων διαστάσεων, αφού ήδη υπάρχουν αναφορές για την κατασκευή ελαστικών από υλικά που προσαρμόζονται στις συνθήκες του δρόμου, αυξάνοντας έτσι τη σταθερότητα και την πρόσφυση, καθώς και για υλικά, που αλλάζουν χρώμα κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων (π.χ. έντονη ομίχλη), με στόχο την ενίσχυση της ασφάλειας του οχήματος (Raina, et al., 2021).

Τέλος, σε μια έρευνα που διεξήχθη σχετικά με την αποτελεσματικότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή αυτοκινήτων και στην οποία συμμετείχαν οι εταιρίες Ford Motors, Toyota, Kia, Volkswagen, Bugatti, Mercedes και Honda Motor, διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία επιδρά θετικά στην βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας, συμβάλλει στη μείωση του κόστους συναρμολόγησης και του ανά μονάδα κόστους και αυξάνει τα κέρδη των εταιριών (Elakkad, 2019).

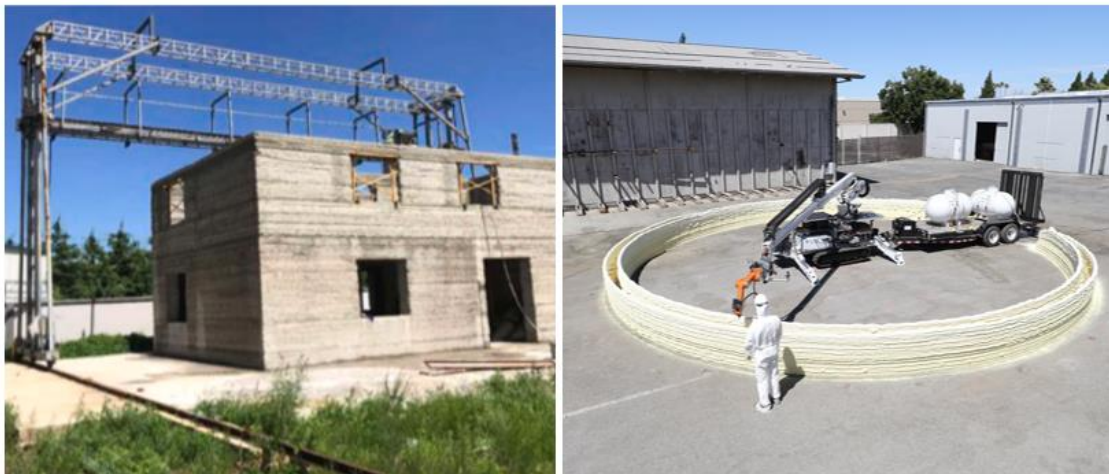
3.4 Υποδομές

Παρόλο που τα περισσότερα συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης είχαν αρχικά σχεδιαστεί για εφαρμογές μικρής κλίμακας, πλέον έχουν αναπτυχθεί και προσαρμοστεί, ώστε να είναι

κατάλληλα και για την εκτέλεση έργων υποδομής. Σε πολλές περιπτώσεις η κεφαλή εκτύπωσης ήταν συνδεδεμένη σε μια γερανογέφυρα. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην (Εικόνα 3.1), το σύστημα αυτό θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερο από το έργο που επρόκειτο να δημιουργηθεί, ενώ η περιορισμένη ελευθερία κινήσεων της κεφαλής και η δυσκολία μετακίνησης ολόκληρου του συστήματος αποτελούσαν σημαντικούς περιορισμούς. Έτσι, το MIT δημιούργησε την Digital Construction Platform (DCP), μια κινητή (και άρα εύκολη στη μεταφορά) πλατφόρμα, η οποία φέρει έναν ρομποτικό βραχίονα, που ελέγχει την κεφαλή εξώθησης και επιτρέπει την κίνησή της σε έξι άξονες (Εικόνα 3.1) (Paolini, et al., 2019).

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία υποδομών είναι η εξώθηση υλικού και η σύντηξη πούδρας σε κλίνη. Παράδειγμα πρακτικής εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό κλάδο αποτελεί η οικοδόμηση δέκα σπιτιών από σκυρόδεμα, μεγέθους 200 τ.μ. το καθένα από την κινεζική εταιρία Winsun. Μάλιστα, η εταιρία ισχυρίστηκε ότι ο συνολικός χρόνος κατασκευής ήταν μικρότερος από 24 ώρες. Βέβαια η εκτύπωση των στοιχείων των σπιτιών έγινε σε διαφορετική τοποθεσία και στη συνέχεια αυτά μεταφέρθηκαν και συναρμολογήθηκαν στον χώρο του εκάστοτε σπιτιού. Το 2017, το TU/e (Eindhoven University of Technology) κατασκεύασε επιτόπου μια ποδηλατική γέφυρα, μήκους 6.5 m, ενώ το 2019 η εταιρία Apis Cor κατασκεύασε στο Dubai το μεγαλύτερο κτίριο που έχει έως τώρα δημιουργηθεί με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνολικού ύψους και εμβαδού, 9.5 m και 640 m², αντίστοιχα (Al Rashid, et al., 2020).

Η αξιοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας φαίνεται ότι συμβάλλει στην επίτευξη πολύπλοκων γεωμετριών, τη μείωση των αποβλήτων, καθώς και τη μείωση του κόστους εργασίας, λόγω των μειωμένων απαιτήσεων σε ανθρώπινο δυναμικό (π.χ. εργάτες). Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση παρέχει τη δυνατότητα επιτόπιας επισκευής των κτιρίων, αφού πρώτα γίνει σάρωση της δομής, ανιχνευτεί η φθορά, καταγραφούν τα γεωμετρικά δεδομένα και δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο της. Τέλος, μια άλλη πιθανή εφαρμογή είναι η κατασκευή προσωρινών υποστηρικτικών δομών σε κτίρια, στα οποία είναι επικίνδυνο λόγω της φθοράς τους να εισέλθουν άνθρωποι. Έτσι, θα μειωθεί ο κίνδυνος για τους ανθρώπους που πρόκειται να επιθεωρήσουν και να επισκευάσουν το κτίριο (Camacho, et al., 2018).



Εικόνα 3.1: 3D εκτύπωσης σε γερανογέφυρα (αριστερά) και Digital Construction Platform (δεξιά Paolini, et al., 2019; Xiao, et al., 2021).

3.5 Βιομηχανία μόδας

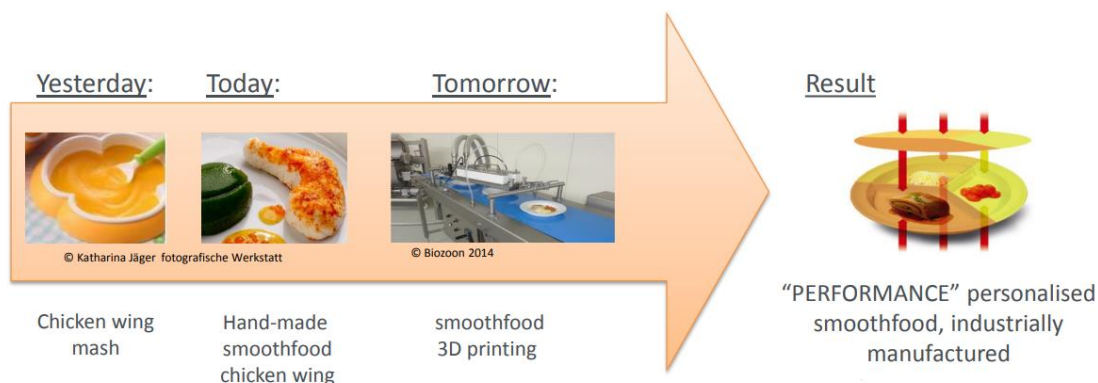
Η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και την παραγωγή ειδών ένδυσης, υπόδησης και κοσμημάτων. Δυνατότητες όπως η ταχεία κατασκευή προτύπων για δοκιμές, η δημιουργία προϊόντων κατά παραγγελία, η αποδοτικότερη χρήση των Α' υλών και η μείωση των απορριμμάτων αποτελούν τους κύριους λόγους της συνεχώς αυξανόμενης χρήσης της προσθετικής τεχνολογίας στη βιομηχανία της μόδας (Sitotaw, et al., 2020). Οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται περισσότερο είναι η στερεολιθογραφία, η επιλεκτική σύντηξη με laser και η εκτόξευση συνδετικού μέσου, ενώ ως υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως φυσικές και συνθετικές ίνες, όπως βαμβάκι και νάιλον, αντίστοιχα. Το 2014, Η Nike χρησιμοποίησε την επιλεκτική σύντηξη με laser, για να αναπτύξει γρήγορα πρότυπα και να πραγματοποιήσει πολλές δοκιμές, ώστε τελικά να δημιουργήσει το ποδοσφαιρικό παπούτσι Varour Laser Talon. Το παπούτσι αυτό ήταν ιδιαίτερα ελαφρύ και διέθετε στη σόλα ένα κατασκευασμένο με τρισδιάστατη εκτύπωση σύστημα προεξοχών και ταπών, το οποίο αύξανε σημαντικά την τριβή, εξασφαλίζοντας καλύτερη πρόσφυση και έλεγχο. Την ίδια τεχνολογία χρησιμοποίησε και η εταιρία Hoptroff Watches για την κατασκευή ρολογιών, η οποία μάλιστα ολοκληρωνόταν σε λίγες μόνο ώρες. Επίσης, η εταιρία Timberland κατάφερε να μειώσει το κόστος ανάπτυξης προτύπων από 1200 \$/πρότυπο σε 35 \$/πρότυπο, αγοράζοντας και χρησιμοποιώντας μια μηχανή 3D εκτύπωσης, της οποίας η λειτουργία στηριζόταν στην εκτόξευση συνδετικού υλικού. Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί ότι η ποιότητα των εκτυπωμένων ειδών μόδας, και κυρίως των ειδών ένδυσης, είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη ποιότητα των παραδοσιακά κατασκευασμένων ειδών. Αναμένεται ωστόσο βελτίωση, μόλις γίνουν διαθέσιμα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης, που έχουν παρόμοιες ιδιότητες (π.χ. ελαστικότητα) με αυτές των κλασικών υφασμάτων (Vanderploeg, et al., 2017). Τέλος, όσον αφορά στην προθυμία του καταναλωτικού κοινού να δοκιμάσει είδη ένδυσης, κατασκευασμένα με προσθετική κατασκευή, σχετική έρευνα αναφέρει ότι περίπου το 80% των ερωτηθέντων θα το επιχειρούσαν (Sprahiu, et al., 2020).

3.6 Τρόφιμα

Παρόλο που η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν ήταν ευρέως διαδεδομένη στη βιομηχανία τροφίμων, την τελευταία πενταετία άρχισε να αναπτύσσεται σημαντικά. Μάλιστα, ο αριθμός των δημοσιεύσεων σχετικά με το θέμα αυτό αυξήθηκε δραματικά (Zhang, et al, 2022). Ήδη αρκετές εταιρίες έχουν αναπτύξει συστήματα προσθετικής κατασκευής ειδικά σχεδιασμένα για τρόφιμα, με πιο γνωστό, το σύστημα CocolJet, το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρία 3D Systems - από τις μεγαλύτερες εταιρίες κατασκευής 3D εκτυπωτών - σε συνεργασία με την εταιρία Hershey, που είναι ηγέτιδα στον κλάδο της σοκολατοβιομηχανίας (Liu, et al, 2017). Το συγκεκριμένο σύστημα, όπως και τα περισσότερα σε αυτήν την κατηγορία, λειτουργεί με βάση την εξώθηση υλικού και εκτυπώνει σοκολάτες σε διάφορα σχήματα. Ένα από τα πλεονεκτήματα της εκτύπωσης τροφίμων είναι η συμπερίληψη χρονοβόρων εργασιών, όπως η κοπή όλων των υλικών στα επιθυμητά μεγέθη και σχήματα, η ζύγιση και η ανάμιξη τους, σε ένα μόνο στάδιο. Ωστόσο, το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα παραγωγής εξατομικευμένων τροφών, βάσει των γευστικών προτιμήσεων, των πιθανών αλλεργιών και των διατροφικών και ενεργειακών απαιτήσεων του κάθε ατόμου (Nachal, et al., 2019). Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Ένωση χρηματοδότησε το έργο PERFORMANCE και σε συνεργασία με τη γερμανική εταιρία Biozoon Food Innovation, σχεδιάστηκαν και παρασκευάστηκαν τροφές (π.χ. μπισκότα) για ηλικιωμένους ανθρώπους με δυσφαγία. Οι τροφές αυτές, αν και εύκολες στην κατάποση αφού είχαν αρχικά πολτοποιηθεί, δεν έμοιαζαν με χυλό και διατηρούσαν τη φυσική υφή και το σχήμα τους, χάρη στην επεξεργασία τους (εισαγωγή πηγατογόνων παραγόντων) μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Εικόνα 3.2). Ενδιαφέρον για την εκτύπωση τροφίμων είχε δείξει επίσης και ο στρατός των ΗΠΑ, λόγω της δυνατότητας προσαρμογής των γευμάτων στις απαιτήσεις του κάθε στρατιώτη. Επιπλέον, η NASA διερεύνησε την πιθανότητα

αξιοποίησης της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε μεγάλες διαστημικές αποστολές, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερή παροχή τροφής στους αστροναύτες και η ικανοποίηση των απαιτήσεων ασφαλείας. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν κατέστη εφικτό, καθώς λόγω της υποβάθμισης των μικροθρεπτικών συστατικών (βιταμίνες, μέταλλα) με την πάροδο του χρόνου, δεν θα καλύπτονταν οι διατροφικές απαιτήσεις του πληρώματος, ενώ παράλληλα ο εξοπλισμός ψύξης που απαιτούνταν, θα καταναλώνε μεγάλη ποσότητα από τους πολύτιμους και περιορισμένους πόρους του διαστημόπλοιου (Liu, et al, 2017). Τέλος, η προσθετική κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή συσκευασιών τροφίμων. Μάλιστα, ερευνητές, προσπαθώντας να εστιάσουν στη βιωσιμότητα, κατασκεύασαν ποτήρια από βιοαποικοδομήσιμο υλικό, τα οποία περιείχαν συστατικά ενεργειακών ποτών. Έτσι, οι καταναλωτές θα πρόσθεταν μόνο το νερό και το ενεργειακό τους ποτό θα ήταν έτοιμο (Nachal, et al.,2019).

Αν και η υιοθέτηση της AM τεχνολογίας παρέχει στην βιομηχανία τροφίμων σημαντικά οφέλη, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί που δεν μπορούν να παραβλεφθούν. Η βελτιστοποίηση της εκτύπωσης είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διεργασία, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι ιδιότητες των διαφορετικών υλικών (ιξώδες, επιφανειακή τάση), όσο και οι ίδιες οι παράμετροι της εκτύπωσης (ρυθμός ροής, διάμετρος ακροφυσίου, ταχύτητα εκτύπωσης), αφού επηρεάζουν τη δομή και τη σταθερότητα του παραγόμενου προϊόντος. Παράλληλα, υπάρχουν και κάποιες κρίσιμες για την παραγωγή υψηλής ποιότητας και ασφάλειας τροφίμων παράμετροι, που δεν πρέπει να αγνοούνται, όπως για παράδειγμα το μικροβιακό φορτίο και η υγρασία (υψηλά επίπεδα οδηγούν σε έως και 35% συρρίκνωση του προϊόντος κατά την επεξεργασία μετά την εκτύπωση, π.χ. ψήσιμο σε φούρνο) (Zhang, et al, 2022). Τέλος, όσον αφορά στη στάση των καταναλωτών απέναντι στα εκτυπωμένα τρόφιμα, σχετική έρευνα αναφέρει ότι οι περισσότεροι είναι επιφυλακτικοί και αμφισβητούν την ασφάλεια και την διατροφική αξία των παραγόμενων, με τον συγκεκριμένο τρόπο, προϊόντων. Μάλιστα, οι ερευνητές αποδίδουν την επιφυλακτικότητα αυτή στην περιορισμένη γνώση του κοινού για τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Nachal, et al.,2019).



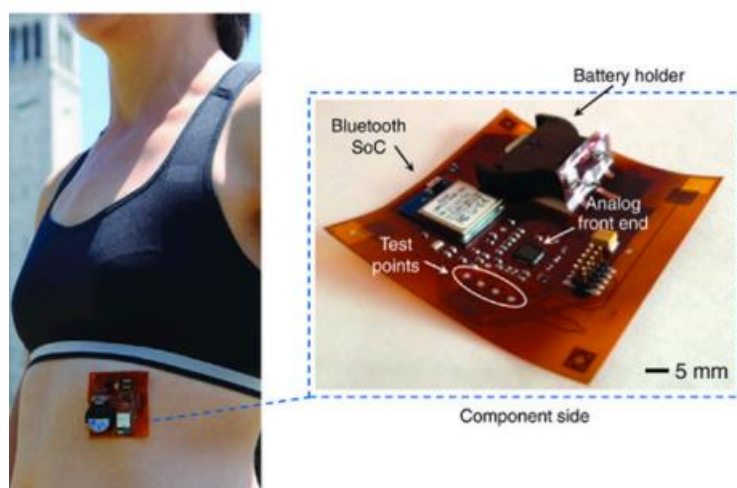
Εικόνα 3.2: 3D εκτύπωση φαγητού για ηλικιωμένους με δυσφαγία – PERFORMANCE Project.

3.7 Ηλεκτρονικά είδη

Στην εποχή της ψηφιοποίησης, η παρουσία των ηλεκτρονικών συσκευών γίνεται όλο και πιο ισχυρή και αλλάζει σημαντικά τον τρόπο επικοινωνίας, εργασίας και ζωής γενικότερα. Οι εξελίξεις στον συγκεκριμένο κλάδο δείχνουν μια τάση προς την παραγωγή συστημάτων που συνδυάζουν συρρίκνωση του όγκου τους με ταυτόχρονη προσθήκη νέων λειτουργιών. Οι αυξημένες αυτές απαιτήσεις σχεδιασμού και η επιθυμία για γρήγορη και φθηνή κατασκευή προτύπων στρέφουν το ενδιαφέρον των αντίστοιχων βιομηχανιών προς την προσθετική κατασκευή. Σύμφωνα με μια ανάλυση αγοράς του 2016, η αξία της αγοράς των εκτυπωμένων

ηλεκτρονικών ειδών έφτανε τα 3.13 δισεκατομμύρια δολάρια, με δυνατότητα να αγγίξει ως και τα 12 δισεκατομμύρια τα επόμενα έτη. Ήδη αρκετές εταιρίες έχουν αναπτύξει τεχνολογίες και συστήματα 3D εκτύπωσης, ειδικά σχεδιασμένα για την κατασκευή ηλεκτρονικών. Μάλιστα, η εταιρία Ortomec είναι σε θέση να σχεδιάζει και να κατασκευάζει κεραίες και αισθητήρες σε μεγάλη κλίμακα. Άλλα παραδείγματα εφαρμογών της προσθετικής κατασκευής είναι η παραγωγή τρανζίστορ, διόδων εκπομπής φωτός, πυκνωτών, μετασχηματιστών, αντιστάσεων και μπαταριών. Ειδικά όσον αφορά στις μπαταρίες παρατηρήθηκε ότι, βελτιώνοντας τον σχεδιασμό της γεωμετρίας τους μέσω της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αυξανόταν σημαντικά η ενεργειακή πυκνότητα (Espera, et al., 2019). Επιπλέον, γίνεται έρευνα για την ανάπτυξη εύκαμπτων και ελαστικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, που θα μπορούν να διαμορφώνουν το σχήμα τους ανάλογα με την επιφάνεια, στην οποία εφαρμόζονται. Τέτοιου είδους κυκλώματα θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στον τομέα της μαλακής ρομποτικής και της ιατρικής. Για παράδειγμα, έχουν σχεδιαστεί αυτοκόλλητοι αισθητήρες, προσαρτημένοι στο σώμα του χρήστη, οι οποίοι παρακολουθούν τα ηλεκτρικά σήματα της καρδιάς και τη θερμοκρασία του (Εικόνα 3.3). Ωστόσο, οι συσκευές αυτές είναι αρκετά επιρρεπείς σε μηχανικές βλάβες και αστοχίες λόγω των συνεχών κάμψεων και τανυσμάτων. Το συγκεκριμένο πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί χρησιμοποιώντας έξυπνα πολυμερή αυτό-ίασης, τα οποία μέσω αυτόνομων αντιδράσεων πολυμερισμού και ανασχηματισμού των δεσμών διασταύρωσης, «επανασυναρμολογούν» τις περιοχές που έχουν φθαρεί.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την κατασκευή των προαναφερθέντων ηλεκτρονικών συστημάτων, είναι η εξώθηση και η εκτόξευση υλικού. Η πρώτη προτιμάται, λόγω της απλότητας, της δυνατότητας χρήσης υλικών διαφορετικών ιξώδων και του χαμηλού κινδύνου απόφραξης των ακροφύσιων, ενώ η δεύτερη λόγω του μειωμένου κινδύνου μόλυνσης η καταστροφής του υλικού (ανέπαφη μέθοδος) και της επίτευξης υψηλότερης ανάλυσης. Ως υλικά χρησιμοποιούνται διηλεκτρικά υλικά (παρέχουν μόνωση), μεταλλικά νανοσωματίδια, αγωγικά πολυμερή, νανοσωλήνες άνθρακα και ημιαγωγοί. Βέβαια, στην περίπτωση δημιουργίας διαδοχικών στρωμάτων διαφορετικού υλικού, απαιτούνται ιδιαίτερα αυστηρά κριτήρια για την επιλογή των υλικών ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως η διάλυση του ενός υλικού στο άλλο, με αποτέλεσμα την ανάμιξή τους στο κατώτερο στρώμα (Tan, et al., 2022).



Εικόνα 3.3: Αυτοκόλλητος (3D εκτυπωμένος) αισθητήρας παρακολούθησης σημάτων καρδιάς και θερμοκρασίας (Tan, et al., 2022).

3.8 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η βιβλιογραφία έχει ασχοληθεί ιδιαίτερα με τις εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στους τομείς της ιατρικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ωστόσο πλέον, ο αριθμός των δημοσιεύσεων σχετικά με τις εφαρμογές της στη βιομηχανία της μόδας, των τροφίμων και των ηλεκτρονικών έχει αυξηθεί σημαντικά. Βέβαια, σε κάθε κλάδο υπάρχουν πεδία που πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω. Για παράδειγμα στον κλάδο της ιατρικής, γίνονται προσπάθειες για την εκτύπωση ιστών και οργάνων, ικανών να μεταμοσχευθούν. Αυτό βέβαια προϋποθέτει την ανάπτυξη της υπάρχουσας τεχνολογίας και των διαθέσιμων υλικών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτύπωση κυττάρων που θα μπορούν να επιβιώνουν και να πολλαπλασιάζονται μέσα στα ικρίσματα, αναγεννώντας τελικά τους κατεστραμμένους ιστούς. Όσον αφορά στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι έρευνες μπορούν να κατευθυνθούν προς τη μελέτη των έξυπνων υλικών και συγκεκριμένα προς τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους με την πάροδο του χρόνου, μεταβάλλοντας παράλληλα το περιβάλλον και τα ερεθίσματα που αυτά λαμβάνουν. Η γνώση της συμπεριφοράς των υλικών σε διαφορετικά περιβάλλοντα συμβάλλει στη ανακάλυψη νέων πεδίων εφαρμογών και στην καλύτερη αξιοποίησή τους στις ήδη υπάρχουσες εφαρμογές. Ένας ακόμη σημαντικός τομέας έρευνας είναι και η αύξηση της ταχύτητας εκτύπωσης, η οποία, δεδομένων και των μεγάλων όγκων που χαρακτηρίζουν την αυτοκινητοβιομηχανία, αποτελεί εμπόδιο για την ευρύτερη υιοθέτηση της τεχνολογίας. Περισσότερη έρευνα πρέπει να διεξαχθεί επίσης στη βιομηχανία ηλεκτρονικών και τη βιομηχανία της μόδας, καθώς τα διαθέσιμα είδη υλικών είναι περιορισμένα. Ο μεν κλάδος των ηλεκτρονικών, απαιτεί προηγμένα λειτουργικά υλικά με διαφορετικές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, προκειμένου καταστούν δυνατές περισσότερες εφαρμογές, ενώ η βιομηχανία της μόδας χρειάζεται νέα ελαστικά υλικά, που θα μπορούν να στερεοποιηθούν στη βάση εκτύπωσης σε ορισμένη μορφή και παράλληλα θα έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα υφάσματα (π.χ. διαπερατότητα στον αέρα). Επιπλέον, για να μπορέσει η προσθετική κατασκευή να γίνει πραγματικά ανταγωνιστική απέναντι στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ειδών ένδυσης και υπόδησης, πρέπει να γίνουν προσπάθειες ώστε να αυξηθεί η ταχύτητα και να μειωθεί το κόστος. Ένα άλλο ερευνητικό πεδίο, αφορά την βιομηχανία τροφίμων και είναι η επεξεργασία πριν την εκτύπωση κάποιων υλικών (π.χ. φρούτα), τα οποία λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας τους σε νερό, παρουσιάζουν χαμηλή σταθερότητα και προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτύπωση. Απαραίτητη βέβαια για την εισαγωγή των εκτυπωμένων τροφίμων στην αγορά κρίνεται η πραγματοποίηση πολλών δοκιμών, όπως και η εξέταση όλων των σχετικών με την ασφάλεια πτυχών. Τέλος, μια ακόμη πρόταση για την καλύτερη αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή έργων υποδομής είναι η προσομοίωση διεργασιών, η οποία θα λειτουργήσει ως ένας τρόπος πρόληψης των αστοχιών, δεδομένου ότι, λόγω του όγκου των έργων, οι δυνατότητες για πειραματικές δοκιμές είναι περιορισμένες.

4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ

Η προσθετική κατασκευή είναι μια εκ διαμέτρου αντίθετη με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής τεχνολογία, καθώς βασίζεται στην εναπόθεση υλικού και όχι στη συνεχή αφαίρεσή του από μία ακατέργαστη μάζα σώματος έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία. Λόγω λοιπόν της διαφορετικής της φύσης, η υιοθέτηση και η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να επιφέρει αλλαγές όχι μόνο στην παραγωγή, αλλά και σε ολόκληρη την εφοδιαστική αλυσίδα.

Ο όρος «εφοδιαστική αλυσίδα» αναφέρεται στο σύνολο των δραστηριοτήτων πρόσδοσης αξίας σε πρώτες ύλες, ημιέτοιμα και τελικά προϊόντα, ξεκινώντας από την προμήθεια και καταλήγοντας στην παράδοση του τελικού προϊόντος στον πελάτη (Janvier-James, 2012). Ως εκ τούτου, σε μια εφοδιαστική αλυσίδα δεν εμπλέκονται μόνο οι προμηθευτές και οι παραγωγοί, αλλά συμπεριλαμβάνονται και τα συστήματα μεταφοράς υλικών και προϊόντων, οι αποθήκες, τα κέντρα διανομής και το σύστημα φυσικής διανομής στους πελάτες. Όλα τα παραπάνω στοιχεία είναι αλληλοεξαρτώμενα, γεγονός που σημαίνει, ότι η εμφάνιση μιας αλλαγής σε ένα στοιχείο μπορεί να επιφέρει αλλαγές και στα υπόλοιπα. Όσο περισσότερες διασυνδέσεις και αλληλοεξαρτήσεις υπάρχουν στην αλυσίδα τροφοδοσίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η πολυπλοκότητά της. Ο αυξημένος αριθμός προμηθευτών, οι μεγάλοι ή και αναξιόπιστοι χρόνοι παράδοσης των Α' υλών, ο μεγάλος αριθμός των παραγόμενων προϊόντων, η μεταβλητότητα της ζήτησης, η ετερογένεια των αναγκών και ο αριθμός των πελατών είναι μερικά παραδείγματα παραγόντων αύξησης της πολυπλοκότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας. Στην απλοποίησή της, ωστόσο, θα μπορούσε να συμβάλει η τρισδιάστατη εκτύπωση, επιφέροντας σημαντικές και άμεσες αλλαγές στην προμήθεια, τον σχεδιασμό και την παραγωγή των προϊόντων, καθώς και στη διανομή τους στους πελάτες (Haghighat Khajavi, 2020).

4.1 Προμήθειες

Οι κύριες εισροές για την παραγωγή προϊόντων με χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τα υλικά και τα δεδομένα σχεδιασμού, τα οποία περιέχονται στα αρχεία CAD. Επιπλέον, λόγω της φύσης της τεχνολογίας, που επιτρέπει την ενιαία εκτύπωση και ενσωμάτωση πολλών εξαρτημάτων σε ένα μόνο προϊόν, δεν απαιτούνται επιπλέον προμήθειες για καθένα από αυτά. Κατά συνέπεια και συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής, η προσθετική κατασκευή συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από προμηθευτές εξαρτημάτων, αλλά εντείνει την εξάρτηση από τους προμηθευτές υλικών και IT συστημάτων (Verboeket and Krikke, 2019). Μάλιστα, ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της βιομηχανίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι συνήθως οι προμηθευτές των μηχανών εκτύπωσης είναι ταυτόχρονα και προμηθευτές υλικών. Το χαρακτηριστικό αυτό οφείλεται εν μέρει στην τεχνολογία, που δεν έχει ωριμάσει ακόμα, αλλά παράλληλα αποτελεί και μια στρατηγική των προμηθευτών των μηχανών 3D εκτύπωσης (Mellor, et al., 2014).

Επιπλέον, οι απαιτούμενες ποσότητες πρώτων υλών για την κατασκευή μέσω της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των συμβατικών μεθόδων. Στον κατασκευαστικό κλάδο για παράδειγμα, είναι δυνατή η εξοικονόμηση σκυροδέματος έως και 60% χάρη στην ικανότητα εκτύπωσης κοίλων κατασκευών (Verboeket and Krikke, 2019). Ο συνδυασμός, ωστόσο, του περιορισμένου αριθμού των προμηθευτών πρώτων υλών, της μικρής ποικιλίας (η οποία, βέβαια, αναμένεται να αυξηθεί) και του υψηλού τους κόστους καθιστούν δύσκολη για τους κατασκευαστές την εύρεση εναλλακτικών πηγών προμήθειας, γεγονός που αυξάνει την «ευαλωτότητα» της εφοδιαστικής αλυσίδας απέναντι σε οποιαδήποτε μεταβολή σχετικά με την διαθεσιμότητα των υλικών. Είναι γνωστό, ότι η παραγωγική ικανότητα των κατασκευαστών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα των προμηθευτών να παραδίδουν τα συμφωνημένα είδη υλικών, στη συμφωνημένη ποσότητα,

τιμή και χρονική στιγμή. Επομένως, οποιαδήποτε καθυστέρηση, διακοπή ή παραβίαση της συμφωνίας από την πλευρά των προμηθευτών, θα εμποδίσει τους κατασκευαστές να ανταποκριθούν στη ζήτηση και τις απαιτήσεις των πελατών τους. Επιπλέον εμπόδια που περιορίζουν τις διαθέσιμες εναλλακτικές και δυσχεραίνουν την επιλογή των καλύτερων και καταλληλότερων προμηθευτών είναι η έλλειψη προτύπων και κανονισμών σχετικά με τα υλικά, καθώς και η περιορισμένη δυνατότητα ιχνηλασιμότητά τους (Naghshineh, and Carvalho, 2021).

Τέλος, η προσθετική τεχνολογία είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει στις εταιρίες να αναθέτουν πλήρως τόσο τον σχεδιασμό όσο και την κατασκευή των προϊόντων σε παρόχους υπηρεσιών τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως η Shapeways, Inc. Έτσι, αποκομίζουν τα οφέλη της 3D εκτύπωσης (π.χ. παραγωγή κατά παραγγελία, μείωση αποθεμάτων, συνεργασία με τοπικούς παρόχους υπηρεσιών που παράγουν τα προϊόντα κοντά στο σημείο πώλησης ή κατανάλωσης), ενώ παράλληλα μετριάζουν τους κινδύνους που σχετίζονται με αυτή (π.χ. τεχνολογική απαξίωση, υψηλό κόστος απόκτησης εξοπλισμού και κόστος εκπαίδευσης προσωπικού). Ωστόσο, στην περίπτωση της εξωτερικής ανάθεσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ο κίνδυνος πειρατείας μέσω διαρροής δεδομένων σχεδιασμού, καθώς και οι διάφορες ρυθμιστικές και νομικές ιδιαιτερότητες που χαρακτηρίζουν μια τέτοια σχέση και αφορούν κυρίως θέματα δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας (Rogers, et al., 2016).

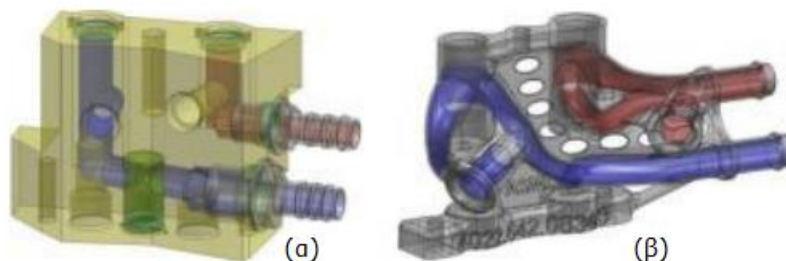
4.2 Σχεδιασμός

Αρχικά, λόγω του υψηλού κόστους των συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης, η εφαρμογή της προσθετικής κατασκευής περιοριζόταν μόνο στη δημιουργία προτύπων. Χάρη στη συγκεκριμένη τεχνολογία, η διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής ενός προτύπου μειώθηκε από μερικές εβδομάδες σε λίγες μέρες ή και ώρες, ενώ η μόνη τροποποίηση που απαιτούνταν για τον επανασχεδιασμό ενός μοντέλου ήταν αυτή των αρχείων CAD. Έτσι, έγινε εφικτή η πραγματοποίηση περισσότερων δοκιμών σε λιγότερο χρόνο, με αποτέλεσμα τον γρηγορότερο εντοπισμό των σχεδιαστικών ελαττωμάτων, την επιτάχυνση της φάσης του σχεδιασμού και άρα την ταχύτερη κυκλοφορία των προϊόντων. Η κατάσταση αυτή βέβαια άλλαξε, όταν η μείωση του κόστους του εξοπλισμού οδήγησε στην ευρύτερη υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης και στην αξιοποίησή της για τον σχεδιασμό όχι μόνο προτύπων και εργαλείων, αλλά και τελικών προϊόντων, ικανών να διατεθούν στην αγορά (Rayna and Striukova, 2016).

Στην προαναφερθείσα αλλαγή συντέλεσε φυσικά και η σχεδιαστική ελευθερία που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία και αποτελεί ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματά της. Δεδομένου ότι δεν απαιτούνται καλούπια και εργαλεία κοπής, είναι δυνατή η κατασκευή αντικειμένων σύνθετων και προσαρμοσμένων κατά περίπτωση γεωμετριών. Ιδιαίτερα σημαντική ωστόσο είναι η επίτευξη περίπλοκων χαρακτηριστικών που βρίσκονται όχι εξωτερικά, αλλά εσωτερικά του προϊόντος, αυξάνοντας έτσι τη λειτουργικότητα και την επίδοσή του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εκτύπωση καναλιών σύμμορφης ψύξης, τα οποία βρίσκονται εντός των κοιλιοτήτων των καλουπιών που χρησιμοποιούνται στην χύτευση με έγχυση και ακολουθούν τη γεωμετρία τους, επιτυγχάνοντας τελικά αποδοτικότερη ψύξη του τήγματος και επομένως μείωση της χρονικής διάρκειας του κύκλου έγχυσης (Εικόνα 4.1). Κάτι τέτοιο δεν θα ήταν εφικτό με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής (Durakovic, 2018). Επιπλέον, χάρη στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι δυνατή η δημιουργία κυψελοειδών και πλεγματικών δομών, που χαρακτηρίζονται από χαμηλό βάρος, αλλά υψηλή αναλογία αντοχής/βάρους, χαρακτηριστικά απαραίτητα για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική (Niaki and Nonino, 2017). Μάλιστα, ενώ η βελτιστοποίηση της τοπολογίας είναι ένα σημαντικό εργαλείο που χρησιμοποιείται στο στάδιο του σχεδιασμού και συμβάλλει στη δημιουργία κατασκευών υψηλών επιδόσεων, εξοικονομώντας παράλληλα ενέργεια και μειώνοντας την κατανάλωση υλικών έως και 40%, συχνά οι βελτιστοποιημένες δομές είναι αδύνατο να παραχθούν με τις συμβατικές μεθόδους λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Αυτός ο περιορισμός όμως δεν υφίσταται στην προσθετική κατασκευή, γεγονός που μειώνει τις

απαιτήσεις σε δοκιμές και άρα τον χρόνο εισαγωγής ενός προϊόντος στην αγορά (Achillas, et al., 2015; Ntintakis, et al., 2020). Επίσης, η τεχνολογία αυτή επιτρέπει στους σχεδιαστές να ενσωματώνουν διαφορετικά εξαρτήματα σε ένα ενιαία εκτυπωμένο προϊόν, εξαλείφοντας έτσι τα στάδια και τον χρόνο συναρμολόγησης και μειώνοντας τις απαιτήσεις και άρα και το κόστος των αποθεμάτων για κάθε εξάρτημα ξεχωριστά (Thompson, et al., 2016). Ταυτόχρονα, η απλοποίηση των σύνθετων και αποτελούμενων από πολλά μέρη προϊόντων θα οδηγήσει με τη σειρά της στην απλοποίηση των αλυσίδων αξίας που σχετίζονται με καθένα από αυτά τα μέρη και θα τις καταστήσει λιγότερο ιεραρχικές. Βέβαια, προκειμένου να αξιοποιηθούν στο έπακρο τα οφέλη που προσφέρει η σχεδιαστική ελευθερία, απαιτούνται γνώσεις, υψηλές δεξιότητες σχεδιασμού και εκπαίδευση του προσωπικού στη χρήση λογισμικών CAD. Οι προσπάθειες αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε εσωτερικά είτε μέσω ανάθεσης σε εξειδικευμένους παρόχους υπηρεσιών σχεδιασμού.

Τέλος, η προσθετική κατασκευή φαίνεται να μπορεί να υποστηρίξει τη στενότερη συνεργασία μεταξύ κατασκευαστών και καταναλωτών, μέσω της συμμετοχής των δεύτερων στη διαδικασία σχεδιασμού. Η συν-δημιουργία και ο συν-σχεδιασμός των μοντέλων θα οδηγήσει στην επίτευξη εξαιρετικά προσαρμοσμένων κατασκευών χωρίς επιπλέον οικονομική επιβάρυνση, στην καλύτερη ανταπόκριση στις ασταθείς πολλές φορές απαιτήσεις του πελάτη και άρα στην αύξηση της ικανοποίησής του, γεγονός που θα προσφέρει στους κατασκευαστές μια ισχυρότερη θέση στην αγορά (Weller, et al., 2015). Μάλιστα, λόγω της καλύτερης ανταπόκρισης στις προσδοκίες των πελατών, αναμένεται ότι θα μειωθεί και ο αριθμός των επιστρεφόμενων προϊόντων (Naghshineh, and Carvalho, 2021). Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αξιοποίηση της συγκεκριμένης δυνατότητας πιθανόν να οδηγήσει σε έναν ταχέως αυξανόμενο αριθμό μοναδικών σχεδίων και συνεπώς στην αραίωση του brand (Brand dilution), ενώ θα εμφανιστούν και νέες νομικές προκλήσεις σχετικά με τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας (Chan, et al., 2018).



Εικόνα 4.1: Γεωμετρία εσωτερικών χαρακτηριστικών: (α) συμβατικό κανάλι ψύξης, (β) σύμμορφο κανάλι ψύξης (Durakovic, 2018).

4.3 Παραγωγή

4.3.1 Μαζική εξατομίκευση (Mass customization)

Ως μαζική εξατομίκευση ορίζεται η ικανότητα σχεδιασμού και παραγωγής προσαρμοσμένων προϊόντων, ικανών να ανταποκρίνονται στις ανάγκες του κάθε πελάτη μεμονωμένα, διατηρώντας παράλληλα την απόδοση και την ταχύτητα της μαζικής παραγωγής. Απαιτείται, επομένως, μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων και παραγωγικές διαδικασίες που θα μπορούν να εξασφαλίζουν την ποικιλία αυτή σε σύντομο χρόνο και χαμηλό κόστος. Οι παραδοσιακές μέθοδοι παραγωγής, ωστόσο, δεν θα μπορούσαν να προσφέρουν μια τέτοια λύση, καθώς η αλλαγή των εργαλείων και η δημιουργία καλουπιών για κάθε νέα παραλλαγή του προϊόντος θα

οδηγούσε σε αυξημένο κόστος παραγωγής και μεγάλους χρόνους παράδοσης (Lacroix, et al, 2021). Η προσθετική κατασκευή, από την άλλη πλευρά, δεν απαιτεί τη χρήση καλουπιών για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων, παρά μόνο τα δεδομένα σχεδιασμού, που υπάρχουν στο αρχείο CAD του προς εκτύπωση προϊόντος. Έτσι, οι όποιες τροποποιήσεις θα αφορούν αποκλειστικά το αρχείο αυτό και δεν θα συνεπάγονται επιπλέον κόστος, αφού το ίδιο σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης θα μπορεί να «διαβάζει» κάθε νέο αρχείο που δημιουργείται και να εκτυπώνει οποιοδήποτε προϊόν (Mahamood and Akinlabi, 2016). Δεδομένης μάλιστα της σχεδιαστικής ελευθερίας που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία, η προσαρμογή των προϊόντων στις ανάγκες των καταναλωτών θα είναι πράγματι επιτεύξιμη. Η ευελιξία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές στον τομέα της ιατρικής, όπως η κατασκευή εμφυτευμάτων ή ακουστικών βαρηκοΐας, κατά την οποία μέσω αντίστροφου μηχανισμού σάρωσης λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα σχεδιασμού, εξασφαλίζοντας έτσι την άριστη εφαρμογή των ιατροτεχνολογικών προϊόντων σε κάθε ασθενή ξεχωριστά. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι χάρη στην τρισδιάστατη εκτύπωση μειώνεται ο συνολικός χρόνος σχεδιασμού και παραγωγής. Για παράδειγμα, η κατασκευή προσθετικών μελών επιτυγχάνεται πλέον εντός μίας ημέρας, μια διαδικασία που με την χρήση των παραδοσιακών μεθόδων διαρκούσε μήνες (Attaran, 2017).

4.3.2 Κατανεμημένη παραγωγή (Distributed production)

Τεχνολογίες όπως η προσθετική κατασκευή καθιστούν εφικτή την κατανεμημένη παραγωγή, η οποία, «φέρνοντας» ουσιαστικά την παραγωγή πιο κοντά στους καταναλωτές, διευκολύνει την καλύτερη διαχείριση της συχνά απρόβλεπτης ζήτησης και επομένως βελτιώνει την ευελιξία και την ικανότητα ανταπόκρισης των κατασκευαστών. Καθώς τα ψηφιακά αρχεία μεταφέρονται πιο εύκολα από τα φυσικά προϊόντα και για την εκτύπωση αυτή καθαυτή δεν απαιτούνται ειδικές γνώσεις, η κατανεμημένη 3D εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιτόπια παραγωγή σε γεωγραφικά κατανεμημένες εγκαταστάσεις. Είναι επίσης δυνατός ο συνδυασμός κατανεμημένης παραγωγής και κεντρικά ελεγχόμενου ψηφιακού σχεδιασμού, μιας φάσης που απαιτεί υψηλές δεξιότητες, η ύπαρξη των οποίων εξασφαλίζεται, ανεξαρτήτως της τοποθεσίας που λαμβάνει χώρα η παραγωγή, μέσω του κυβερνο-φυσικού αυτού συστήματος. Ωστόσο αξίζει να αναφερθεί, ότι για να ακολουθηθεί η λύση της κατανεμημένης παραγωγής, η τοπική ζήτηση θα πρέπει να είναι επαρκής (Verboeket and Krikke, 2019; Gupta, et al., 2020).

Τα πλεονεκτήματα της κατανεμημένης παραγωγής είναι πολλά. Αρχικά, η σχετικά εύκολη εγκατάσταση των κινητών συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης καθιστά δυνατή την πρόσβαση σε διαφορετικές και δυσπρόσιτες τοποθεσίες, μετατρέπει την τοποθεσία του πελάτη σε τοποθεσία παραγωγής και συμβάλλει στην αύξηση της ευελιξίας και την καλύτερη και έγκαιρη διανομή των προϊόντων. Έτσι, οι απαιτήσεις σε μεταφορές μειώνονται, γεγονός που οδηγεί στην εξοικονόμηση του αντίστοιχου κόστους, αλλά και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται σε αυτές. Ταυτόχρονα, μειώνονται και οι μεταφορές των κύριων εισροών της διεργασίας, αφού τα αρχεία σχεδιασμού μεταφέρονται ψηφιακά και ορισμένες βασικές πρώτες ύλες μπορούν να παρασχεθούν τοπικά (Ford and Despreisse, 2016). Επιπλέον, η δυνατότητα αποθήκευσης των προϊόντων σε ψηφιακά αρχεία και γρήγορης παραγωγής τους, εφόσον χρειαστεί, μειώνει τις ανάγκες για φυσικά αποθέματα και επομένως το κόστος διατήρησης των αποθεμάτων, τον κίνδυνο απαξίωσης και το κόστος έλλειψης διαθεσιμότητας. Παρ' όλ' αυτά, για προϊόντα που σχετίζονται με εφαρμογές στην αεροναυπηγική (π.χ. ανταλλακτικά) και την ιατρική, προτείνεται στη βιβλιογραφία να τηρούνται κάποια αποθέματα (πάλι κατανεμημένα), καθώς στους συγκεκριμένους τομείς η έλλειψη διαθεσιμότητας ενός προϊόντος μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες. Αναλόγως την περίπτωση, αποφασίζεται ποια προσέγγιση (make-to-stock ή make-to-order) θα ακολουθηθεί (Verboeket and Krikke, 2019).

Ένα άλλο πλεονέκτημα των κατανεμημένων εγκαταστάσεων παραγωγής είναι η παροχή στις επιχειρήσεις ευκαιριών διεύρυνσης του δικτύου τους, εισαγωγής σε νέες (γεωγραφικά) αγορές, επέκτασης των καναλιών εξαγωγών, αύξησης του αριθμού των πελατών, αλλά και των προμηθευτών τους. Η αύξηση αυτή ενισχύει την προστασία των επιχειρήσεων έναντι καταστάσεων διατάραξης ή διακοπής των σχέσεων με τους συγκεκριμένους stakeholders.

Ωστόσο, πρέπει να τονισθεί, ότι η κατανεμημένη παραγωγή με AM προϋποθέτει τη συνεχή ροή πληροφοριών μεταξύ των κατανεμημένων εγκαταστάσεων και του κέντρου σχεδιασμού. Επομένως, η άμεση επίλυση των προβλημάτων που σχετίζονται με τις ανεπάρκειες των υφιστάμενων ICT συστημάτων (π.χ. προβλήματα διαχείρισης δεδομένων) κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική. Μάλιστα, δεδομένου του μεγάλου βαθμού χρήσης συστημάτων ανταλλαγής πληροφοριών, είναι πιθανή η εμφάνιση περιπτώσεων βιομηχανικής κατασκοπείας (π.χ. παραβίαση βάσης δεδομένων τρισδιάστατων μοντέλων και διαρροή γνώσης), γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία ανάπτυξης λύσεων για την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων (Naghshineh, and Carvalho, 2021). Τέλος, μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το υψηλό κόστος απόκτησης των πολυάριθμων μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης, που απαιτούνται για την κάλυψη όλων των εγκαταστάσεων παραγωγής (Verboeket and Krikke, 2019).

4.3.3 Ευελιξία παραγωγικής δυναμικότητας

Ως ευελιξία της παραγωγικής δυναμικότητας ορίζεται η ικανότητα αύξησης ή μείωσης της παραγωγικής δυναμικότητας μέσω της αντίστοιχης - σύμφωνα με τις μεταβολές της ζήτησης - προσαρμογής των πόρων (ανθρώπινο δυναμικό και εξοπλισμός). Οι περισσότερες μελέτες ωστόσο που ασχολούνται με την προσθετική κατασκευή επικεντρώνονται στην παραγωγή προϊόντων κατά παραγγελία, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλό όγκο και δεν λαμβάνουν υπόψη τη συνολική παραγωγική δυναμικότητα. Έτσι, τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την ευελιξία που μπορεί να προσδώσει η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι περιορισμένα. Πάντως, σε μια σχετική έρευνα αναφέρεται ότι ορισμένες εταιρίες, έχοντας εντοπίσει την ανάγκη για προσαρμογή της δυναμικότητας, προχώρησαν σε αλλαγές, όπως η απόκτηση επιπλέον μηχανών και οι προσπάθειες βελτίωσης των δεξιοτήτων του εργατικού δυναμικού (Eyers, et al., 2018). Οι παραπάνω, όμως, αλλαγές δεν υποδεικνύουν ικανότητα ευελιξίας, καθώς ενείχαν μια μονιμότητα. Αντίθετα, μια ευέλικτη παραγωγή μπορεί να διέρχεται από διαφορετικές καταστάσεις, αλλά η επαναφορά στην αρχική της κατάσταση δεν πρέπει να απαιτεί υψηλό κόστος και χρόνο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν, μείωσαν την ικανότητα επαναφοράς σε χαμηλότερη δυναμικότητα (Oke, 2015).

Από την άλλη πλευρά, έχουν καταγραφεί και κάποιες περιπτώσεις, κατά τις οποίες εταιρίες κατάφεραν να αυξήσουν την ευελιξία της δυναμικότητάς τους, μέσω της ανακατανομής του ανθρώπινου δυναμικού σε διαφορετικές θέσεις, που αφορούσαν το στάδιο της προεπεξεργασίας και της μετέπειτα της εκτύπωσης επεξεργασίας. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί ότι ο αριθμός των εργαζομένων στις συγκεκριμένες εταιρίες ήταν μεγαλύτερος του 150, γεγονός που διευκόλυνε τις ενέργειες αυτές (Eyers, et al., 2018).

Τέλος, η προσθετική κατασκευή θα μπορούσε να συμβάλει στην αύξηση της δυναμικότητας και συνεπώς στην καλύτερη διαχείριση μιας αυξημένης ζήτησης, που δεν ήταν δυνατό να προβλεφθεί, δρώντας συμπληρωματικά και ενισχύοντας την ήδη υπάρχουσα δυναμικότητα των συμβατικών μεθόδων. Αυτό προϋποθέτει την υιοθέτηση ενός υβριδικού μοντέλου παραγωγής. Η αξιοποίηση της AM ενδείκνυται, επίσης, στην αρχή του κύκλου ζωής των προϊόντων, κατά την οποία η ζήτηση δεν είναι σταθερή. Μόλις, όμως, εκείνη σταθεροποιηθεί, μπορούν να αρχίσουν να χρησιμοποιούνται οι συμβατικές τεχνολογίες (Naghshineh, and Carvalho, 2021).

4.3.4 Ευελιξία προγράμματος παραγωγής

Ως ευελιξία του προγράμματος παραγωγής ορίζεται η ικανότητα αλλαγής του χρονοδιαγράμματός της, με στόχο την καλύτερη ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών (Naghshineh, and Carvalho, 2021). Η προσθετική κατασκευή συμβάλλει στην αύξηση της ευελιξίας αυτής, αφού λόγω της φύσης της επιτρέπει την αναβολή της παραγωγής μέχρι το τελευταίο δυνατό χρονικό σημείο. Έτσι, η προσαρμογή και η διαφοροποίηση των τελικών προϊόντων πραγματοποιείται μετά τη λήψη των παραγγελιών των πελατών, οι οποίες παρέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, με αποτέλεσμα τη μείωση ή και την εξάλειψη της ανάγκης για προβλέψεις. Γενικά, οι προβλέψεις σε επίπεδο πρώτων υλών είναι πιο ακριβείς από τις αντίστοιχες σε επίπεδο τελικών προϊόντων. Ξεκινώντας, λοιπόν, από τη δημιουργία και τη διατήρηση αδιαφοροποίητων ημικατεργασμένων προϊόντων για όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και αναβάλλοντας την τελική τους διαμόρφωση μέχρι τη λήψη των παραγγελιών, αυξάνεται η ευελιξία της εκάστοτε εταιρίας στις μεταβολές της ζήτησης και ταυτόχρονα μειώνεται η ανάγκη διατήρησης αποθεμάτων όλων των πιθανών παραλλαγών. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η επίτευξη της μαζικής εξατομίκευσης διατηρώντας παράλληλα τα οφέλη της μαζικής παραγωγής (Yang, et al., 2004; Yang, et al., 2007; Nyman and Sarlin, 2014). Επομένως, η προσθετική κατασκευή, που λόγω της φύσης της δεν περιλαμβάνει το στάδιο ανάπτυξης εργαλείων και καλουπιών και επιτρέπει την ταχεία προτυποποίηση, μειώνει τον χρόνο σχεδιασμού, γεγονός που καθιστά εφικτή την αναβολή του συγκεκριμένου σταδίου και επομένως και της παραγωγής. Την αναβολή της παραγωγής διευκολύνει, επίσης, η απουσία του σταδίου συναρμολόγησης, καθώς και ο υψηλός βαθμός αυτοματισμού που χαρακτηρίζει την τεχνολογία, ο οποίος εξαλείφει την ανάγκη για πρόσθετες χειρωνακτικές εργασίες. Έτσι, απλοποιείται η παραγωγική διαδικασία και γίνεται ευκολότερος ο προγραμματισμός της. Τέλος, η συμβολή της κατανεμημένης παραγωγής στη μείωση του χρόνου παράδοσης μέσω της δυνατότητας παραγωγής κοντά στο σημείο της ζήτησης και κατανάλωσης αποτελεί ακόμα ένα στοιχείο που επιτρέπει την προσαρμογή των χρονοδιαγραμμάτων και την αναβολή της παραγωγής, αν αυτή κριθεί απαραίτητη (Naghshineh, and Carvalho, 2021).

4.3.5 Περιβαλλοντική βιωσιμότητα

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η αποδοτικότερη αξιοποίηση των Α' υλών. Λόγω της προσθετικής της φύσης χρησιμοποιούνται μόνο οι απαραίτητες ποσότητες από κάθε υλικό, με αποτέλεσμα τη μείωση των παραγόμενων αποβλήτων. Επιπλέον, η εξάλειψη του σταδίου συναρμολόγησης, η δυνατότητα βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των προϊόντων και μείωσης του βάρους συμβάλλουν τόσο στη μείωση των απαιτούμενων κατά τη φάση της εκτύπωσης υλικών όσο και στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των τελικών προϊόντων κατά τη χρήση τους. Παράλληλα, η μείωση των απαιτούμενων πρώτων υλών έχει ως επακόλουθο τη μείωση των μεταφορών στην αλυσίδα τροφοδοσίας και άρα και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αυτές επιφέρουν. Στη μείωση αυτή συμβάλλει και η δυνατότητα κατανεμημένης παραγωγής, η οποία, επιτρέποντας την παραγωγή στο σημείο της κατανάλωσης, μειώνει τις απαιτούμενες μεταφορές. Επίσης, μειώνονται τα απορρίμματα που προκαλούνται από τη διατήρηση υπερβολικά υψηλού αριθμού αποθεμάτων χάρη στη δυνατότητα παραγωγής τους κατά παραγγελία (Ford and Despreisse, 2016). Τέλος, η προσθετική κατασκευή επιτρέπει την ανακύκλωση των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών σε μεγαλύτερο βαθμό, συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Τα υλικά που είναι ευκολότερα ανακυκλώσιμα είναι τα μέταλλα, ωστόσο είναι δυνατή και η επαναχρησιμοποίηση πολυμερών (Colorado, et al., 2020). Μάλιστα, έρευνα που εξέτασε τη χρήση ανακυκλωμένων πολυμερών σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι δεν υπήρχαν ουσιαστικές διαφορές

μεταξύ των εξαρτημάτων που είχαν εκτυπωθεί με ανακυκλωμένα υλικά και αυτών που αποτελούνταν από υλικά, τα οποία δεν είχαν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν (Ruiz, et al., 2022). Ωστόσο, πρέπει να τονισθεί ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος είναι αρκετά υψηλές και ορισμένες φορές υψηλότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών μεθόδων παραγωγής. Γενικά, η ποσοτική αξιολόγηση του περιβαλλοντικού και ενεργειακού αντίκτυπου της προσθετικής κατασκευής είναι ένα ερευνητικό πεδίο που ακόμα δεν έχει μελετηθεί επαρκώς, ενώ λίγες είναι οι αναλύσεις κύκλου ζωής που έχουν έως τώρα δημοσιευτεί (Ford and Despeisse, 2016; Prakash, et al., 2021).

4.4 Διανομή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προσθετική κατασκευή καθιστά εφικτή την κατανεμημένη παραγωγή, εγκαθιστώντας συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης εγγύτερα στην τοποθεσία των καταναλωτών, με αποτέλεσμα τη μείωση των μεταφορών και του χρόνου παράδοσης. Χάρη στη μείωση του χρόνου παράδοσης είναι δυνατή και η αναβολή της παραγωγής μέχρι τη λήψη της παραγγελίας, η οποία με τη σειρά της συντελεί στη μείωση των αποθεμάτων και του κόστους που η αποθήκευσή τους δημιουργεί (Nyman and Sarlin, 2014). Επίσης, η δυνατότητα μεταφοράς αρχείων σχεδιασμού οποιουδήποτε εξαρτήματος που πρόκειται να ενσωματωθεί στο τελικό προϊόν, καθώς και η δυνατότητα επιτόπιας εκτύπωσής του εξαλείφουν την ανάγκη μεταφοράς φυσικών εξαρτημάτων, των οποίων η παραγωγή ανατίθεται πολλές φορές σε άλλες εταιρίες και πραγματοποιείται μακριά από το σημείο της ζήτησης. Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε σύντομες και απλοποιημένες αλυσίδες τροφοδοσίας και ταχύτερους χρόνους παράδοσης, γεγονός που συμβάλει στην καλύτερη ανταπόκριση σε συνθήκες ξαφνικών μεταβολών της ζήτησης (Kunovjanek, et al., 2022; Naghshineh, and Carvalho, 2021). Θα πρέπει, ωστόσο, να τονιστεί, ότι ο χρόνος της εκτύπωσης αυτής καθαυτής είναι αρκετά μεγάλος. Μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με τον χρόνο παραγωγής μέσω συμβατικών μεθόδων (Pour, et al., 2016; Nyman and Sarlin, 2014). Επομένως, η φράση «lead time reduction», η οποία επισημαίνεται συχνά στη βιβλιογραφία ως ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αναφέρεται στη μείωση του χρόνου της παράδοσης (delivery lead time) και όχι στη μείωση του χρόνου παράδοσης της παραγωγής (production lead time).

4.5 Εξυπηρέτηση μετά την πώληση – Παραγωγή ανταλλακτικών

Συνήθως, όταν κάποιο από τα εξαρτήματα ενός προϊόντος φθαρεί, ο καταναλωτής επιλέγει, ανάλογα με την αξία του προϊόντος, το κόστος και την ευκολία επισκευής του, είτε να το απορρίψει είτε να το επισκευάσει. Προκειμένου να επισκευαστεί το προϊόν, πολλές φορές απαιτείται η απόκτηση ενός νέου εξαρτήματος (ανταλλακτικού), το οποίο θα αντικαταστήσει το φθαρμένο. Έως τώρα οι εταιρίες προσπαθούσαν να τηρούν υψηλά αποθέματα ανταλλακτικών, τόσο λόγω της δυσκολίας πρόβλεψης της ζήτησης τους (ιδιαίτερα για τα νέα προϊόντα, των οποίων τα δεδομένα σχετικά με τα ποσοστά αστοχίας δεν είναι ακόμα διαθέσιμα) όσο και λόγω του απαγορευτικά υψηλού κόστους της παραγωγής τους κατά παραγγελία. Στην αύξηση του αριθμού των αποθεμάτων συντελεί και η ανάγκη υποστήριξης των προηγούμενων γενιών προϊόντων (Khajavi, et al., 2014). Για παράδειγμα, σε μια σχετική έρευνα, με στόχο την αξιολόγηση των δυνατοτήτων της προσθετικής κατασκευής στην παροχή ανταλλακτικών, αναφέρεται ότι υπάρχουν εταιρίες που διαθέτουν ανταλλακτικά για την παροχή υπηρεσιών επισκευής έως και 10 – 15 χρόνια μετά την παραγωγή των προϊόντων. Η ανάγκη, ωστόσο, αυτή

οδηγεί σε υψηλό κόστος αποθήκευσης και αυξημένο κίνδυνο απαξίωσης (Heinen and Hoberg, 2019).

Την παραπάνω πρόκληση μπορεί να αντιμετωπίσει η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία μειώνει το κόστος της παραγωγής κατά παραγγελία, καθώς δεν απαιτούνται εργαλεία και καλούπια και ο χρόνος προετοιμασίας των μηχανών είναι μικρός. Επιπλέον, τα προϊόντα δεν αποθηκεύονται πλέον σε φυσική μορφή, αλλά σε αρχεία CAD. Τα αρχεία των τρισδιάστατων μοντέλων μπορούν να κοινοποιηθούν από τους σχεδιαστές τους σε ηλεκτρονικά αποθετήρια και να είναι προσβάσιμα είτε δωρεάν είτε έναντι αμοιβής (Ford and Despeisse, 2016). Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερη χρήσιμη σε περιπτώσεις που οι κατασκευαστές των πρωτότυπων εξαρτημάτων αποφασίζουν να διακόψουν την παραγωγή των ανταλλακτικών τους. Έτσι, συνάπτοντας μια συμφωνία άδειας εκμετάλλευσης με παρόχους υπηρεσιών τρισδιάστατης εκτύπωσης, βάσει της οποίας θα επιτρέπεται η πλήρης διαχείριση των βάσεων δεδομένων των εξαρτημάτων, με αντάλλαγμα ένα ορισμένο μερίδιο κέρδους που θα προκύπτει από την πώλησή τους, επωφελούνται τόσο οι ίδιοι οι κατασκευαστές, όσο και οι πάροχοι των υπηρεσιών AM και οι καταναλωτές (Rogers, et al., 2016). Πρέπει, ωστόσο, να αναφερθεί ότι όταν η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται για την κατασκευή ολόκληρου του προϊόντος, τότε εάν αυτό φθαρεί, θα πρέπει είτε να απορριφθεί ολόκληρο, καθώς είναι ενιαίο και δεν αποτελείται από διαφορετικά εξαρτήματα, είτε να αντικατασταθεί εξολοκλήρου από ένα νέο προϊόν. Προφανώς μια τέτοια αντικατάσταση είναι πιο δαπανηρή από την αντικατάσταση ενός απλού δυσλειτουργικού εξαρτήματος (Knofius, et al., 2019).

4.6 Επισκόπηση

Συνολικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να συμβάλει στην απλοποίηση των αλυσίδων εφοδιασμού, με αποτέλεσμα την αύξηση της ευελιξίας και την καλύτερη ανταπόκριση στις απαιτήσεις των πελατών. Χάρη στην ενιαία εκτύπωση ολόκληρων των προϊόντων η ανάγκη για προμήθεια επιμέρους εξαρτημάτων, όπως και οι αντίστοιχες σχέσεις με τους προμηθευτές, εξαλείφονται. Έτσι, το επίπεδο πολυπλοκότητας του προγραμματισμού της παραγωγής μειώνεται. Παράλληλα, η τεχνολογία επιτρέπει την κατά παραγγελία παραγωγή, αφού είναι δυνατή η απευθείας από τα σχέδια CAD παραγωγή των προϊόντων, χωρίς να είναι προηγουμένως απαραίτητη η ανάπτυξη ειδικών εργαλείων και καλουπιών και χωρίς να απαιτείται μεγάλος χρόνος για τη ρύθμιση και την προετοιμασία των μηχανών. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η υιοθέτηση μιας εκ των δυο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων για την ικανοποίηση της ζήτησης προσεγγίσεων. Δεν χρειάζεται, δηλαδή, ούτε να τηρηθεί υψηλός αριθμός αποθεμάτων τελικών προϊόντων, με συνέπεια την αύξηση του κόστους και τον κίνδυνο απαξίωσης, ούτε (στην περίπτωση μηδενικών αποθεμάτων) να αυξηθεί ο χρόνος παράδοσης, όπως γίνεται στις συμβατικές μεθόδους, οι οποίες απαιτούν χρόνο για την ανάπτυξη εργαλείων και την παραγγελία και μεταφορά όλων των απαραίτητων για την παραγωγή του τελικού προϊόντος εξαρτημάτων. Επομένως, η τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω της δυνατότητας της παραγωγής κατά παραγγελία μειώνει την αρνητική επίδραση της μεταβαλλόμενης ζήτησης στην ικανότητα ευελιξίας της παραγωγής. Επιπλέον, η σχεδιαστική ελευθερία που παρέχεται, καθιστά εφικτή την μαζική εξατομίκευση χωρίς επιπλέον κόστος και άρα την καλύτερη ανταπόκριση στις απαιτήσεις των καταναλωτών. Τέλος, λόγω του μικρού σχετικά μεγέθους των εγκαταστάσεων τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι δυνατή η κατανεμημένη παραγωγή, γεγονός που συντελεί τόσο στη μείωση των μεταφορών όσο και στη μείωση του χρόνου παράδοσης. Γενικά, η σχεδιαστική ελευθερία, η μείωση των προμηθειών, των αποθεμάτων και των μεταφορών θεωρούνται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας, επειδή μειώνονται οι αντίστοιχες δραστηριότητες που αφορούν τα στοιχεία αυτά (π.χ. οι μεταφορές περιλαμβάνουν την επιλογή του τρόπου μεταφοράς, την ακριβή δρομολόγηση, την εξασφάλιση τήρησης νομοθεσίας, την επιλογή του μεταφορέα), όπως και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, καθιστώντας τον συντονισμό τους ευκολότερο και απλοποιώντας τελικά την αλυσίδα τροφοδοσίας.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής, οι δυνατότητες που αυτά προσφέρουν και τα οφέλη που τελικά αποκομίζονται. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί, ότι υπάρχουν και κάποιοι παράγοντες, που δρουν ανασταλτικά στην ευρεία υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Το θέμα αυτό θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά προσθετικής κατασκευής, δυνατότητες και οφέλη.

Οφέλη	Δυνατότητες	Χαρακτηριστικά τεχνολογίας
Εξοικονόμηση κόστους	Τροποποίηση σχεδίων και εκτύπωσή τους χωρίς επιπλέον κόστος <ul style="list-style-type: none"> Οικονομική δημιουργία προτύπων Μαζική εξατομίκευση 	A1. Τροποποίηση μόνο των αρχείων CAD A2. Απουσία εργαλείων/καλουπιών
	Αποδοτική χρήση Α' υλών	B1. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας B2. Προσθετική φύση
	Μείωση εργατικού δυναμικού	Γ1. Απουσία (χειρωνακτικών συνήθως) εργασιών συναρμολόγησης
	Κατανεμημένη παραγωγή <ul style="list-style-type: none"> Μείωση κόστους μεταφορών 	Δ1. Μικρός όγκος εγκαταστάσεων Δ2. Φορητότητα συστημάτων AM Δ3. Μοναδικές εισροές: αρχεία CAD, Α' ύλες Ε1. Ψηφιακή μεταφορά αρχείων CAD Ε2. Τοπική προμήθεια Α' υλών Ε3. Απουσία επιμέρους εξαρτημάτων και μεταφοράς τους Ε4. Παραγωγή τελικών προϊόντων στο σημείο της ζήτησης
	Παραγωγή κατά παραγγελία <ul style="list-style-type: none"> Μείωση κόστους διατήρησης αποθεμάτων 	A1,A2 ΣΤ1. Μικρός χρόνος προετοιμασίας μηχανών Ζ1. Αποθήκευση προϊόντων σε ψηφιακή μορφή Ζ2. Απουσία αποθεμάτων επιμέρους εξαρτημάτων
Αύξηση ταχύτητας	Μείωση χρόνου σχεδιασμού <ul style="list-style-type: none"> Ταχεία προτυποποίηση Μείωση χρόνου εισαγωγής νέων προϊόντων στην αγορά 	A1, A2
	Κατανεμημένη παραγωγή <ul style="list-style-type: none"> Μείωση μεταφορών εισροών Μείωση χρόνου παράδοσης 	Δ1, Δ2, Δ3 Ε1, Ε2, Ε3
		E4
Αύξηση ευελιξίας	Μείωση αριθμού προμηθευτών	Δ3 H1. Ενιαία εκτύπωση ολόκληρου προϊόντος και εξάλειψη ανάγκης προμήθειας επιμέρους εξαρτημάτων

Αύξηση ευελιξίας	Τροποποίηση σχεδίων και εκτύπωσή τους χωρίς επιπλέον κόστος <ul style="list-style-type: none"> • Μαζική εξατομίκευση • Συμμετοχή καταναλωτή στον σχεδιασμό 	A1, A2 Θ1. Σχεδιαστική ελευθερία
	Απλοποίηση παραγωγικής διαδικασίας <ul style="list-style-type: none"> • Εύκολος προγραμματισμός παραγωγής σύμφωνα με ζήτηση 	Γ1 I1. Υψηλός βαθμός αυτοματισμού, μείωση χειρωνακτικών εργασιών
	Παραγωγή κατά παραγγελία <ul style="list-style-type: none"> • Αναβολή παραγωγής • Μείωση επίδρασης μεταβαλλόμενης ζήτησης 	A1, A2, ΣΤ1
	Κατανεμημένη παραγωγή <ul style="list-style-type: none"> • Εγκαταστάσεις σε διαφορετικές περιοχές • Εισαγωγή σε νέες αγορές • Διεύρυνση δικτύου (κανάλια διανομής, προμηθευτές) • Μείωση μεταφορών, έγκαιρη διανομή προϊόντων 	Δ1, Δ2, Δ3 E1, E2, E3, E4
Περιβαλλοντικός αντίκτυπος	Αποδοτικότερη χρήση Α' υλών	B1, B2
	Μείωση αποβλήτων κατά την εκτύπωση	B2 Κ1. Ανακύκλωση υλικών
	Βελτιώσεις σχεδιασμού με θετική επίδραση στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα κατά τη χρήση	B1, I1
	Κατανεμημένη παραγωγή <ul style="list-style-type: none"> • Μείωση μεταφορών 	Δ1, Δ2, Δ3 E1, E2, E3, E4
	Παραγωγή κατά παραγγελία <ul style="list-style-type: none"> • Μείωση αριθμού αποθεμάτων που θα απορριφθούν λόγω λανθασμένης πρόβλεψης της ζήτησης 	A1, A2, ΣΤ1

* Εδώ, ως ευελιξία ορίζεται η συνολική ικανότητα του συστήματος της αλυσίδας τροφοδοσίας να μεταβάλλει την κατάστασή του σύμφωνα με τις μεταβολές των εσωτερικών και εξωτερικών συνθηκών, έχοντας ως τελικό στόχο την καλύτερη ανταπόκριση στις απαιτήσεις των πελατών. Προφανώς, υπάρχουν αρκετές συνιστώσες, όπως η ευελιξία του σχεδιασμού, η ευελιξία του προγράμματος παραγωγής, η ευελιξία της δυναμικότητας, η ευελιξία του εξοπλισμού (ικανότητα εύκολης και γρήγορης ρύθμισης εξοπλισμού σε διαφορετικές λειτουργίες), η ευελιξία στην παραγωγή κατά παραγγελία (Eyers, et al., 2018).

4.7 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον σχεδιασμό των προϊόντων, την παραγωγή κατά παραγγελία και το περιβάλλον είναι τα κύρια θέματα, στα οποία δίνει έμφαση η βιβλιογραφία. Μάλιστα, μελετώνται συχνότερα τα οφέλη που δημιουργεί η συγκεκριμένη τεχνολογία, παρά οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή εφαρμογή της. Μια από τις περιπτώσεις που έχουν ερευνηθεί ιδιαίτερα είναι η παραγωγή ανταλλακτικών (κυρίως αυτοκινήτων), καθώς πρόκειται για προϊόντα μικρού όγκου, περίπλοκης γεωμετρίας και ασταθούς ζήτησης. Η προσθετική κατασκευή είναι ιδανική μέθοδος για την παραγωγή προϊόντων, που διαθέτουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποια πεδία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Αρχικά, απαιτείται η συλλογή περισσότερων δεδομένων από έρευνες σε διαφορετικούς κλάδους, οι οποίες να περιλαμβάνουν την παραγωγή όχι μόνο μεμονωμένων εξαρτημάτων αλλά και ολόκληρων προϊόντων. Μέσω των δεδομένων αυτών μπορεί να εξεταστεί αν πράγματι, σε τέτοιες περιπτώσεις, η προσθετική κατασκευή συμβάλλει στη μείωση της πολυπλοκότητας και την αύξηση της ευελιξίας της αλυσίδας τροφοδοσίας, καθώς και να κατανοηθεί πληρέστερα ο μηχανισμός με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό. Επίσης, θα αναδειχθούν εκτός από τα οφέλη και τα εμπόδια που προκύπτουν κατά την ενσωμάτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγική διαδικασία, με επόμενο βήμα την προσπάθεια περιορισμού τους. Κάποια από τα εμπόδια που έχουν ήδη αναφερθεί στις υπάρχουσες μελέτες θα αναλυθούν παρακάτω. Όσον αφορά στη βιωσιμότητα, η έρευνα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την εκτύπωση, κρίνεται αναγκαία.

Η υιοθέτηση μιας πιο ολιστικής προσέγγισης και η εύρεση του βέλτιστου τρόπου μετάβασης από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια ακόμα πρόταση περαιτέρω έρευνας. Κατά τη μετάβαση αυτή, προκύπτουν πολλά ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν, όπως ποιος είναι ο ιδανικός χρόνος διακοπής της λειτουργίας των παραδοσιακών μεθόδων (CM – Conventional Manufacturing), πώς πρέπει να διαχειριστεί ο εκάστοτε κατασκευαστής τα αποθέματα των παραχθέντων με CM μεθόδους προϊόντων και ποια η αξία της εμπειρίας και των διαθέσιμων δεδομένων σχετικά με την συμβατική κατασκευή. Σε ορισμένες δημοσιεύσεις αναφέρεται, ότι οι συμβατικές τεχνολογίες και η τρισδιάστατη εκτύπωση πρέπει να δρουν συμπληρωματικά. Η εύρεση της ισορροπίας ανάμεσά τους και ο τρόπος με τον οποίο θα μπορεί αυτό το υβριδικό μοντέλο να λειτουργεί επιτυχώς αποτελεί πεδίο που πρέπει να εξεταστεί. Τέλος, θα μπορούσε να μελετηθεί η ανάπτυξη και η αλλαγή της δομής της αγοράς της προσθετικής κατασκευής με την πάροδο του χρόνου (π.χ. εισαγωγή νέων προμηθευτών ή ανάπτυξη κοινότητας «κατασκευαστών», οι οποίοι στο πλαίσιο του κινήματος “Do It Yourself - DIY” αναπτύσσουν τρισδιάστατα μοντέλα και τα εκτυπώνουν σε 3D εκτυπωτές που διαθέτουν για οικιακή χρήση), καθώς και η επίδραση της στη διαμόρφωση της στρατηγικών που αφορούν τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

5. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

Από την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης παρατηρείται μια συνεχής αύξηση της παραγωγής, η οποία οφείλεται τόσο στη βελτίωση των υπαρχουσών παραγωγικών διαδικασιών όσο και στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Η αύξηση αυτή, ωστόσο, οδηγεί με τη σειρά της σε αύξηση της κατανάλωσης πρώτων υλών και ενέργειας, καθώς και σε αύξηση των παραγόμενων αποβλήτων. Για τον λόγο αυτό, η βιομηχανία έχει αρχίσει πλέον να στρέφεται προς την ανάπτυξη πιο βιώσιμων προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής, που θα συμβάλουν στην αποτροπή της κλιματικής αλλαγής, της εξάντλησης των φυσικών πόρων και των διαταραχών του οικοσυστήματος. Ο όρος «βιωσιμότητα» διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1987 στην Έκθεση Brundtland της Παγκόσμιας Επιτροπής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (WCED), στην οποία αναφερόταν, ότι βιώσιμη ανάπτυξη είναι η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος, χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύπτουν τις δικές τους ανάγκες (Arena, et al., 2009). Η βιώσιμη ανάπτυξη στηρίζεται στην αρμονική συνύπαρξη των τριών πυλώνων της - η έννοια των οποίων δεν φαίνεται να προέρχεται από μια μοναδική πηγή (Purvis, et al., 2019) - στην ισορροπία, δηλαδή, του περιβάλλοντος, της οικονομίας και της κοινωνίας. Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η μελέτη της βιωσιμότητας, μέσω των τριών αυτών πυλώνων, στο πλαίσιο της προσθετικής κατασκευής.

5.1 Περιβαλλοντική βιωσιμότητα

Συγκρίνοντας την προσθετική κατασκευή και τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ως προς τον αντίκτυπό τους στο περιβάλλον, εντοπίζονται βασικές διαφορές σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας, κατανάλωσης πόρων, παραγόμενων αποβλήτων και ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

5.1.1. Κατανάλωση ενέργειας

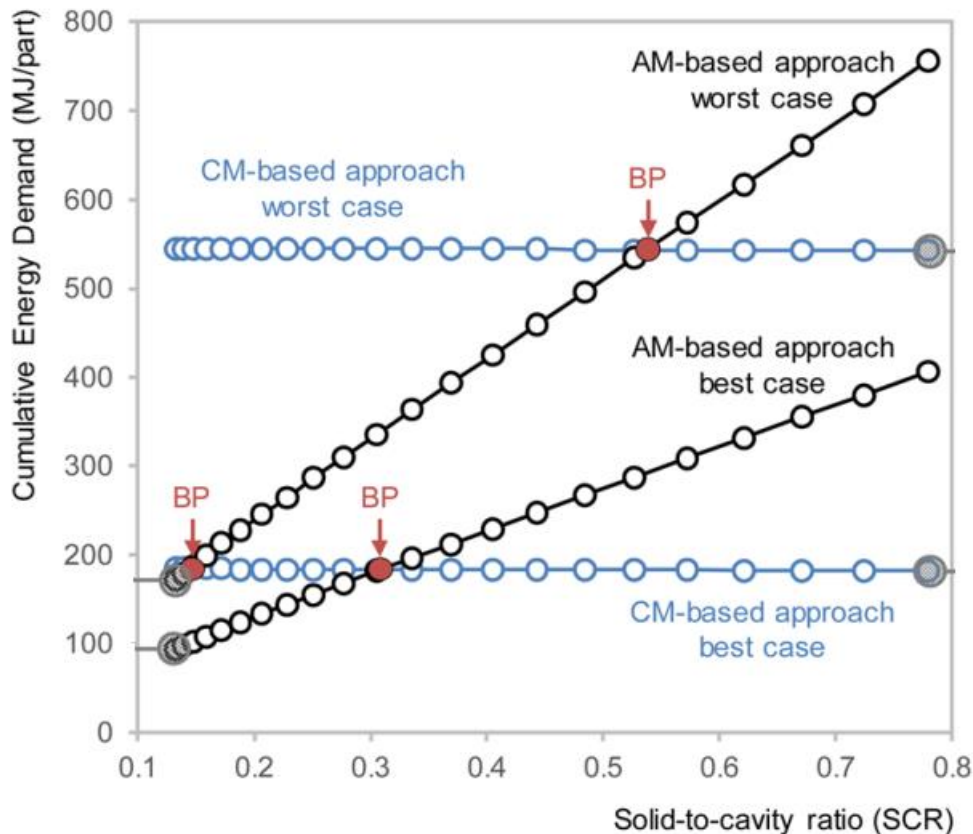
Παρόλο που κάποιες μελέτες αναφέρουν, ότι η επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, στη βιβλιογραφία υπάρχουν και εκείνες που υποστηρίζουν το αντίθετο. Η σύγκριση μεταξύ της ενέργειας, που απαιτείται στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής και αυτής, που απαιτείται στην προσθετική κατασκευή είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς κάθε AM τεχνολογία βασίζεται σε έναν εντελώς διαφορετικό τρόπο δημιουργίας στρωμάτων, χρησιμοποιεί διαφορετικές μηχανές και υλικά (π.χ. η σύντηξη μεταλλικών στρωμάτων απαιτεί περισσότερη ενέργεια από τη σύντηξη πολυμερών) και χαρακτηρίζεται από διαφορετικές παραμέτρους. Μια από αυτές τις παραμέτρους είναι ο όγκος του χώρου κατασκευής, ο οποίος καθορίζει τον αριθμό των μονάδων που μπορούν να εκτυπωθούν ταυτόχρονα από έναν 3D εκτυπωτή. Η ταυτόχρονη εκτύπωση μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις. Το πάχος στρώματος επηρεάζει, επίσης, το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται, αφού ένα μικρό πάχος (το οποίο απαιτείται για την επίτευξη επιφανειών υψηλής ποιότητας) συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των απαραίτητων για την ολοκλήρωση της κατασκευής στρωμάτων και άρα αύξηση του χρόνου εκτύπωσης, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας (Khosravanian and Reinicke, 2020). Δεδομένου λοιπόν, ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι συνάρτηση όλων των παραπάνω, είναι λογικό οι τιμές της να ποικίλλουν και να βρίσκονται σε ένα μεγάλο φάσμα. Για παράδειγμα το εύρος, στο οποίο κυμαίνεται η καταναλισκόμενη ενέργεια ανά κιλό παραγόμενου με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας προϊόντος, είναι 20.70 – 41.38 kWh/kg. Αντίθετα, το αντίστοιχο εύρος για την εξώθηση υλικού είναι 23.08 – 346.4 kWh/kg (Baumers, et al., 2010). Επομένως, καθίσταται αδύνατη η εξαγωγή ενός γενικού συμπεράσματος σχετικά με το αν η προσθετική κατασκευή καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από τις παραδοσιακές μεθόδους. Επίσης, κατά την αξιολόγηση της συνολικά απαιτούμενης για την παραγωγή ενός προϊόντος ενέργειας, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη όχι μόνο η διεργασία της εναπόθεσης αυτής καθαυτής, αλλά και η ενέργεια,

που δαπανάται για δραστηριότητες, όπως η παραγωγή και η επεξεργασία των σχεδιασμένων για την τρισδιάστατη εκτύπωση πρώτων υλών, η μεταφορά τους στις εγκαταστάσεις παραγωγής, η αποδοτική αξιοποίησή τους, η ανακύκλωση και η απόρριψη των παραγόμενων αποβλήτων. Αξίζει επίσης να αναφερθεί, ότι σημαντικά ποσά ενέργειας καταναλώνονται και κατά τη διάρκεια νεκρών χρόνων, όταν δηλαδή οι μηχανές δεν βρίσκονται σε καταστάσεις παραγωγικής λειτουργίας. Παραδείγματα τέτοιων καταστάσεων στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής είναι μηχανές, ανεμιστήρες και αντλίες για μεταφορά ψυκτικών υγρών σε αναμονή. Στην προσθετική κατασκευή ως μη παραγωγικές λειτουργίες νοούνται οι λειτουργίες που δεν λαμβάνουν χώρα κατά την εκτύπωση, αλλά καταναλώνουν ενέργεια, όπως η ψύξη μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και ο καθαρισμός του θαλάμου (Watson and Taminger, 2018).

Αρκετές μελέτες έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη μοντέλων κατανάλωσης ενέργειας για τη σύγκριση των δύο μεθόδων. Τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάλογα με τα όρια του συστήματος που εξετάζεται κάθε φορά. Συνήθως η κατανάλωση ενέργειας κατά τη μεταφορά των πρώτων υλών στις εγκαταστάσεις παραγωγής και των ανακυκλώσιμων υπολειμμάτων στον χώρο επεξεργασίας και ανακύκλωσης είναι ίδια και για τις δυο περιπτώσεις, θεωρώντας ότι η συμβατική παραγωγή και η τρισδιάστατη εκτύπωση γίνονται στις ίδιες εγκαταστάσεις. Έτσι όμως, δεν λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα μείωσης των μεταφορών που παρέχει η προσθετική κατασκευή μέσω της κατανεμημένης παραγωγής και των μειωμένων απαιτούμενων εισροών. Διαφορετικά αποτελέσματα προκύπτουν, επίσης, όταν στο υπό εξέταση σύστημα περιλαμβάνεται και η φάση χρήσης του προϊόντος, αφού η δημιουργία ελαφρύτερων προϊόντων μειώνει την κατανάλωση ενέργειας κατά τη φάση αυτή. Για παράδειγμα, εκτιμάται, ότι η μείωση του βάρους εμπορικών αεροσκαφών, χάρη στην ενσωμάτωση εξαρτημάτων παραγόμενων με τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να ελαττώσει την καταναλισκόμενη κατά τη λειτουργία τους ενέργεια κατά $777 \cdot 10^9$ kWh/y. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε μείωση του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα κατά $215 \cdot 10^6$ MT/y (Ingarao and Priarone, 2020; Watson and Taminger, 2018).

Γενικά, στη δημιουργία των μοντέλων χρησιμοποιούνται κυρίως δύο συντελεστές, οι οποίοι διευκολύνουν τη σύγκριση των δύο μεθόδων. Ο πρώτος συντελεστής δείχνει την αναλογία συμπαγούς υλικού - κοιλότητας και ισούται με τον λόγο της μάζας του τελικού προϊόντος προς τη μάζα του υλικού, που θα μπορούσε να περιέχεται στον όγκο που ορίζεται από το εξωτερικό περίβλημα το προϊόντος. Όσο περισσότερο τείνει ο συντελεστής στην μονάδα, τόσο λιγότερο υλικό πρέπει να αφαιρεθεί, προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές διαστάσεις και άρα τόσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης. Μειώνοντας βέβαια την ποσότητα των αφαιρούμενων υλικών, μειώνεται και η ενέργεια που σχετίζεται με τη μεταφορά και την ανακύκλωση ή την απόρριψή τους. Επομένως, υπάρχει μια κρίσιμη τιμή, κάτω από την οποία η προσθετική κατασκευή είναι ενεργειακά αποδοτικότερη. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της αθροιστικής ενεργειακής απαίτησης συναρτήσει της αναλογίας συμπαγούς υλικού - κοιλότητας (Σχήμα 5.1). Ο δεύτερος συντελεστής δείχνει τη μείωση του βάρους που επιτυγχάνεται χάρη στην προσθετική κατασκευή και ισούται με τον λόγο της μάζας του παραγόμενου με τρισδιάστατη εκτύπωση προϊόντος προς τη μάζα του παραγόμενου με παραδοσιακές μεθόδους προϊόντος. Προφανώς, όσο πιο συμπαγές είναι ένα προϊόν και όσο πιο απλή γεωμετρία έχει, τόσο μικρότερα είναι τα περιθώρια βελτιστοποίησης της τοπολογίας και άρα μείωσης του βάρους. Για μια δεδομένη τιμή της αναλογίας συμπαγούς υλικού - κοιλότητας υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του δεύτερου συντελεστή, στην οποία η ενέργεια που καταναλώνεται είναι ίδια και για τις δύο μεθόδους (Ingarao and Priarone, 2020; Watson and Taminger, 2018).

Τα θετικά αποτελέσματα της μείωσης του βάρους είναι, ωστόσο, περισσότερο αισθητά κατά τη φάση χρήσης των προϊόντων. Έτσι ακόμα και αν αρχικά η παραγωγή με εκτύπωση καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, υπάρχει ένας κρίσιμος χρόνος χρήσης (μικρότερος της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του προϊόντος) μετά το πέρας του οποίου η εξοικονόμηση της ενέργειας αντισταθμίζει τις αυξημένες απαιτήσεις της φάσης της εκτύπωσης.



Σχήμα 5.1: Αθροιστική ενεργειακή απαίτηση συναρτήσει αναλογίας συμπαγούς υλικού - κοιλότητας για παραγωγή με τρισδιάστατη εκτύπωση και συμβατικές μεθόδους. Στην βέλτιστη περίπτωση λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα ανακύκλωσης υλικών (Ingarao and Priarone, 2020).

5.1.2. Κατανάλωση υλικών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να συμβάλει στη μείωση των απαιτούμενων πόρων, αφού αφενός δεν προϋποθέτει την ύπαρξη εργαλείων και καλουπιών και αφετέρου επιτρέπει, χάρη στη βελτιστοποίηση της τοπολογίας, την αποδοτικότερη χρήση των πρώτων υλών. Επίσης, λόγω της προσθετικής της φύσης δεν απαιτείται η εκ των υστέρων αφαίρεση της περιττής ποσότητας υλικού, γεγονός που οδηγεί στη μείωση των παραγόμενων κατά την εκτύπωση αποβλήτων. Αντίθετα, στις συμβατικές μεθόδους μπορεί να αφαιρεθεί ως και το 87% της αρχικά χρησιμοποιούμενης μάζας. Βέβαια και στην προσθετική κατασκευή, μετά το τέλος της εκτύπωσης απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για τη μείωση της τραχύτητας των επιφανειών (π.χ. φρεζάρισμα), κατά την οποία αφαιρείται, επίσης, υλικό (Paris, et al., 2016). Ένας ακόμη παράγοντας που αυξάνει τις απαιτήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε υλικά είναι η ύπαρξη βοηθητικών δομών υποστήριξης. Προκειμένου να μπορέσει ένα στρώμα να στερεοποιηθεί, πρέπει πρώτα να εναποτεθεί πάνω σε μια ήδη υπάρχουσα επιφάνεια. Έτσι, σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η εκτύπωση προεξοχών, είναι αναγκαία η ύπαρξη εξωτερικών δομών στήριξης, οι οποίες στην συνέχεια θα αφαιρεθούν. Αντίστοιχα, η δημιουργία κοιλοτήτων προϋποθέτει την ύπαρξη εσωτερικών δομών στήριξης (Jiang, et al., 2019). Παρ' όλ' αυτά, οι δομές στήριξης συμβάλλουν σε μικρό βαθμό στην αύξηση των υλικών που θα απορριφθούν και δεν θα μπορέσουν τελικά να ανακυκλωθούν. Μάλιστα, μελέτη που σύγκρινε πειραματικά την κατανάλωση υλικών των δύο μεθόδων κατέληξε στο συμπέρασμα ότι κατά την εκτύπωση με την τεχνολογία της εξώθησης υλικού ενός προϊόντος, αποτελούμενο

από 90% κοίλα μέρη, οι βοηθητικές δομές αύξησαν το ποσοστό των απορριμμάτων κατά 10% (το αρχικό ποσοστό για την εκτύπωση 100% συμπαγούς προϊόντος ήταν 9%). Ωστόσο, στην τεχνολογία της εκτόξευσης υλικού το αντίστοιχο συνολικό (συμπεριλαμβανομένων των βοηθητικών δομών) ποσοστό ήταν 40% (Faludi, et al., 2015). Σε κάθε περίπτωση όμως, η προσθετική κατασκευή παρέχει και τη δυνατότητα της βελτιστοποίησης της τοπολογίας, η οποία αν και συντελεί στην αποδοτικότερη χρήση των πρώτων υλών, δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψη στις συγκριτικές μελέτες, καθώς στόχος είναι η σύγκριση των δύο μεθόδων κατά την παραγωγή του ίδιου ακριβώς (άρα και ίδιας γεωμετρίας) προϊόντος.

Επίσης, χάρη στη δυνατότητα της παραγωγής κατά παραγγελία μειώνεται η ανάγκη διατήρησης υψηλού αριθμού αποθεμάτων και επομένως ο κίνδυνος απαξίωσης και τελικά απόρριψης των προϊόντων, γεγονός που θα οδηγούσε σε αύξηση των απορριμμάτων, εάν τα προϊόντα αυτά δεν μπορούσαν να ανακυκλωθούν.

Τέλος, ένα ακόμη πλεονέκτημα που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η δυνατότητα ανακύκλωσης τόσο των πρώτων υλών που δεν θα συμπεριληφθούν στο τελικό προϊόν όσο και των προϊόντων που είτε είναι ελαττωματικά είτε βρίσκονται στο τέλος του κύκλου ζωής τους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετά από επεξεργασία ως τροφοδοσία των μηχανών 3D εκτύπωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρώτης περίπτωσης είναι η ανακύκλωση της - μεταλλικής συνήθως - πούδρας, που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία σύντηξης σε κλίση ως πρώτη ύλη και δεν έχει τηχθεί από το laser ή τη δέσμη ηλεκτρονίων (Rejeski, et al., 2018). Υπενθυμίζεται, ότι στη συγκεκριμένη τεχνολογία τοποθετείται αρχικά ένα στρώμα πούδρας κατά μήκος της βάσης εκτύπωσης και στη συνέχεια τήκονται συγκεκριμένες περιοχές του στρώματος σύμφωνα με τις οδηγίες του αρχείου STL. Όσον αφορά στη δεύτερη περίπτωση, είναι δυνατή η συλλογή αποβλήτων, τα οποία προέρχονται από τελικά προϊόντα, αποτελούμενα από πολυμερή, και η μετατροπή τους σε νήματα πολυμερών, με τις απαιτούμενες για την τροφοδοσία των τρισδιάστατων εκτυπωτών ρεολογικές ιδιότητες, χρησιμοποιώντας συσκευές ανακύκλωσης, που ονομάζονται Recyclebots. Αναλύσεις LCA δείχνουν, ότι με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η μείωση της ενσωματωμένης ενέργειας των νημάτων έως και 90%. Μέχρι τώρα έχουν ανακυκλωθεί με επιτυχία νήματα PLA, πολυαιθυλενίου και ABS. Μάλιστα ο συνδυασμός της τοπικής συλλογής αποβλήτων και της κατανεμημένης παραγωγής καθιστά ακόμα πιο αποτελεσματική την κυκλική οικονομία (Byard, et al., 2019). Η εν λόγω δυνατότητα μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας (της οποίας η ζήτηση για πλαστικά εξαρτήματα αγγίζει το 9% της συνολικής ζήτησης), καθώς αναμένεται να καταστεί εφικτή η ανακύκλωση έως και του 89% των υλικών που προέρχονται από το τέλος του κύκλου ζωής των αυτοκινήτων (Ruiz, et al., 2022). Πρέπει ωστόσο να αναφερθεί, ότι σε κάθε κύκλο εξώθησης – τήξης – ανακύκλωσης των νημάτων υποβαθμίζονται οι μηχανικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η ανάμιξη του ανακυκλωμένου υλικού είτε με πολυμερή που δεν έχουν ξαναχρησιμοποιηθεί είτε με υλικά ενίσχυσης, παραδείγματος χάρη με ίνες άνθρακα (Rejeski, et al., 2018).

5.1.3. Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η προσθετική κατασκευή μπορεί να συμβάλει στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέσω των παρακάτω τρόπων:

- Αποδοτικότερη χρήση των πρώτων υλών χάρη στην προσθετική φύση της τεχνολογίας και στη βελτιστοποίηση της τοπολογίας, με αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ποσότητάς τους και άρα των μεταφορών τους
- Απουσία ενδιάμεσων εξαρτημάτων και εξάλειψη ανάγκης μεταφοράς τους
- Δυνατότητα κατανεμημένης παραγωγής και επομένως μείωση των μεταφορών των τελικών προϊόντων

- Παραγωγή ελαφρύτερων εξαρτημάτων αυτοκινήτων και αεροσκαφών, η οποία οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμων

Επιπλέον, στην τρισδιάστατη εκτύπωση δεν χρησιμοποιούνται ψυκτικά και λιπαντικά υγρά κοπής και έτσι αποφεύγονται τα προβλήματα (αναπνευστικά και δερματικά) που προκαλούνται από την επαφή των εργαζομένων με αυτά, είτε μέσω της εισπνοής αερολυμάτων είτε μέσω δερματικής επαφής (Peng, et al., 2018). Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες έχουν επιβεβαιώσει την παραγωγή, λόγω θέρμανσης των πολυμερών κατά την εκτύπωση με τεχνολογίες της εξώθησης και εκτόξευσης υλικού, οργανικών πτητικών ενώσεων (VOCs), καθώς και την πυρηνοποίηση ημιπτητικών ενώσεων, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό εξαιρετικά λεπτών σωματιδίων (1-3 nm). Η έκθεση στις ενώσεις αυτές μπορεί να προκαλέσει ερεθισμούς στα μάτια, πονοκέφαλο, αναπνευστικά και αλλεργικά προβλήματα. Δεδομένου μάλιστα, ότι είναι δυνατή η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών εκτός βιομηχανικών εγκαταστάσεων (π.χ. οικιακή χρήση ή σε αίθουσες διδασκαλίας για εκπαιδευτικούς λόγους), αυξάνεται η πιθανότητα έκθεσης, αφού οι χρήστες συνήθως δεν διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό ατομικής προστασίας και οι εκτυπωτές που προορίζονται για τέτοιου είδους χρήση δεν έχουν εγκατεστημένα φίλτρα. Προς το παρόν έχουν πραγματοποιηθεί εργαστηριακές δοκιμές, οι οποίες παρακολουθούσαν την εκπομπή των σωματιδίων και των VOCs που παράγονται κατά την τήξη του ABS και του PLA σε μηχανές τεχνολογίας FDM. Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η ευρεία χρήση της. Πράγματι, παρατηρήθηκε η παραγωγή στυρενίου (10-25%) και άλλων ενώσεων (π.χ. τολουόλιο) και στις δύο περιπτώσεις. Μεγαλύτερη ωστόσο συγκέντρωση παρουσιάστηκε κατά τη χρήση του ABS. Επιπλέον, η θέρμανση του υλικού αυτού σε θερμοκρασίες αρκετά μεγαλύτερες του σημείου τήξης του οδήγησε στον σχηματισμό μονοξειδίου του άνθρακα και υδροκυανίου. Γενικά, η συνολική ποσότητα των εκπεμπόμενων VOC κυμαίνεται μεταξύ 276 και 3050 μg. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί, ότι οι συγκεντρώσεις, που έχουν καταγραφεί, δεν υπερβαίνουν τα όρια για τον χαρακτηρισμό των εκπομπών VOC σε εσωτερικούς χώρους ως επιβλαβών για την ανθρώπινη υγεία, σύμφωνα με το πρότυπο της Γαλλίας (Bravi, et al., 2019; Karwasz and Osinski, 2020).

5.2 Οικονομική βιωσιμότητα

5.2.1. Παράγοντες αύξησης κόστους προσθετικής κατασκευής

Αν και η προσθετική κατασκευή συμβάλλει στην εξοικονόμηση κόστους, μέσω της μείωσης των αποθεμάτων και των μεταφορών, της δυνατότητας παραγωγής χωρίς εργαλεία, της εξάλειψης ενδιάμεσων εξαρτημάτων και της αποδοτικότερης χρήσης των Α' υλών, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που αυξάνουν το κόστος παραγωγής. Ο σημαντικότερος παράγοντας αύξησης του κόστους είναι η ταχύτητα εκτύπωσης. Για παράδειγμα, ο ρυθμός εναπόθεσης του υλικού στην τεχνολογία της τήξης με δέσμη ηλεκτρονίων είναι περίπου 69 g/h. Αντίθετα, στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, ένας τυπικός ρυθμός διεργασίας είναι μεγαλύτερος από 100 kg/h. Αποτέλεσμα του μεγάλου ρυθμού εκτύπωσης είναι η αδυναμία επίτευξης υψηλού όγκου παραγωγής και οικονομικών κλίμακας. Μέχρι τώρα δεν έχει επιτευχθεί αύξηση της ταχύτητας, χωρίς την επακόλουθη μείωση της ακρίβειας, της ανάλυσης και της ποιότητας των επιφανειών, η οποία με την σειρά της οδηγεί σε πρόσθετες εργασίες λείανσης ή στίλβωσης και επομένως σε αύξηση του κόστους (Thomas and Gilbert, 2014; Baumers, et al., 2016; Chowdhury, et al., 2019).

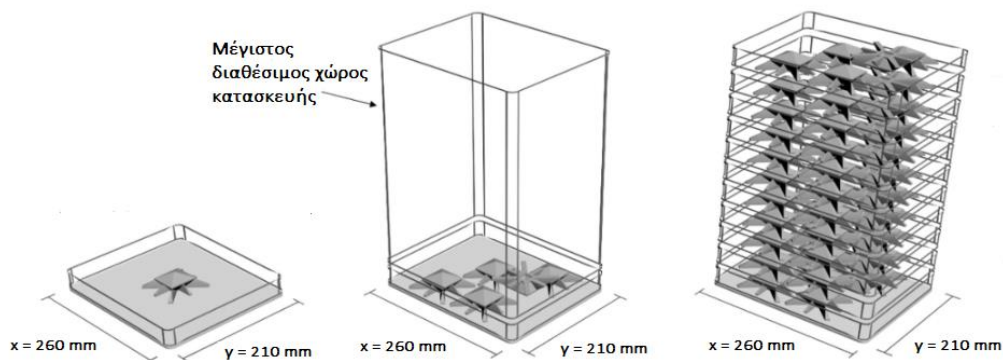
Επίσης, παρά τη συνεχή πτώση της τιμής των τρισδιάστατων εκτυπωτών, το κόστος που σχετίζεται με τις μηχανές αυτές είναι μεγάλο και μπορεί να αντιστοιχεί έως και στο 60% του συνολικού μοναδιαίου κόστους (Thomas and Gilbert, 2014). Οι Baumers, et al., υπολόγισαν ότι το ποσό που αναλογεί στο κόστος των μηχανών τεχνολογίας PBF είναι περίπου 15 €/h, θεωρώντας τις ετήσιες ώρες λειτουργίας ίσες με 5,000 h/y, τον χρόνο απόσβεσης ίσο με 8 έτη,

το αρχικό κόστος της μηχανής περίπου ίσο με 350,000 € και τα ετήσια έξοδα συντήρησης 30,000 €/γ.

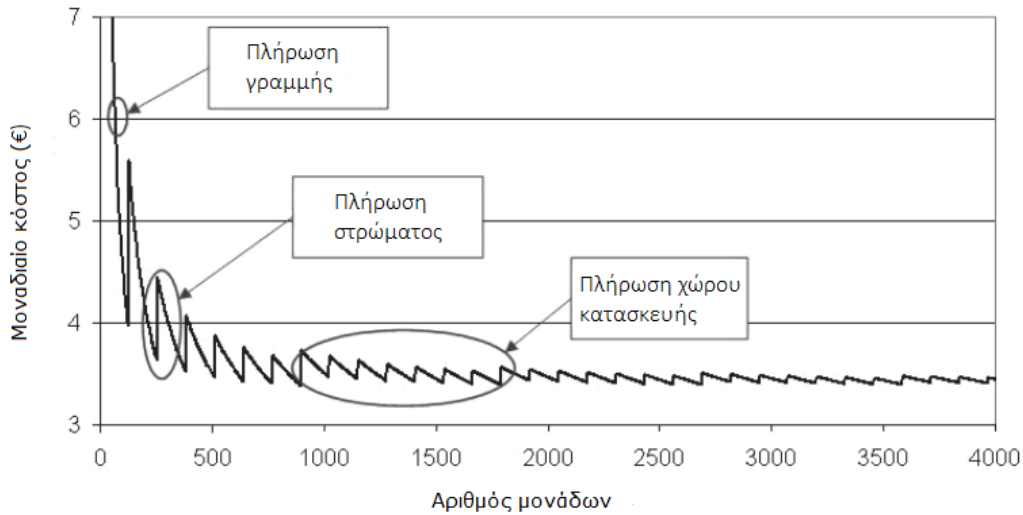
Όσον αφορά στην ύπαρξη η μη οικονομικών κλίμακας, η βιβλιογραφία αναφέρει ότι αυτές επιτυγχάνονται με τρόπο παρόμοιο, όπως και στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Βέβαια, ο χώρος, μέσα στον οποίο μπορούν να εκτυπωθούν τα προϊόντα είναι πεπερασμένος. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια κατακόρυφη παρτίδα (batch), το μέγιστο μέγεθος της οποίας καθορίζεται από τις διαστάσεις του χώρου κατασκευής. Το ποσοστό της παραγωγικής δυναμικότητας που χρησιμοποιείται ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των προϊόντων που παράγονται προς τον αριθμό των προϊόντων που θα μπορούσαν να παραχθούν, εάν δεσμευόταν όλος ο χώρος κατασκευής (Baumers and Holweg, 2019). Λόγω των πολύπλοκων γεωμετριών (π.χ. εξογκώματα, κοιλότητες) δεν είναι δυνατή η πλήρης αξιοποίηση της δυναμικότητας (Εικόνα 5.1). Χαμηλό ποσοστό αξιοποίησης της παραγωγικής δυναμικότητας οδηγεί σε αυξημένο μοναδιαίο κόστος. Αν και η καμπύλη μοναδιαίου κόστους – όγκου παραγωγής έχει παρόμοια μορφή με αυτήν που παρατηρείται στις οικονομίες κλίμακας, παρουσιάζει μια ιδιομορφία (Σχήμα 5.2). Ενώ το μοναδιαίο κόστος μειώνεται με αύξηση του όγκου παραγωγής, εμφανίζονται απότομες αυξήσεις του κόστους (το οποίο πάλι στη συνέχεια μειώνεται) στις εξής τρεις περιπτώσεις:

- Κάθε φορά που η εκτύπωση του επόμενου προϊόντος συνοδεύεται με τη δημιουργία μιας νέας σειράς στο ίδιο επίπεδο xy
- Κάθε φορά που η εκτύπωση του επόμενου προϊόντος συνοδεύεται με τη δημιουργία ενός νέου στρώματος - επιπέδου, αφού η επιφάνεια του προηγούμενου επιπέδου έχει ήδη πληρωθεί
- Κάθε φορά που αφού πληρωθεί και στη συνέχεια αδειάσει ο χώρος κατασκευής, ξεκινάει η εκτύπωση του πρώτου προϊόντος στη βάση της εκτύπωσης ($z=0$)

Η αύξηση αυτή οφείλεται στη μεγαλύτερη κατανάλωση υλικών, καθώς το υλικό τροφοδοσιάζει κινείται κατά μήκος του άξονα x. Έτσι λοιπόν, όταν δημιουργείται μια νέα σειρά, το υλικό που εναποτίθεται σχηματίζει ένα στρώμα μήκους ίσου με το μήκος του προϊόντος που πρόκειται να εκτυπωθεί και πλάτους ίσου με το πλάτος της βάσης εκτύπωσης. Η ποσότητά του, δηλαδή, είναι όση χρειάζεται για την πλήρωση όλης της σειράς και όχι μόνο του πρώτου προϊόντος. Επίσης, η δημιουργία κάθε νέας σειράς απαιτεί χρόνο τόσο για την εναπόθεση του υλικού όσο και για την θέρμανση και ψύξη του, με αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού χρόνου εκτύπωσης και άρα και των έμμεσων κοστών. Επομένως, στην περίπτωση τερματισμού της εκτύπωσης στο πρώτο προϊόν της νέας σειράς, το κόστος θα επιμεριστεί σε μικρότερο αριθμό προϊόντων, από αυτόν που θα ήταν δυνατό να κατασκευαστούν, οδηγώντας σε αύξηση του μοναδιαίου κόστους (Thomas, 2016; Ruffo, et al., 2006; Costabile, et al., 2017).



Εικόνα 5.1: Κατανομή όγκου προϊόντων στον χώρο κατασκευής και αξιοποίηση της παραγωγικής δυναμικότητας του συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης (Baumers and Holweg, 2019).



Σχήμα 5.2: Σχέση μοναδιαίου κόστους και όγκου παραγωγής στην τρισδιάστατη εκτύπωση (Ruffo, et al., 2006).

Επιπλέον, παρόλο που, χάρη στη σχεδιαστική ελευθερία και τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας, η απαιτούμενη για την εκτύπωση ποσότητα πρώτων υλών είναι μικρότερη, το κόστος τους υπερβαίνει αρκετά το κόστος των χρησιμοποιούμενων στις παραδοσιακές μεθόδους υλικών. Έχει αναφερθεί, ότι μέταλλα σε μορφή πούδρας και πλαστικά σε νήματα, που προορίζονται για χρήση σε συσκευές προσθετικής κατασκευής, κοστίζουν 1-3 φορές και έως και 100 φορές περισσότερο, αντίστοιχα (Savolainen and Collan, 2020). Η διαφορά του κόστους οφείλεται κυρίως στην επιπλέον επεξεργασία που απαιτείται, προκειμένου να καταστούν οι πρώτες ύλες κατάλληλες για χρήση. Προς το παρόν, το κόστος των υλικών ανά μονάδα αντιστοιχούν στο 15% έως και 30% του συνολικού της κόστους (Niaki and Nonino, 2018; Thomas and Gilbert, 2014). Το γεγονός αυτό αναμένεται, ωστόσο, να αλλάξει όχι μόνο λόγω των προόδων που σημειώνονται στην ανάπτυξη υλικών για την τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά και λόγω της εισαγωγής νέων προμηθευτών στην αγορά.

5.2.2. Σύγκριση προσθετικής κατασκευής και συμβατικών μεθόδων παραγωγής

Προς το παρόν, δεν υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολλές μελέτες, που να έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη μοντέλων κόστους για τη σύγκριση της προσθετικής κατασκευής και των συμβατικών μεθόδων και την εύρεση των νεκρών σημείων. Οι υπάρχουσες, ωστόσο, μελέτες χρησιμοποιούν την κοστολόγηση κατά δραστηριότητα προκειμένου να υπολογίσουν το κόστος της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ως άμεσο κόστος θεωρείται μόνο το κόστος των υλικών (Thomas, 2016), το οποίο ισούται με

$$\text{Άμεσο κόστος} = \text{Κόστος υλικών} = \text{Μάζα υλικών (kg)} \cdot \text{Τιμή υλικών (€/kg)} \quad (1)$$

Στα υλικά συμπεριλαμβάνονται και τα υλικά που απαιτούνται για τη δημιουργία των βοηθητικών δομών.

Ο συνολικός χρόνος της διεργασίας είναι ίσος με:

$$T_{\text{διεργασίας}} = T_{\text{προεπεξεργασίας}} + T_{\text{εκτύπωσης}} + T_{\text{μετεπεξεργασίας}} \quad (2)$$

Ο χρόνος προεπεξεργασίας περιλαμβάνει τον χρόνο προετοιμασίας του αρχείου CAD, τον χρόνο δημιουργίας του αρχείου STL (καθορισμός προσανατολισμού, σχεδιασμός δομών στήριξης, καθορισμός πάχους στρώματος) και τον χρόνο προετοιμασίας της μηχανής (φόρτωση αρχείων, προθέρμανση μηχανής, προετοιμασία και φόρτωση υλικών). Αξίζει να αναφερθεί ότι ο χρόνος προετοιμασίας της μηχανής είναι ιδιαίτερα μικρός (περίπου μισή ώρα) σε σχέση με την χύτευση με έγχυση.

Ο χρόνος μετεπεξεργασίας περιλαμβάνει τον χρόνο ψύξης των προϊόντων, τον χρόνο αφαίρεσης των βοηθητικών δομών, τον χρόνο καθαρισμού, λείανσης και αφαίρεσης των προϊόντων από τη βάση εκτύπωσης (Ding, et al., 2021).

Το σύνολο του έμμεσου κόστους δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις (Ding, et al., 2021; Tosello, et al., 2019):

$$\begin{aligned} \text{Έμμεσο κόστος} & & (3) \\ &= \text{Κόστος προεπεξεργασίας} + \text{Κόστος εκτύπωσης} \\ &+ \text{Κόστος μετεπεξεργασίας} + \text{ΓΒΕ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Κόστος προεπεξεργασίας} & & (4) \\ &= T_{\text{προθέρμανσης}} (h) \cdot [E_{\text{προθέρμανσης}} (W) \cdot P_{\text{ενέργειας}} (\text{€/kWh})] \\ &+ T_{\text{προετοιμασίας αρχείων + υλικών}} (h) \cdot \Omega_{\text{ρομίσθιο}} (\text{€/h}) \end{aligned}$$

$$\text{Κόστος εκτύπωσης} = \frac{T_{\text{εκτύπωσης}}}{1 - k} (h) \cdot [A + B] \quad (5)$$

Όπου,

k : συντελεστής αστοχίας, 5% – 20%

$$A = E_{\text{εκτύπωσης}} (W) \cdot P_{\text{ενέργειας}} (\text{€/kWh}) \quad (6)$$

$$B = \frac{\text{Τιμή Αγοράς Εκτυπωτή (€)}}{\text{Διάρκεια Ζωής (y)} \cdot \Omega_{\text{ρες λειτουργίας}} (\text{h/y}) \cdot \text{Ποσοστό χρησιμοποιούμενης δυναμικότητας}(\%) } \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Κόστος μετεπεξεργασίας} & & (8) \\ &= T_{\text{μετεπεξεργασίας}} (h) \cdot [E_{\text{μετεπεξεργασίας}} (W) \cdot P_{\text{ενέργειας}} (\text{€/kWh}) \\ &+ \Omega_{\text{ρομίσθιο}} (\text{€/h})] \end{aligned}$$

Τέλος, η βιβλιογραφία αναφέρει ότι τα ΓΒΕ (περιλαμβάνονται κόστη ενοικίασης, συντήρησης εξοπλισμού, κ.ά.) αντιστοιχούν περίπου στο 10% του συνολικού κόστους παραγωγής. Ο συντελεστής καταλογισμού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ως βάση τις ώρες λειτουργίας της μηχανής (Tosello, et al., 2019).

B. Χύτευση με έγχυση

Στη συγκεκριμένη μέθοδο παραγωγής το μεγαλύτερο μέρος του κόστους προέρχεται από την κατασκευή της μήτρας. Ακολουθούν τα υλικά, καθώς και η ίδια η διαδικασία της παραγωγής. Ο χρόνος κατασκευής της μήτρας μπορεί να κυμαίνεται αναλόγως την πολυπλοκότητά του από 2 έως 6 μέρες. Αρκετά μεγάλος όμως είναι και ο χρόνος προετοιμασίας της μηχανής, ο οποίος περιλαμβάνει τον χρόνο προθέρμανσης, τον χρόνο ρύθμισης των παραμέτρων της μηχανής, που συνήθως διαφέρουν από προϊόν σε προϊόν και πρέπει να ρυθμίζονται εκ νέου, κάθε φορά που αλλάζει η μήτρα, και τον χρόνο ρύθμισης της μήτρας (αφαίρεση προηγούμενης μήτρας και τοποθέτηση νέας). Συνολικά ο χρόνος προετοιμασίας μπορεί να ξεπεράσει τις δέκα ώρες (Franchetti and Kress, 2017). Αυτός είναι και ο λόγος που, αν κατά τη σύγκριση των δύο μεθόδων υποτεθεί ότι το προϊόν είναι νέο και δεν έχουν κατασκευαστεί ακόμα οι μήτρες, ο χρόνος παράδοσης της χύτευσης είναι μεγαλύτερος (παρόλο που η χύτευση αυτή καθαυτή διαρκεί λιγότερο από την εκτύπωση). Παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις του κόστους των υλικών και της παραγωγής.

$$\text{Κόστος υλικών} = \text{Μάζα εισερχόμενου υλικού (kg)} \cdot \text{Κόστος υλικών (€/kg)} \quad (9)$$

$$\text{Κόστος παραγωγής} = \text{Κόστος προετοιμασίας} + \text{Κόστος χύτευσης} \quad (10)$$

Όπου

$$\text{Κόστος προετοιμασίας} = \frac{T_{\text{προετοιμασίας}} (h) \cdot \Omega_{\text{ρομίσθιο}} (\text{€/h})}{B} \quad (11)$$

$$\text{Κόστος χύτευσης} = \frac{[\text{Κόστος λειτουργίας μηχανής (€/h)} + \alpha \cdot \Omega_{\text{ρομίσθιο}} (\text{€/h})] \cdot \text{Αριθμός κύκλων} \cdot \text{Χρόνος κύκλου (s)}}{3600} \quad (12)$$

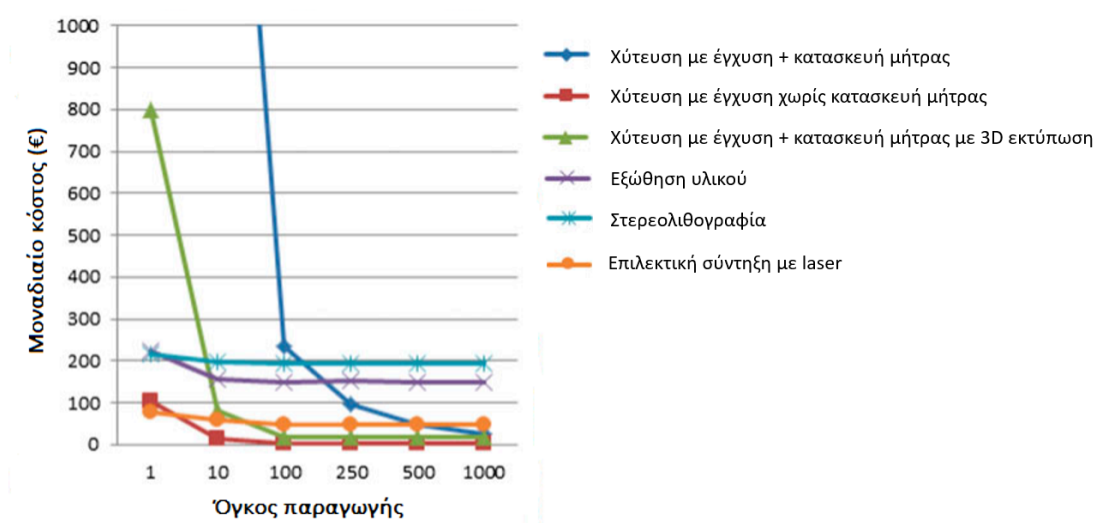
Το B είναι ο αριθμός των κύκλων έγχυσης που πραγματοποιούνται χωρίς αλλαγή μήτρας.

Στο κόστος λειτουργίας της μηχανής περιλαμβάνονται η απόσβεση της μηχανής και της μήτρας, τα έξοδα συντήρησης, η καταναλισκόμενη ενέργεια.

Συνήθως οι μηχανές έγχυσης λειτουργούν συνεχώς χωρίς να απαιτείται άμεση εργασία του χειριστή. Ο συντελεστής α δείχνει το ποσοστό του χρόνου, κατά τον οποίο ο εργαζόμενος εμπλέκεται πραγματικά στη λειτουργία της μηχανής. Συνήθως, $\alpha = 20\%$ (Tosello, et al., 2019).

Όσες μελέτες ασχολήθηκαν με τη συγκριτική αξιολόγηση του κόστους της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της χύτευσης με έγχυση εντόπισαν ένα νεκρό σημείο σε μονάδες παραγόμενου προϊόντος, στο οποίο τα κόστη των δύο μεθόδων είναι ίσα. Εάν οι μονάδες που παράγονται είναι περισσότερες από το νεκρό σημείο, τότε οικονομικότερη είναι η χύτευση. Το σημείο αυτό διαφέρει ανάλογα με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και το μέγεθος των προϊόντων. Για παράδειγμα η ανάλυση των Franchetti and Kress κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι το νεκρό σημείο είναι 200 μονάδες ενώ στην ανάλυση των Atzeni and Salm (2012) το νεκρό σημείο ήταν 42 μονάδες. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι μελέτες συμφωνούν, ότι η χύτευση με έγχυση δύναται να παράγει μεγάλες ποσότητες πολύ πιο γρήγορα από την προσθετική κατασκευή. Η τελευταία ενδείκνυται για μικρότερα μεγέθη παρτίδας. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 5.3) παρουσιάζεται το μοναδιαίο κόστος για 1) την περίπτωση της χύτευσης με έγχυση λαμβάνοντας υπόψη την κατασκευή της μήτρας, 2) την περίπτωση της χύτευσης με έγχυση, στην οποία οι μήτρες είναι ήδη διαθέσιμες, 3) την περίπτωση της χύτευσης με έγχυση και κατασκευής της μήτρας της με τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς και για τρεις ακόμη διαφορετικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Όπως φαίνεται, για όγκους παραγωγής

έως 100 μονάδες, η χύτευση με κατασκευή της μήτρας είναι η πιο ακριβή μέθοδος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο υψηλό κόστος κατασκευής της μήτρας. Βέβαια, η ίδια μήτρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκατομμύρια κύκλους και για τον λόγο αυτό σε μεγαλύτερους όγκους το κόστος μειώνεται. Η περίπτωση της χύτευσης με μήτρες που έχουν ήδη κατασκευαστεί είναι η πιο οικονομική επιλογή για σχεδόν κάθε όγκο παραγωγής. Εξαίρεση αποτελεί το φάσμα των 1 – 5 μονάδων, στο οποίο προτιμάται η επιλεκτική σύντηξη με laser. Η τεχνολογία αυτή είναι οικονομικότερη από όλες τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χύτευση με την τρισδιάστατα εκτυπωμένη μήτρα, η οποία στην περιοχή των 100 – 1000 μονάδων είναι σχεδόν το ίδιο οικονομική με τη χύτευση που έχει ήδη διαθέσιμη τη μήτρα της. Γενικά, εξάγεται το συμπέρασμα, ότι η χύτευση με έγχυση συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής της μήτρας είναι οικονομικά συμφέρουσα σε όγκους μεγαλύτερους των 500 μονάδων. Σε μικρότερους όγκους προτιμάται η επιλογή είτε της επιλεκτικής σύντηξης με laser είτε της έγχυσης, στην οποία η μήτρα έχει κατασκευαστεί με τρισδιάστατη εκτύπωση (Achillas, et al., 2017).



Σχήμα 5.3: Μοναδιαίο κόστος συναρτήσει όγκου παραγωγής για τις περιπτώσεις χύτευσης με έγχυση με και χωρίς κατασκευή της μήτρας, χύτευσης και κατασκευής της μήτρας με εκτόξευση υλικού και τις περιπτώσεις της εξώθησης υλικού, της στερεολιθογραφίας και της επιλεκτικής σύντηξης με laser (Achillas, et al., 2017).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, ότι για την καλύτερη σύγκριση της τρισδιάστατης εκτύπωσης και των συμβατικών μεθόδων παραγωγής πρέπει να ληφθούν υπόψη και να συμπεριληφθούν στα μοντέλα κόστους όχι μόνο τα κόστη που σχετίζονται με την παραγωγή αυτή καθαυτή, αλλά και τα κόστη που αφορούν τις μεταφορές και τη διατήρηση αποθεμάτων των πρώτων υλών και των τελικών προϊόντων. Η επίδραση της προσθετικής κατασκευής στις συγκεκριμένες δραστηριότητες είναι αρκετά ισχυρή και πιθανόν η σχέση του κόστους των δύο μεθόδων σε επίπεδο συστήματος να είναι διαφορετική από εκείνη που παρατηρείται σε επίπεδο διεργασίας (Thomas, 2016).

5.3 Κοινωνική βιωσιμότητα

Η κοινωνική βιωσιμότητα έχει μελετηθεί λιγότερο συγκριτικά με την περιβαλλοντική και την οικονομική βιωσιμότητα, λόγω της περίπλοκης φύσης της και της δυσκολίας ποσοτικοποίησής της. Δεδομένου, μάλιστα, ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία αναδυόμενη τεχνολογία, το «κενό» αυτό στη βιβλιογραφία παραμένει αρκετά μεγάλο (Beltagui, et al., 2020). Μια από τις κοινωνικές επιπτώσεις που αναφέρεται, ωστόσο, είναι η εξάλειψη αρκετών θέσεων χειρωνακτικής εργασίας λόγω του υψηλού βαθμού αυτοματισμού των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Θέσεις που καλύπτονται από ανειδίκευτους εργάτες θα υπάρχουν μόνο για εργασίες πριν και μετά την εκτύπωση. Βέβαια από την άλλη πλευρά, αναμένεται μεγάλη αύξηση της ζήτησης προσωπικού με υψηλές δεξιότητες στον ψηφιακό σχεδιασμό (Hohn and Durach, 2021). Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή επιτρέπει την κατανομημένη παραγωγή, γεγονός που θα οδηγήσει σε μείωση των «αποστάσεων» μεταξύ των προμηθευτών, των παραγωγών και των καταναλωτών, μέσω της μετατόπισης της παραγωγής πιο κοντά στις καταναλώτριες χώρες και της δυνατότητας προμήθειας των βασικών πρώτων υλών τοπικά (δεν απαιτείται προμήθεια ειδικών ενδιάμεσων εξαρτημάτων). Έτσι, θα ενισχυθεί η τοπική οικονομία και αγορά εργασίας (Naghshineh, et al., 2021).

Μια ακόμη συνεισφορά της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η δυνατότητα μετριασμού των επιπτώσεων έκτακτων και απρόβλεπτων καταστάσεων (π.χ. φυσικές καταστροφές) μέσω της ταχείας παραγωγής εξοπλισμού και άλλων ειδών που χρειάζονται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση της πανδημίας του COVID-19, η οποία «διατάραξε» την εφοδιαστική αλυσίδα και ανέδειξε την προσθετική κατασκευή ως μια ευέλικτη λύση για την τοπική προμήθεια εξοπλισμού ατομικής προστασίας και ιατρικών συσκευών στα νοσοκομεία (Longhitano, et al., 2021; Naghshineh, et al., 2021). Επίσης, η συνεχής πρόοδος σχετικά με την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα της ιατρικής έχει καταστήσει πλέον εφικτή την παραγωγή εξατομικευμένων εμφυτευμάτων, προσθετικών μελών και ιατροτεχνολογικών συσκευών, γεγονός που προάγει την υγεία του κοινωνικού συνόλου. Ωστόσο, η μη εξουσιοδοτημένη χρήση της τεχνολογίας για την παραγωγή ιατρικών ή φαρμακευτικών προϊόντων σε μη ελεγχόμενους χώρους από καταναλωτές που διαθέτουν 3D εκτυπωτές και χρησιμοποιούν μη εγκεκριμένα σχέδια από ηλεκτρονικά αποθετήρια είναι ένα θέμα που εγείρει προβληματισμούς και απαιτεί την ανάπτυξη αξιόπιστων λύσεων. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση σάρωσης αντικειμένων που βρίσκονται ήδη σε φυσική μορφή, με στόχο αρχικά τη δημιουργία των ψηφιακών τους αρχείων και στη συνέχεια την εκτύπωση φυσικών αντιγράφων. Πρέπει, δηλαδή, να δημιουργηθούν κατάλληλοι μηχανισμοί προστασίας των πνευματικών δικαιωμάτων. Επίσης, απαιτείται η θέσπιση ειδικών κανονισμών, οι οποίοι θα ρυθμίζουν τόσο την παραγωγή όσο και την πρόσβαση σε αρχεία CAD, επικίνδυνων για την ασφάλεια της κοινωνίας αγαθών (π.χ. πυροβόλα όπλα) (Caviggioli and Ughetto, 2019).

Γενικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση και η κοινότητα «σχεδιαστών και κατασκευαστών», που έχει αναπτυχθεί γύρω από αυτή, παρέχει στους καταναλωτές δυνατότητες (όπως η συμμετοχή στον σχεδιασμό των προϊόντων, η πρόσβαση σε αποθετήρια αρχείων CAD και η εκτύπωση σε εκτυπωτές οικιακής χρήσης), οι οποίες μπορούν, υπό την προϋπόθεση διευθέτησης των προαναφερθέντων προβλημάτων, να συμβάλουν στην καλύτερη ικανοποίηση των αναγκών τους (Naghshineh, et al., 2021).

5.4 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η βιωσιμότητα της προσθετικής κατασκευής είναι ένα θέμα που αρχίζει να εξετάζεται όλο και περισσότερο στη βιβλιογραφία. Τα περισσότερα άρθρα αφορούν την επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο περιβάλλον, ενώ αρκετές μελέτες επικεντρώνονται και στην οικονομική βιωσιμότητα. Η κοινωνική βιωσιμότητα, από την άλλη μεριά, έχει ελάχιστα εξετασθεί.

Όσον αφορά στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, εξετάζονται κυρίως τα θέματα της κατανάλωσης υλικών και ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσονται τα αντίστοιχα μοντέλα, ώστε να συγκριθεί η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής με τις συμβατικές τεχνολογίες. Βέβαια, επειδή τα περισσότερα μοντέλα χρησιμοποιούν την τεχνολογία της σύντηξης πούδρας σε κλίνη και η κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης διαφέρει σημαντικά, προτείνεται η ανάπτυξη μοντέλων και για τις υπόλοιπες τεχνολογίες, καθώς και για διαφορετικά υλικά. Στα παραπάνω μοντέλα θα πρέπει επίσης να συμπεριληφθεί η εξοικονόμηση ενέργειας και υλικών που επιτυγχάνεται χάρη στη μείωση των αποθεμάτων και των μεταφορών, καθώς και η θετική επίδραση που έχει η δυνατότητα βελτιστοποίησης της τοπολογίας κατά τη φάση χρήσης των προϊόντων. Με τον τρόπο αυτό, θα σχηματιστεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τη βιωσιμότητα της προσθετικής κατασκευής. Μάλιστα, προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα δεδομένα βιωσιμότητας και να διευκολύνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν τυποποιημένες μεθοδολογίες σύγκρισης της κατανάλωσης ενέργειας και υλικών, καθώς και να κατασκευαστεί μια ενιαία, τυποποιημένη βάση δεδομένων απογραφής στοιχείων του κύκλου ζωής για διαφορετικές AM τεχνολογίες, οι οποίες θα περιλαμβάνουν δεδομένα σχετικά με τα υλικά, τα τρισδιάστατα σχέδια, τις συνθήκες εκτύπωσης, τα μηχανήματα και τις εφαρμογές. Ένα ακόμη πεδίο που χρειάζεται περαιτέρω έρευνα είναι η ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας και ανακύκλωσης των μη χρησιμοποιούμενων στην εκτύπωση υλικών, καθώς και των τελικών προϊόντων της, προκειμένου αυτά να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των νέων παραγόμενων προϊόντων. Τέλος, απαιτούνται περισσότερες έρευνες σχετικά με τις εκπομπές των πτητικών οργανικών ενώσεων κατά τη φάση της εκτύπωσης (στις παρούσες μελέτες χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά και άρα οι εκπομπές διαφέρουν τόσο ως προς τη σύσταση όσο και ως προς τη συγκέντρωση, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων), ώστε να προσδιοριστεί και να αξιολογηθεί η κλίμακα έκθεσης, και να προταθούν τρόποι περιορισμού της, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο.

Όσον αφορά στην οικονομική βιωσιμότητα, χρειάζεται και εδώ να αναπτυχθούν μοντέλα κόστους για συνδυασμούς διαφορετικών υλικών και τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής, τα οποία θα περιλαμβάνουν όχι μόνο τα κόστη της διεργασίας της εκτύπωσης, αλλά και όσα προκύπτουν από δραστηριότητες σε όλο το μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Προτείνεται, επίσης, η μελέτη της περίπτωσης λειτουργίας πολλών 3D μηχανών σε κατανεμημένο δίκτυο, καθώς και η μελέτη της περίπτωσης ενσωμάτωσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε συστήματα παραγωγής με συμβατικές μεθόδους (π.χ. παραγωγή εργαλείων που χρησιμοποιούνται στη χύτευση με έγχυση μέσω προσθετικής κατασκευής). Βέβαια τα αποτελέσματα, που θα προκύψουν από τις αναλύσεις και τα μοντέλα αυτά, θα πρέπει να ερμηνευτούν με βάση το ευρύτερο πλαίσιο μέσα στο οποίο εφαρμόζεται η προσθετική κατασκευή, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες, όπως η ζήτηση ενός προϊόντος, ο χρόνος παράδοσης, κ.ά. Για παράδειγμα, η υπόθεση της παραγωγής μεγάλης κλίμακας γίνεται αποκλειστικά βάσει του απόλυτου μέτρου του όγκου παραγωγής μιας μεμονωμένης μηχανής, χωρίς να δίνεται προσοχή στο αντίστοιχο μέγεθος της αγοράς. Επιπλέον, η αύξηση της χρησιμοποιούμενης δυναμικότητας θεωρείται ότι οδηγεί σε μείωση του κόστους, χωρίς όμως να υπολογίζεται η πιθανή παράλληλη αύξηση του χρόνου παράδοσης σε μη αποδεκτό επίπεδο. Επίσης, ένα ακόμη πεδίο, που πρέπει να διερευνηθεί, είναι οι λόγοι αστοχίας κατά την εκτύπωση, ο τρόπος συσχέτισης τους με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και την τεχνολογία που έχει επιλεγεί και η ανάπτυξη λύσεων για τον περιορισμό τους.

Τέλος, η μελέτη της επίδρασης της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κοινωνική βιωσιμότητα είναι ένα αρκετά περίπλοκο θέμα, αφού προκειμένου να αναδειχθούν και να επαληθευτούν οι κοινωνικές επιπτώσεις της τεχνολογίας (π.χ. μείωση θέσεων χειρωνακτικής εργασίας) απαιτείται χρόνος και συλλογή περισσότερων δεδομένων από έρευνες σε διαφορετικούς κλάδους. Βέβαια, έχει καταστεί ήδη σαφές, ότι η ευρύτερη υιοθέτηση της προσθετικής κατασκευής προϋποθέτει τη δημιουργία προτύπων και κατευθυντήριων οδηγιών από αρμόδιους φορείς, καθώς και την ανάπτυξη μηχανισμών προστασίας των δικαιωμάτων

πνευματικής ιδιοκτησίας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται, ότι η εκτύπωση προϊόντων από αρχεία τρισδιάστατων μοντέλων, που βρίσκονται σε ηλεκτρονικά αποθετήρια κοινής χρήσης, είναι ασφαλής για τους τελικούς χρήστες και δεν παραβιάζει τα πνευματικά δικαιώματα των δημιουργών των αρχείων.

6. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Αν και η προσθετική κατασκευή παρουσιάζει κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η σχεδιαστική ελευθερία, η δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων δομών και η μαζική εξατομίκευση, υπάρχουν ορισμένα εμπόδια που προς το παρόν περιορίζουν την ευρύτερη υιοθέτησή της από τις βιομηχανίες. Στα εμπόδια αυτά περιλαμβάνονται ο σχηματισμός πορώδους μεταξύ των στρωμάτων, η χαμηλή ποιότητα επιφανειών, η έλλειψη προτύπων, η έλλειψη μηχανισμών προστασίας των ψηφιακών δεδομένων σχεδιασμού και των πνευματικών δικαιωμάτων, η χαμηλή ταχύτητα, το υψηλό κόστος εκτύπωσης, η περιορισμένη χωρητικότητα των θαλάμων εκτύπωσης και η έλλειψη μεγάλης ποικιλίας διαθέσιμων υλικών.

6.1 Ποιότητα

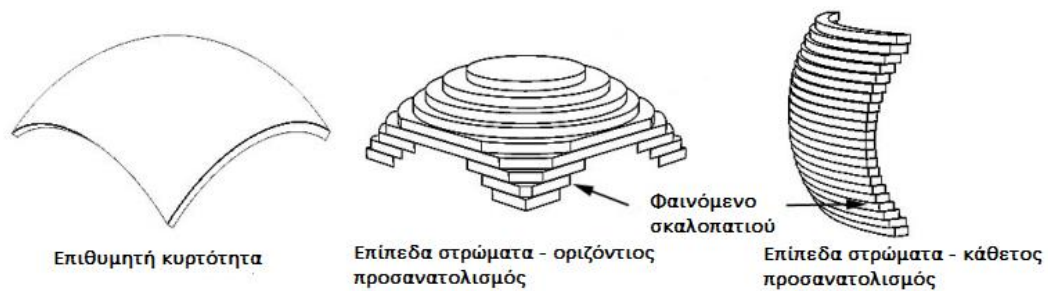
Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η αύξηση του πορώδους των προϊόντων λόγω του κενού που δημιουργείται μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούν υλικά σε μορφή νήματος (π.χ. εξώθηση υλικού) και μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση ανισοτροπικής συμπεριφοράς ή ακόμα και σε αποκόλληση των στρωμάτων μετά το τέλος της εκτύπωσης (Ngo, et al., 2018). Ο όρος «ανισοτροπική συμπεριφορά» αναφέρεται στην εμφάνιση διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων (μηχανικών, θερμικών, μαγνητικών, κ.ά.) σε διαφορετικούς άξονες. Δεδομένου, λοιπόν, ότι στην κατασκευή με τρισδιάστατη εκτύπωση, η μικροδομή του υλικού μέσα σε κάθε στρώμα είναι διαφορετική από εκείνη στα όρια μεταξύ των στρωμάτων, θα υπάρχει πάντα ένας άξονας (ο κατακόρυφος άξονας του ύψους z) ή και δύο (ο άξονας του ύψους z και ο άξονας του πλάτους y), στους οποίους οι μηχανικές ιδιότητες θα είναι πιο υποβαθμισμένες συγκριτικά με τις μηχανικές ιδιότητες στον άξονα του μήκους (Modrić, et al., 2020). Οι επιστήμονες μελετούν την επίδραση των μεθόδων της θερμής ισοστατικής συμπίεσης και της ανόπτησης στη μείωση του πορώδους και στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, καθώς και η μεμονωμένη εφαρμογή της ισοστατικής συμπίεσης φαίνεται να έχουν θετικά αποτελέσματα (Chadha, et al., 2020; Jain, et al., 2022).

Ένα ακόμη μειονέκτημα της προσθετικής κατασκευής είναι η διάκριση των επιμέρους στρωμάτων στις επιφάνειες του προϊόντος ή της κατασκευής (Εικόνα 6.1), με αποτέλεσμα την ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας, με χημικές ή φυσικές μεθόδους, προκειμένου να πληρούνται τα αισθητικά κριτήρια, τα οποία και αποτελούν μία από τις βασικές διαστάσεις ποιότητας των προϊόντων. Βέβαια, η περαιτέρω επεξεργασία συνεπάγεται αύξηση τόσο του χρόνου όσο και του κόστους παραγωγής. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις (π.χ. ικριώματα), στις οποίες τα χαρακτηριστικά εξωτερικής εμφάνισης δεν θεωρούνται σημαντικά. Το αντίθετο ισχύει στις περιπτώσεις χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης για κατασκευή έργων υποδομής, παιχνιδιών, ειδών ένδυσης, κ.ά. Γενικά, οι τεχνολογίες, που τείνουν περισσότερο να δημιουργούν προϊόντα με ευδιάκριτα στις επιφάνειες στρώματα, είναι εκείνες που τροφοδοτούνται με υλικά σε μορφή νήματος. Σε τεχνολογίες, όπως ο φωτοπολυμερισμός και η σύντηξη πούδρας σε κλίση δεν παρατηρείται έντονα το συγκεκριμένο φαινόμενο, καθώς ο τρόπος λειτουργίας τους επιτρέπει την καλύτερη επαφή των στρωμάτων κατά τη δημιουργία τους. Στην PBF τεχνολογία, για παράδειγμα, κατά την τήξη του ενός στρώματος θερμαίνεται και η ανώτερη επιφάνεια του προηγούμενου στρώματος, με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη διάχυση και ένωση των κόκκων του υλικού των δύο στρωμάτων και άρα τη μείωση του κενού ανάμεσά τους (Ngo, et al., 2018).



Εικόνα 6.1: Διάκριση στρωμάτων σε δομή σκυροδέματος, κατασκευασμένη με τρισδιάστατη εκτύπωση (Ngo, et al., 2018).

Πρέπει να αναφερθεί, ότι η τραχύτητα των επιφανειών αυξάνεται ιδιαίτερα στην περίπτωση των καμπυλωτών δομών, καθώς πέραν της δημιουργίας κενών στη ζώνη επαφής των διαδοχικών στρωμάτων, παρατηρείται και το φαινόμενο του σκαλοπατιού (Stair stepping). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής γεωμετρίας λόγω του τρόπου μετάφρασής της στο αρχείο STL. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το αρχείο STL περιγράφει, μέσω μιας σειράς συνδεδεμένων τριγώνων, τη γεωμετρία της επιφάνειας του τρισδιάστατου μοντέλου. Έτσι όμως «χάνεται» ένα μέρος της ανάλυσης, καθώς δεν χρησιμοποιούνται καμπύλες αλλά μόνο τρίγωνα για την περιγραφή της επιφάνειας. Το αποτέλεσμα του φαινομένου του σκαλοπατιού παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2 (Chohan and Singh, 2017; Diegel, et al., 2011).



Εικόνα 6.2: Φαινόμενο σκαλοπατιού (Diegel, et al., 2011).

Γενικά, έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα με στόχο τη βελτίωση του φινιρίσματος των επιφανειών. Αρκετοί ερευνητές κατάφεραν να μειώσουν την τραχύτητα είτε ελέγχοντας κάποιες παραμέτρους στο στάδιο της προ-επεξεργασίας είτε εφαρμόζοντας μηχανικές (π.χ. γυαλοχάρτισμα, σφαιροβολή) και χημικές μεθόδους (π.χ. εμβάπτιση σε ακετόνη, ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση), στο στάδιο της τελικής επεξεργασίας των προϊόντων. Από τις πιο σημαντικές παραμέτρους προ-επεξεργασίας είναι η γωνία προσανατολισμού, με τις βέλτιστες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 0° και 90° (Εικόνα 6.2), και το πάχος στρώματος. Αν και η μείωση του πάχους στρώματος μειώνει το φαινόμενο του σκαλοπατιού, θα πρέπει κατά τον καθορισμό της τιμής του, να ληφθεί υπόψη και η αύξηση του χρόνου εκτύπωσης και επομένως και του κόστους, που μια τέτοια μείωση θα επιφέρει (Chohan and Singh, 2017; Maleki, et al., 2021).

Δεδομένου λοιπόν, ότι οι τιμές των παραμέτρων που καθορίζονται στο στάδιο του σχεδιασμού σχετίζονται άμεσα με την ποιότητα των τελικών προϊόντων, καθώς επηρεάζουν όχι μόνο την επιφάνεια, αλλά και τη μηχανική τους συμπεριφορά, γίνονται προσπάθειες εξέλιξης των λογισμικών προσομοίωσης, με στόχο τον προσδιορισμό βασικών μεγεθών (π.χ. μηχανικές τάσεις) βάσει των επιλεχθέντων παραμέτρων. Αν και οι ερευνητές επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστικές προσεγγίσεις, θεωρούν ότι ο αριθμός των μεταβλητών που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την επίτευξη μιας πλήρως αντιπροσωπευτικής προσομοίωσης είναι πολύ μεγάλος (>130), με αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος και τη δυνατότητα εκτέλεσης των υπολογιστικών μοντέλων μόνο σε υψηλής απόδοσης υπολογιστικές εγκαταστάσεις. Προς το παρόν, πιο εξελιγμένα μοντέλα διεργασιών προσθετικής κατασκευής μπορούν να βρεθούν στα Εθνικά Εργαστήρια των ΗΠΑ, τα οποία και διαθέτουν τις ανάλογες υπολογιστικές ικανότητες (Pereira, et al., 2019).

Ένα πιο απλό εργαλείο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση των διεργασιών τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ο πειραματικός σχεδιασμός (Experimental Design, DOE). Στόχος του πειραματικού σχεδιασμού είναι η λήψη του μέγιστου δυνατού αριθμού πληροφοριών σχετικά με την επίδραση των διαφορετικών εξεταζόμενων παραγόντων (ελεγχόμενες ανεξάρτητες μεταβλητές) στην απόκριση του συστήματος, διενεργώντας τον ελάχιστο δυνατό αριθμό πειραμάτων (Lundstedt, et al., 1998). Ωστόσο, το εργαλείο αυτό σπάνια χρησιμοποιείται με ακρίβεια και πληρότητα. Συνήθως, ο τρισδιάστατος εκτυπωτής ρυθμίζεται εμπειρικά, καθώς ο αριθμός των παραγόντων που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι μεγάλος και η εύρεση των βέλτιστων τιμών τους προϋποθέτει πολλά και επαναλαμβανόμενα πειράματα. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος και τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος που εξετάζεται κάθε φορά, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος Taguchi (Wu, et al., 2018). Στη συγκεκριμένη μέθοδο καθορίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της διεργασίας (δείκτης ποιότητας), καθώς και τα επίπεδα, εντός των οποίων κυμαίνονται οι παράγοντες αυτοί. Οι παράγοντες και τα επίπεδα οργανώνονται στη συνέχεια σε ορθογώνιους πίνακες. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα ξεχωριστό πείραμα, οι συνθήκες του οποίου ορίζονται βάσει του επιπέδου που έχει επιλεχθεί να βρίσκεται ο κάθε παράγοντας. Ο αριθμός των πειραμάτων που απαιτείται για τη μελέτη P παραγόντων με L επίπεδα για κάθε παράγοντα ισούται με L^P . Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων όμως παρατηρούνται μόνο P κύριες επιδράσεις στον δείκτη ποιότητας, οι οποίες προέρχονται από τον κάθε παράγοντα μεμονωμένα και L^{P-1} επιδράσεις που προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο παραγόντων. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τριών ή και περισσότερων παραγόντων θεωρούνται αμελητέες. Συνεπώς, αρκεί η εκτέλεση ενός μόνο μέρους των L^P πειραμάτων, ώστε να ληφθεί η ίδια πληροφορία σχετικά με τις κύριες επιδράσεις και τις αλληλεπιδράσεις δύο παραγόντων, οι οποίες αποτελούν και το κύριο ενδιαφέρον της μελέτης (Roy, 2010; Freddi and Salmon, 2018; Ballantyne, et al., 2008). Η επιλογή του υποσυνόλου των πειραμάτων που θα εκτελεστεί γίνεται χρησιμοποιώντας τους ορθογώνιους πίνακες που ανέπτυξε και τυποποίησε ο ίδιος ο Taguchi για περιπτώσεις διαφορετικών αριθμών παραγόντων και επιπέδων. Για παράδειγμα, η μελέτη 13 παραγόντων με 3 επίπεδα για καθέναν από αυτούς απαιτεί, σύμφωνα με τον ορθογώνιο πίνακα του Taguchi, την εκτέλεση μόνο 27 πειραμάτων αντί για $3^{13} = 1,594,323$ πειράματα (Unaí and Dean, 1990). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες με αντικείμενο την επίδραση διαφόρων παραγόντων της διεργασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε συγκεκριμένους δείκτες ποιότητας χρησιμοποιώντας της μέθοδο Taguchi. Οι Chen and Zhao, παραδείγματος χάριν, εξέτασαν την επίδραση του πάχους στρώματος, του κορεσμού του συνδετικού υλικού (= όγκος συνδετικού υλικού/όγκος πόρων πούδρας), του χρόνου ξήρανσης και του λόγου της ισχύος του ξηραντήρα του συνδετικού υλικού προς τη μέγιστη ισχύ του. Κάθε παράγοντας είχε 3 επίπεδα και ως δείκτης ποιότητας ορίστηκε η τραχύτητα της επιφάνειας. Χρησιμοποίησαν τον ορθογώνιο πίνακα L16 του Taguchi και έπειτα από 16 πειράματα κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι ο παράγοντας που επηρεάζει κυρίως την τραχύτητα της επιφάνειας είναι το πάχος στρώματος (Chen and Zhao, 2016).

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί, ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολη η εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων βάσει της συλλογής στοιχείων από πολλές μεμονωμένες περιπτώσεις, οι οποίες μάλιστα συχνά καταλήγουν και σε αντικρουόμενα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, έχει προταθεί μια μέθοδος που βασίζεται στη μηχανική μάθηση και περιλαμβάνει την εξαγωγή δεδομένων κατά την παρακολούθηση της εκτύπωσης και την ανάλυση της ποιότητας με διάφορες τεχνικές (π.χ. ακουστική εκπομπή για τον εντοπισμό μικρορωγμών σε μια επιφάνεια μέσω αισθητήρων, τεχνικές απεικόνισης επιφανειών με στερεοσκόπιο) (Li, et al., 2020). Μάλιστα, σε μια έρευνα χρησιμοποιήθηκε μηχανική όραση για την ανάλυση κάθε εκτυπωμένου στρώματος και την ανατροφοδότηση βάσει αυτής του κεντρικού υπολογιστή με στόχο τον έλεγχο και την μεταβολή των παραμέτρων της εκτύπωσης (π.χ. ρυθμός εκτόξευσης υλικού). Έτσι, η εξαγωγή των σχέσεων, με τη βοήθεια αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, μεταξύ των παραμέτρων και των δεικτών ποιότητας (π.χ. τραχύτητα, μηχανική αντοχή), συντελεί στη δημιουργία μιας μεγάλης βάσης δεδομένων που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές. Επιπλέον, στην περίπτωση που τα αποτελέσματα από την ανάλυση των πρώτων στρωμάτων είναι εκτός των ορίων αποδοχής, η εκτύπωση θα μπορεί να τερματίζεται, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους (Kim, et al., 2018; Wu, et al., 2018). Ωστόσο, το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές κατά τη χρήση μηχανικής μάθησης για την παρακολούθηση της ποιότητας είναι η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες και υψηλής ακρίβειας δεδομένων εκπαίδευσης (training data). Σε βιομηχανικό επίπεδο είναι δύσκολο να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα δεδομένων. Για παράδειγμα, το στοιχείο του θορύβου σε εικόνες που λαμβάνονται από συστήματα παρακολούθησης της δομής επιφανειών είναι αρκετό έντονο. Είναι επίσης πιθανό, η κάμερα να μην εστιάζει σωστά στην περιοχή ενδιαφέροντος και να δημιουργούνται θολές εικόνες. Κατά συνέπεια, δεν είναι η δυνατή η εξαγωγή ενός καλά γενικευμένου μοντέλου. Γενικά, τα ζητήματα που σχετίζονται με τα δεδομένα εκπαίδευσης φαίνεται να εμποδίζουν σε μεγάλο βαθμό την αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης στις βιομηχανίες (Li, et al., 2020).

Συμπερασματικά γίνεται σαφές, ότι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, κατά τον οποίον καθορίζονται οι συνθήκες εκτύπωσης, αν και απαραίτητη για την παραγωγή υψηλής ποιότητας προϊόντων, αποτελεί ακόμα μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη μελέτη της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η επιστημονική κοινότητα εξετάζει το θέμα αυτό με τη βοήθεια προσομοιώσεων, και συστηματικών αναλύσεων πειραματικών αποκρίσεων, κάποιες από τις οποίες περιλαμβάνουν τη χρήση μηχανικής μάθησης. Παρ' όλ' αυτά, σε κάθε μέθοδο υπάρχουν και οι αντίστοιχοι περιορισμοί, γεγονός που καθιστά ακόμα δυσκολότερο το πρόβλημα της βελτιστοποίησης.

6.2 Έλλειψη προτύπων

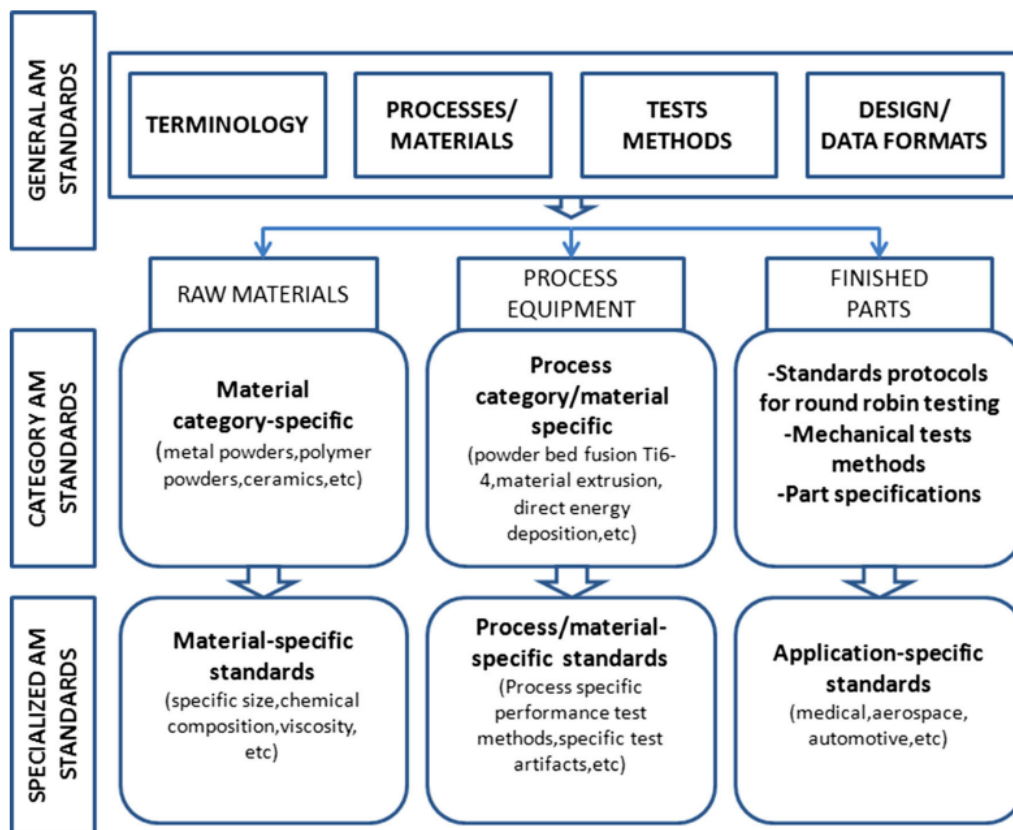
Ανεξαρτήτως της μεθόδου κατασκευής (αφαιρετική ή προσθετική), τα πρότυπα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς βοηθούν τους οργανισμούς να αναπτύξουν, να κατασκευάζουν και να παρέχουν τα προϊόντα τους με αποτελεσματικό, αποδοτικό και ασφαλές τρόπο. Αρχικά, πριν την ανάπτυξη AM προτύπων, οι κατασκευαστές εξοπλισμού και οι προμηθευτές υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης πραγματοποιούσαν δοκιμές σύμφωνα με τα πρότυπα των συμβατικών μεθόδων ή δοκιμές που είχαν αναπτύξει οι ίδιοι για να παράσχουν στους πελάτες τους όλες τις απαραίτητες πληροφορίες (π.χ. φύλλα δεδομένων υλικών). Το ίδιο έπρατταν και κατασκευαστές που χρησιμοποιούσαν την προσθετική κατασκευή για την παραγωγή προϊόντων (Monzón, et al., 2015; Chua, et al., 2017). Οι ιδιότητες όμως των παραγόμενων με τη συγκεκριμένη μέθοδο προϊόντων, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της προσθετικής φύσης της τεχνολογίας (μεταβολή μικροδομής - εμφάνιση ανισοτροπίας), των επιλεγθέντων υλικών και των συνθηκών εκτύπωσης, διαφέρουν από αυτές που επιτυγχάνονται με τις συμβατικές μεθόδους. Προκειμένου, επομένως, να μπορεί να παρακολουθείται, να αξιολογείται και να ελέγχεται κάθε στάδιο της προσθετικής κατασκευής,

καθώς και να διασφαλίζεται η επαναληψιμότητα και η σταθερή ποιότητα των προϊόντων, απαιτούνταν η ανάπτυξη νέων προτύπων για τα υλικά τροφοδοσίας, τον σχεδιασμό, τις διεργασίες εκτύπωσης και τις μεθόδους δοκιμής (Sacco and Moon, 2019). Ο κλάδος της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής ήταν από τους πρώτους κλάδους που ανέδειξαν τη σημασία της ανάπτυξης προτύπων για την προσθετική κατασκευή, καθώς η παραγωγή των υψηλής κρισιμότητας για την ασφάλεια εξαρτημάτων προϋποθέτει τη συνεχή παρακολούθηση και τον έλεγχο όλων των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με αυτή, ενέργειες οι οποίες διευκολύνονται από τη συνεπή τήρηση των προτύπων ποιότητας (Khorasani, et al., 2021). Το 2009 συστάθηκε η Επιτροπή ASTM F42 για την ανάπτυξη προτύπων σχετικά με τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν και άλλοι φορείς τυποποίησης, συμπεριλαμβανομένων των ISO (το έτος 2011) και SAE (Society of Automotive Engineers), η οποία ανέπτυξε πρότυπα για την εφαρμογή της προσθετικής κατασκευής στην παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων αεροσκαφών (Gibson, et al., 2021; Pereira, et al., 2019).

Η Επιτροπή ASTM F42 ανέπτυξε πρότυπα για τις εξής κατηγορίες: 1) Μέθοδοι δοκιμής, 2) Σχεδιασμός, 3) Υλικά και διαδικασίες, 4)Υγιεινή και ασφάλεια περιβάλλοντος. Η πρώτη κατηγορία περιλάμβανε την ανάπτυξη προτύπων για δοκιμές δειγμάτων, που έχουν κατασκευαστεί με τρισδιάστατη εκτύπωση, και παρείχε (δεδομένων των μοναδικών χαρακτηριστικών της προσθετικής κατασκευής) τις αντίστοιχες οδηγίες για τον τρόπο υιοθέτησης των συγκεκριμένων προτύπων. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκαν τα πρότυπα που καθόριζαν τις προδιαγραφές για τη μορφή των αρχείων ανταλλαγής δεδομένων (αρχεία που περιγράφουν τα προς εκτύπωση προϊόντα, συνήθως είναι αρχεία STL αλλά χρησιμοποιούνται και άλλα φορμάτ, π.χ. AMF) και οι οδηγίες σχεδιασμού. Επίσης, είχαν αναπτυχθεί πρότυπα για την ασφάλεια του χειριστή, την ποιότητα του αέρα στον χώρο εκτύπωσης και άλλα σχετικά θέματα, ενώ, τέλος, υπήρχαν και πρότυπα για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς και εξειδικευμένες οδηγίες για συγκεκριμένες διεργασίες, όπως η επεξεργασία μετά την εκτύπωση (Gibson, et al., 2021).

Εξίσου σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη προτύπων σχετικά με την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής κατέβαλε και ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης. Ωστόσο, οι αρχικά διαχωρισμένες προσπάθειες των δύο οργανισμών (ASTM και ISO) οδήγησε στη δημιουργία ξεχωριστών μεν προτύπων, που όμως διέφεραν ελάχιστα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να καταβάλλεται διπλή προσπάθεια και ταυτόχρονα να προκαλείται σύγχυση στους χρήστες τους. Έτσι, το 2013 ξεκίνησε η συνεργασία των δύο επιτροπών ASTM F42 και ISO TC261, με στόχο την ανάπτυξη κοινών προτύπων, που θα εφαρμόζονται στις περισσότερες χώρες και εταιρίες, διευκολύνοντας την ανταλλαγή πρώτων υλών και τελικών προϊόντων. Τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν είναι δομημένα σε τρία επίπεδα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.1 (Monzón, et al., 2015).

Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει πρότυπα που καλύπτουν πιο γενικά θέματα (π.χ. ορολογία, γενικές αρχές, κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό, επισκόπηση διεργασιών και υλικών, μέθοδοι δοκιμής, μορφές αρχείων ανταλλαγής δεδομένων). Το δεύτερο επίπεδο διακρίνεται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες, οι οποίες είναι τα υλικά, οι διεργασίες μαζί με τον εξοπλισμό και τα τελικά προϊόντα. Έχουν εκδοθεί δηλαδή ξεχωριστά πρότυπα για κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες. Στην κατηγορία των υλικών υπάρχει, παραδείγματος χάριν, το πρότυπο ISO/ASTM 52907, το οποίο παρέχει τεχνικές προδιαγραφές για μεταλλικές σκόνες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην τρισδιάστατη εκτύπωση και αναφέρεται σε θέματα όπως η τεκμηρίωση και ιχνηλασιμότητα, η δειγματοληψία, η περιγραφή βασικών ιδιοτήτων, η συσκευασία και η αποθήκευση. Εκτενέστερη ανάλυση των υλικών, των διεργασιών και των εφαρμογών παρέχεται από τα πρότυπα του τελευταίου επιπέδου. Προς το παρόν, το πρότυπα που αναφέρονται στις εφαρμογές, αφορούν κυρίως τους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής και της ιατρικής. Επίσης, τα περισσότερα πρότυπα, που έχουν εκδοθεί για τα υλικά, επικεντρώνονται στα μέταλλα, γεγονός που δικαιολογείται από την κυριαρχία των συγκεκριμένων υλικών σε μια από τις κύριες εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής, στην παραγωγή δηλαδή εξαρτημάτων αυτοκινήτων και αεροσκαφών (Moroni, et al., 2020).



Σχήμα 6.1: Δομή ανάπτυξης προτύπων (Monzón, et al., 2015).

Αν και έχουν δημοσιευτεί αρκετά πρότυπα, υπάρχει και ένας μεγάλος αριθμός προτύπων, που βρίσκονται υπό ανάπτυξη, ενώ παράλληλα πραγματοποιούνται προκαταρκτικές εργασίες με στόχο την ανάπτυξη νέων. Γίνεται, επομένως σαφές, ότι εξακολουθούν να υπάρχουν κενά, τα οποία δεν έχουν καλυφθεί ακόμα. Κάποια παραδείγματα προτύπων υπό ανάπτυξη είναι οι οδηγίες σχετικά με τις μηχανές τεχνολογίας εξώθησης υλικού που τροφοδοτούνται με πλαστικά, το πρότυπα για μεθόδους επεξεργασίας μετά την εκτύπωση μετάλλων με την τεχνολογία PBF και πρότυπα σχετικά με την υγιεινή και ασφάλεια (π.χ. πρότυπη μέθοδος δοκιμής για τον προσδιορισμό του ρυθμού εκπομπής από εκτυπωτές τεχνολογίας εξώθησης υλικού) (Kawalkar, et al., 2022). Οι προκαταρκτικές μελέτες αφορούν κυρίως θέματα σχεδιασμού (παροχή τεχνικών οδηγιών για κάθε τεχνολογία ξεχωριστά), υγιεινής και ασφάλειας (π.χ. οδηγίες αξιολόγησης κινδύνων), καθώς και αξιολόγησης προσωπικού (π.χ. αξιολόγηση χειριστών μηχανής τεχνολογίας DED για την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων, αξιολόγηση σχεδιαστών). Επίσης κάποιες μελέτες στοχεύουν στην ανάπτυξη προτύπων για χρήση συγκεκριμένης τεχνολογίας σε συγκεκριμένες εφαρμογές (π.χ. προδιαγραφές για χαρακτηριστικά της κατευθυνόμενης εναπόθεσης ενέργειας με laser σε εφαρμογές αεροδιαστημικής). Το έτος 2021, το μεγαλύτερο ποσοστό των δημοσιευμένων προτύπων (40%) αφορούσε υλικά και τεχνολογίες εκτύπωσης, το 30% των προτύπων που βρίσκονταν υπό ανάπτυξη σχετιζόταν με τις μεθόδους δοκιμής, ενώ λίγα μόλις πρότυπα (8%) είχαν εκδοθεί για τον σχεδιασμό. (Vafadar, et al., 2021). Η κατανομή αυτή είναι αναμενόμενη, αφού για την επίτευξη ενός σωστού σχεδιασμού χρειάζονται πρώτα να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά των υλικών (π.χ. ρευστότητα τήγματος) και της εκτύπωσης (π.χ. ταχύτητα κίνησης κεφαλής) και στη συνέχεια βάσει των ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων, οι οποίες και εξαρτώνται από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, να αναπτυχθούν οι τεχνικές δοκιμών. Βέβαια, υπάρχουν ακόμα αρκετά υλικά (π.χ. κεραμικά), τεχνολογίες (π.χ. συγκόλληση φύλλων) και εφαρμογές

(π.χ. υποδομές), στα οποία δεν έχει δοθεί έμφαση, γεγονός που δρα ανασταλτικά στην υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης από περισσότερους κλάδους.

Συμπερασματικά, τα διαθέσιμα πρότυπα καλύπτουν ένα πολύ μικρό μόνο μέρος των θεμάτων της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής και απαιτούνται συντονισμένες προσπάθειες από οργανισμούς τυποποίησης, εταιρίες και εκπαιδευτικά ιδρύματα, προκειμένου να αναπτυχθεί ένα πιο ολοκληρωμένο σύνολο προτύπων.

6.3 Ασφάλεια δεδομένων και προστασία πνευματικών δικαιωμάτων

Τα δεδομένα σχεδιασμού που βρίσκονται σε αρχεία CAD και STL θεωρούνται δικαίως περιουσιακά στοιχεία υψηλής αξίας, καθώς δεν περιέχουν απλώς την τελική μορφή των προϊόντων, αλλά «ενσωματώνουν» και όλες τις προσπάθειες ανάπτυξής τους (επαναληπτικοί κύκλοι σχεδιασμού – δοκιμών - βελτιστοποιήσεων) και πρέπει, επομένως, να προστατεύονται. Λόγω ωστόσο της ψηφιακής τους φύσης, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος είτε κλοπής, παραγωγής απομιμήσεων και παραβίασης των πνευματικών δικαιωμάτων είτε τροποποίησης των υπάρχοντων δεδομένων από ανταγωνιστές με στόχο την παραγωγή ελαττωματικών προϊόντων (Kurjuweit, et al., 2021; Yampolskiy, et al., 2015). Ο κίνδυνος αυτός είναι μεγαλύτερος στις εξής τρεις περιπτώσεις:

- Κατανεμημένα δίκτυα παραγωγής λόγω συνεχούς ροής πληροφοριών μεταξύ των εγκαταστάσεων και του κέντρου σχεδιασμού (η παραγωγή και ο σχεδιασμός γίνονται από την ίδια εταιρία - κατασκευαστή)
- Κατανεμημένα δίκτυα παραγωγής που αποτελούνται από πολλούς παρόχους υπηρεσιών τρισδιάστατης εκτύπωσης και μια εταιρία – κατασκευαστή
- Εξωτερική ανάθεση σχεδιασμού

Η ανάπτυξη μηχανισμών που θα εξασφαλίζουν την πρόσβαση σε ακριβείς, πλήρεις και αναλλοίωτες κατά την ανταλλαγή τους πληροφορίες αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις της προσθετικής κατασκευής. Βέβαια, ως μέσο αντιμετώπισης της παραπάνω πρόκλησης έχει προταθεί στη βιβλιογραφία η αξιοποίηση της τεχνολογίας Blockchain (Kurjuweit, et al., 2021). Πιο συγκεκριμένα, μέσω της κρυπτογράφησης των αρχείων σχεδιασμού θα επιτρέπεται η πρόσβαση μόνο εξουσιοδοτημένων χρηστών σε αυτά, ενώ ταυτόχρονα θα προσδιορίζεται τόσο η διάρκεια όσο και ο τρόπος χρήσης τους (π.χ. αριθμός επιτρεπόμενων εκτυπώσεων). Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι υπάρχουν και αρκετά εμπόδια στην υιοθέτηση μιας τέτοιας προσέγγισης, η οποία σίγουρα δεν ευνοείται στην περίπτωση των μικρομεσαίων επιχειρήσεων (Ghimire, et al., 2022). Το θέμα της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας Blockchain στην προσθετική κατασκευή θα αναλυθεί εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο, καθώς αυτό αφορά στην Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση, η οποία και υποστηρίζεται από τέτοιες επαναστατικές τεχνολογίες.

Το ζήτημα της προστασίας των πνευματικών δικαιωμάτων πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη στην περίπτωση ανάθεσης του σχεδιασμού σε εξωτερικούς συνεργάτες. Ιδιοκτήτης των πνευματικών δικαιωμάτων θεωρείται ο δημιουργός ενός έργου. Ως έργο χαρακτηρίζεται κάθε ανθρώπινο, πρωτότυπο, πνευματικό δημιούργημα, του οποίου η μορφή είναι αντιληπτή με τις αισθήσεις. Το ερώτημα που προκύπτει είναι αν το αρχείο CAD αποτελεί έργο και άρα εντάσσεται στο πεδίο προστασίας πνευματικής ιδιοκτησίας. Η νομοθεσία των ΗΠΑ, της Γερμανίας αλλά και της Ελλάδας (Ν. 4961/2022) αναγνωρίζουν το αρχείο σχεδιασμού ως πνευματικό έργο και επομένως ο πάροχος υπηρεσιών σχεδιασμού, που έχει αναλάβει την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου, κατέχει και τα πνευματικά δικαιώματα (Holland, et al., 2017; Brown, et al., 2016). Ωστόσο, η αντιγραφή (εκτύπωση) και η διανομή του έργου απαιτεί την άδεια του δημιουργού. Ενδεχομένως, να μην επιτρέπονται στον κατασκευαστή του προϊόντος αλλαγές του μοντέλου του αρχείου CAD. Θα πρέπει, επομένως, οι νομικές και

ρυθμιστικές απαιτήσεις να ορίζονται με σαφήνεια κατά τη σύναψη συμβάσεων μεταξύ κατασκευαστών και παρόχων υπηρεσιών σχεδιασμού.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, ότι στην περίπτωση ανάθεσης της κατασκευής σε εταιρίες παροχής υπηρεσιών τρισδιάστατης εκτύπωσης, την ευθύνη του προϊόντος φέρει ο κατασκευαστής. Οδηγίες και απαιτήσεις σχετικά με τις παραμέτρους και τη διαδικασία της εκτύπωσης πρέπει να αναφέρονται σαφώς στη σύμβαση μεταξύ των δύο μερών. Ακόμα, όμως, και αν οι πάροχοι υπηρεσιών δεν ακολουθήσουν τις οδηγίες του κατασκευαστή, υπεύθυνος για οποιοδήποτε πρόβλημα ποιότητας προκύψει είναι ο κατασκευαστής (Holland, et al., 2017).

6.4 Κόστος και χρόνος

Το κόστος και ο χρόνος εκτύπωσης αποτελούν επίσης σημαντικούς περιορισμούς για την ευρύτερη εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία. Σύμφωνα με την ανάλυση της Ενότητας 5.2.2, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής είναι μικρότερο για τις συμβατικές μεθόδους, με μοναδική εξαίρεση την περίπτωση του μικρού όγκου παραγωγής. Μικροί όγκοι συνήθως παρατηρούνται σε αγορές που χαρακτηρίζονται από τη ζήτηση εξατομικευμένων προϊόντων (π.χ. εμφυτεύματα), καθώς και σε αγορές βιομηχανικών εξαρτημάτων και ανταλλακτικών παλιών προϊόντων, που όμως χρησιμοποιούνται ακόμα. Η χρήση, ωστόσο, της προσθετικής κατασκευής για μαζική παραγωγή δεν είναι ακόμα οικονομικά βιώσιμη. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο υψηλό κόστος του εξοπλισμού και της παραγωγής υλικών τροφοδοσίας με τις επιθυμητές ιδιότητες. Ο μεγάλος χρόνος εκτύπωσης, πέραν της συνεισφοράς του στην αύξηση του κόστους παραγωγής, εμποδίζει περαιτέρω την υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, λόγω της επακόλουθης αύξησης του χρόνου παράδοσης και της πιθανότητας μείωσης της ικανότητας ανταπόκρισης στη ζήτηση. Όλα τα παραπάνω ισχύουν ακόμα και στην περίπτωση που ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του κόστους και του χρόνου ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η εξάλειψη δηλαδή της ανάγκης κατασκευής εργαλείων και καλουπιών, η θετική επίδραση της οποίας αντισταθμίζεται από άλλους παράγοντες αύξησης των δύο αυτών στοιχείων, κατά τη – δεδομένη συνήθως στην μαζική παραγωγή - υπέρβαση του κρίσιμου όγκου παραγωγής (Σχήμα 5.3). Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί, ότι στα υπάρχοντα μοντέλα δεν συνυπολογίζονται οι αντίστοιχες εξοικονομήσεις κόστους και χρόνου, που επιτυγχάνονται λόγω της δυνατότητας καταναμημένης και κατά παραγγελία παραγωγής, η οποία επιτρέπει τη μείωση των αποθεμάτων και των μεταφορών.

6.5 Όγκος χώρου κατασκευής

Ένα ακόμη μειονέκτημα της προσθετικής κατασκευής είναι ο πεπερασμένος όγκος του θαλάμου κατασκευής, ο οποίος θέτει και τα όρια για τις μέγιστες δυνατές διαστάσεις των παραγόμενων προϊόντων. Στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι τυπικοί όγκοι θαλάμων για 3D εκτυπωτές διαφορετικής τεχνολογίας (Tofail, et al., 2018). Όπως φαίνεται δεν είναι όλα τα συστήματα κατάλληλα για παραγωγή εξαρτημάτων μεγάλων διαστάσεων. Ο μέγιστος όγκος για παράδειγμα του συστήματος τεχνολογίας PBF, μιας από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες, είναι περίπου ίσος με 0.03 m³. Παρόλο που η διαίρεση ενός προϊόντος σε επιμέρους τμήματα, με στόχο τη σταδιακή κατασκευή και στη συνέχεια συγκόλλησή τους, αποτελεί έναν τρόπο επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος, πιθανώς να οδηγήσει στην παραγωγή προϊόντων μικρότερης αντοχής (αν για τη συγκόλληση χρησιμοποιηθούν κόλλες) ή και αυξημένου όγκου (αν χρησιμοποιηθούν μηχανικά στοιχεία στερέωσης). Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία DED που επιτρέπει την εκτύπωση μεγαλύτερων διαστάσεων, δεν ενδείκνυται για όλες τις εφαρμογές, λόγω κάποιων σημαντικών μειονεκτημάτων που τη διακρίνουν, όπως η χαμηλή ακρίβεια και η αυξημένη τραχύτητα των επιφανειών (Abdulhameed, et al., 2019). Βέβαια,

πρέπει να αναφερθεί, ότι ο όγκος του χώρου κατασκευής δεν εμποδίζει – όπως θα περίμενε κανείς – την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή έργων υποδομής, καθώς όπως επισημαίνεται και στην Ενότητα 3.4, έχουν αναπτυχθεί ειδικά κινητά συστήματα, τα οποία φέρουν ρομποτικό βραχίονα, που επιτρέπει και ελέγχει την κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης. Για ενδιάμεσους, ωστόσο, όγκους (μεγαλύτερους δηλαδή από τον μέγιστο όγκο θαλάμου των υπάρχοντων μηχανών, αλλά αρκετά μικρότερους από τους όγκους των έργων υποδομής) δεν έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα 3D συστήματα.

Πίνακας 6.1: Διαστάσεις θαλάμου κατασκευής για 3D συστήματα διαφορετικών τεχνολογιών (Tofail, et al., 2018).

Τεχνολογία κατασκευής	προσθετικής	Διαστάσεις θαλάμου κατασκευής		
		x (mm)	y (mm)	z (mm)
Εκτόξευση μέσου	συνδετικού	< 4000	< 2000	< 1000
Εκτόξευση υλικού		< 300	< 200	< 200
Σύντηξη πούδρας σε κλίνη		200 - 300	200 - 300	200 - 350
Εξώθηση υλικού		< 900	< 600	< 900
Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας		600 - 3000	500 - 3500	350 - 5000
Συγκόλληση φύλλων		100 - 250	200	100 - 150
Φωτοπολυμερισμός		< 2100	< 700	< 800

6.6 Διαθέσιμα υλικά

Παρόλο που η ανάπτυξη νέων και κατάλληλων για χρήση σε συστήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης υλικών αποτελεί αντικείμενο πολλών ερευνών, ο αριθμός των διαθέσιμων προς το παρόν υλικών παραμένει αρκετά μικρός, συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Τα περισσότερα συστήματα προσθετικής κατασκευής έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι αδύνατο να επεξεργαστούν όχι απλά διαφορετικές κατηγορίες υλικών (πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά) αλλά και υλικά, που ενώ η κατηγορία στην οποία ανήκουν είναι συμβατή με το σύστημα, έχουν ελαφρώς διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. μέγεθος κόκκων πούδρας) από τις τιμές αναφοράς. Έτσι όμως, σε περίπτωση που πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ίδιο 3D σύστημα, δεν θα είναι εφικτή η προσαρμογή των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υλικών και κατ' επέκταση των ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών. Θα πρέπει είτε να τροποποιηθεί το «hardware» του συστήματος, είτε να αναπτυχθεί ένα συμβατό με το σύστημα υλικό. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί, ότι τα εμπορικά διαθέσιμα υλικά τρισδιάστατων εκτυπωτών παρέχονται από τους ίδιους τους κατασκευαστές τους και το κόστος τους είναι υψηλό. Ωστόσο γίνονται πολυάριθμες ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη υλικών εντός των εγκαταστάσεων των κατασκευαστών (in-house), τα οποία θα είναι οικονομικότερα και κατάλληλα για κάθε εφαρμογή (Singh, et al., 2017).

6.7 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρά τα οφέλη που προσφέρει η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, υπάρχουν ακόμα κάποια εμπόδια, που περιορίζουν τη διεξόδυσή της σε περισσότερους κλάδους και επομένως απαιτείται περισσότερη έρευνα για την αντιμετώπισή τους. Στα εμπόδια αυτά περιλαμβάνονται η χαμηλή ποιότητα επιφανειών, η έλλειψη προτύπων και μηχανισμών προστασίας των ψηφιακών δεδομένων σχεδιασμού, η χαμηλή ταχύτητα και το υψηλό κόστος εκτύπωσης, η περιορισμένη χωρητικότητα των θαλάμων εκτύπωσης και η έλλειψη ποικιλίας

διαθέσιμων υλικών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των επιφανειών και τις ιδιότητες των προϊόντων, καθώς και οι τεχνικές επεξεργασίας που λαμβάνουν χώρα μετά την εκτύπωση αποτελούν από τα πιο συχνά αντικείμενα μελέτης στη βιβλιογραφία. Ωστόσο, προκειμένου να μειωθεί το χάσμα μεταξύ επιθυμητών και πραγματικών ιδιοτήτων και να ελαχιστοποιηθεί η ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία, χρειάζεται να κατανοηθεί πλήρως ο μηχανισμός επίδρασης των χαρακτηριστικών της εκάστοτε τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, των παραμέτρων της εκτύπωσης και των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών στις τελικές ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, απαιτείται η διεξαγωγή περισσότερων συστηματικών πειραματικών μελετών, η ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων για την πρόβλεψη του πορώδους και της παραμένουσας τάσης (στοιχεία που υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες) και αναλύσεις ευαισθησίας. Η αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης και η εφαρμογή μη καταστροφικών ελέγχων για εσωτερική και εξωτερική αξιολόγηση της ποιότητας των προϊόντων κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης και η ανατροφοδότηση βάσει αυτής του συστήματος αποτελεί ακόμη ένα ερευνητικό πεδίο. Βέβαια, ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στην ανάπτυξη συστημάτων λήψης δεδομένων υψηλής ποιότητας, τα οποία και συνιστούν προϋπόθεση για την επιτυχή ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στην προσθετική κατασκευή.

Συνεχείς προσπάθειες γίνονται επίσης για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων και ευρέως αποδεκτών προτύπων, που θα συμβάλουν στη διασφάλιση της σταθερής ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Παρόλο που η διαρκής εμφάνιση νέων τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής και η περιορισμένη κατανόηση του τρόπου επίδρασης των παραγόντων της εκτύπωσης στις ιδιότητες των τελικών προϊόντων δεν διευκόλυναν την έκδοση προτύπων, πλέον έχουν δημοσιευθεί 28 πρότυπα, τα περισσότερα εκ των οποίων αφορούν τα υλικά και τις διεργασίες. Ωστόσο, εντοπίζονται ακόμα αρκετά κενά. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ανάπτυξη προτύπων για το στάδιο του σχεδιασμού, ενώ μια ακόμη πρόταση θα μπορούσε να είναι η έκδοση προτύπων σχετικά με τη διαστασιολόγηση και τα όρια ανοχής των διαστάσεων. Προκειμένου να είναι δυνατή η πλήρης αξιοποίηση του κύριου πλεονεκτήματος της προσθετικής κατασκευής (της δυνατότητας, δηλαδή, παραγωγής προϊόντων πολύπλοκων γεωμετριών) και να επιτυγχάνεται η επιθυμητή λειτουργικότητα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται, ότι όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ. γωνίες, κυρτότητα) βρίσκονται εντός των ορίων ανοχής. Η τήρηση των διαστάσεων εντός συγκεκριμένων ορίων είναι καθοριστικής σημασίας σε εφαρμογές της αεροναυπηγικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της ιατρικής, κατά τις οποίες τα παραγόμενα με τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτήματα ενσωματώνονται σε πιο σύνθετα συστήματα και επομένως απαιτείται η άψογη επαφή τους με αυτά.

Πρόσφατα έχει αρχίσει να ερευνάται το θέμα της ασφάλειας δεδομένων, της διαχείρισης αδειών και της προστασίας των πνευματικών δικαιωμάτων. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη ICT συστημάτων, ικανών να διαχειρίζονται τον όγκο των πληροφοριών που προκύπτει κατά το στάδιο του σχεδιασμού και να προστατεύουν σημαντικά δεδομένα από περιπτώσεις βιομηχανικής κατασκοπίας. Αν και έχει προταθεί η τεχνολογία Blockchain ως τρόπος ενίσχυσης της ασφάλειας δεδομένων, υπάρχουν παράγοντες (έλλειψη προτύπων, πολύπλοκες κανονιστικές απαιτήσεις) που εμποδίζουν την υιοθέτησή της. Καθώς οι περισσότερες μελέτες που έχουν ασχοληθεί με το συγκεκριμένο θέμα είναι θεωρητικές, προτείνεται η εκπόνηση μελετών με στόχο τη συλλογή και παροχή εμπειρικών δεδομένων, τα οποία θα υποστηρίζουν και θα τεκμηριώνουν τη συμβολή της τεχνολογίας Blockchain στην ασφάλεια των δεδομένων.

Όσον αφορά στα υλικά, υπάρχουν αρκετές έρευνες στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Ωστόσο, η ποικιλία των διαθέσιμων υλικών παραμένει περιορισμένη συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Επιπλέον, μελέτες απαιτούνται όχι μόνο για την ανάπτυξη νέων υλικών, αλλά και για την τροποποίηση και βελτίωση των υπάρχοντων τεχνολογιών και του εξοπλισμού προσθετικής κατασκευής, ώστε να μπορούν να επεξεργάζονται υλικά ίδιας κατηγορίας αλλά ελαφρώς διαφορετικών χαρακτηριστικών. Ήδη ερευνάται η παραγωγή υλικών, κατάλληλων για την τροφοδοσία των συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης, εντός των εγκαταστάσεων των

κατασκευαστών. Η σύγκριση του κόστους των εσωτερικά παραγόμενων και εξωτερικά προμηθευόμενων υλικών αποτελεί μια πρόταση για περαιτέρω έρευνα. Επίσης, ιδιαίτερα χρήσιμη για την εξαγωγή σχέσεων μεταξύ υλικών, διεργασιών και προϊόντων και την επιλογή του βέλτιστου κατά περίπτωση συνδυασμού τους θα είναι η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, στην οποία μέσω ανοιχτής πρόσβασης και κοινής χρήσης δεδομένων θα καταγράφονται στοιχεία, που αφορούν τα υλικά και τις μηχανές προσθετικής κατασκευής (και δίνονται από τους ίδιους τους προμηθευτές τους), καθώς και πληροφορίες σχετικά με μια συγκεκριμένη κατασκευή (στοιχεία σχεδιασμού, προ-επεξεργασίας, εκτύπωσης, μετεπεξεργασίας, δοκιμών). Ο συνεχής εμπλουτισμός της βάσης αυτής θα οδηγεί στην εξαγωγή νέων συσχετίσεων.

Τέλος, η εύρεση τρόπων αύξησης της ταχύτητας εκτύπωσης χωρίς τη συνεπακόλουθη μείωση της ποιότητας των επιφανειών καθώς και η ανάπτυξη συστημάτων προσθετικής κατασκευής με μεγαλύτερους όγκους θαλάμου αποτελούν μερικά ακόμα ερευνητικά πεδία στα οποία πρέπει να δοθεί περισσότερη έμφαση. Για τη διευκόλυνση της διείσδυσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε περισσότερους κλάδους και εφαρμογές προτείνεται, επίσης, η εξέταση ενός υβριδικού μοντέλου, το οποίο θα συνδυάζει την προσθετική κατασκευή με άλλες συμβατικές μεθόδους (π.χ. κατασκευή κύριου κορμού με αφαιρετική μέθοδο και προσθήκη λεπτών περίπλοκων δομών, όπως είναι οι λεπίδες στροβίλου, με τρισδιάστατη εκτύπωση). Έτσι, θα αξιοποιούνται οι δυνατότητες και θα μετριάζονται τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η κάθε μέθοδος μεμονωμένα. Βέβαια, η υιοθέτηση ενός τέτοιου μοντέλου συνεπάγεται σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού, λόγω αύξησης των παραμέτρων που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το στάδιο αυτό. Επομένως, μια πρόταση για περαιτέρω έρευνα, που μπορεί να συμβάλει στην επιτυχή εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου στη βιομηχανία, είναι η ανάπτυξη συστημάτων σχεδιασμού διεργασιών με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer-Aided Process Planning) ειδικά σχεδιασμένων για υβριδικά μοντέλα αφαιρετικής – προσθετικής κατασκευής.

7. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΕΤΑΡΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ

Η έννοια της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά σε ένα άρθρο που δημοσιεύτηκε από τη Γερμανική κυβέρνηση, τον Νοέμβριο του 2011, η οποία σε μια προσπάθεια ενίσχυσης της ανταγωνιστικής της θέσης μέσω της τεχνολογικής καινοτομίας ανέπτυξε την μακροπρόθεσμη στρατηγική «High Tech Strategy 2020». Το 2012, δόθηκε στην Έκθεση του Ανόβερο από την τότε ομάδα εργασίας ο πρώτος ορισμός του «Industry 4.0» και παρουσιάστηκε ένα σύνολο προτάσεων εφαρμογής του (Bartodziej, 2017; Pereira and Romero, 2017). Στη βιβλιογραφία έχουν βρεθεί περισσότεροι από 100 ορισμοί του «Industry 4.0», ωστόσο δεν υπάρχει κάποιος τυπικός ορισμός του (de Paula Ferreira, et al., 2020). Ουσιαστικά πρόκειται για ένα βελτιωμένο σύστημα βιομηχανικής παραγωγής, που χαρακτηρίζεται από νέα επίπεδα οργάνωσης και ελέγχου των αλυσίδων αξίας και επιτρέπει την αύξηση της παραγωγικότητας και της ευελιξίας χάρη στην αξιοποίηση ενός μεγάλου δικτύου προηγμένων τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες αυτές κατηγοριοποιούνται και συνιστούν τους εξής εννιά πυλώνες της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Tay, et al., 2018):

- Προσομοίωση (Simulation)
- Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things)
- Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων (Big Data Analytics)
- Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing)
- Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing)
- Κυβερνοασφάλεια (Cyber Security)
- Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality)
- Αυτόνομα Ρομπότ (Autonomous Robots)
- Οριζόντια και Κάθετη Ολοκλήρωση (Horizontal and Vertical Integration)

Όπως φαίνεται, ο μοναδικός πυλώνας που αφορά την παραγωγή είναι η προσθετική κατασκευή. Η τεχνολογία αυτή πληροί αρκετές από τις απαιτήσεις της Βιομηχανίας 4.0, όπως η εξατομίκευση, η αποκεντρωμένη παραγωγή, η μείωση των αποβλήτων, η ευελιξία και οι απλοποιημένες εφοδιαστικές αλυσίδες (Haleem and Javaid, 2019). Δεδομένου ότι οι τεχνολογίες που επέτρεψαν τη μετάβαση στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά βασίζονται στα συμπληρωματικά μεταξύ τους χαρακτηριστικά, θα εξεταστούν στις επόμενες ενότητες οι αλληλεπιδράσεις της προσθετικής κατασκευής με κάθε έναν από τους οχτώ τεχνολογικούς πυλώνες, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα «ψηφιακό νήμα», που θα απεικονίζει τη ροή πληροφοριών εντός ενός συστήματος παραγωγής με τρισδιάστατη εκτύπωση, το οποίο ακολουθεί το πρότυπο του «Industry 4.0»

7.1 Προσομοίωση και προσθετική κατασκευή

Προσομοίωση είναι η αναπαράσταση ενός συστήματος, μιας διεργασίας ή ενός προϊόντος χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα, με στόχο την καλύτερη κατανόηση ή πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων και συμβάλλει στη μείωση του κόστους, τη μείωση της διάρκειας των κύκλων ανάπτυξης και την αύξηση της

ποιότητας των προϊόντων, αφού επιτρέπει στον χρήστη να διερευνά τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα διαφορετικών εκδοχών σχεδιασμού πολύπλοκων συστημάτων και να επιλέγει τη βέλτιστη αυτών, χωρίς να είναι απαραίτητη η λειτουργία του στον πραγματικό κόσμο (Rodič, 2017). Προσφέρει, επίσης, τη δυνατότητα αξιολόγησης του προτύπου του «Industry 4.0», εξετάζοντας με τη βοήθεια των μοντέλων διαφορετικά σενάρια εφαρμογής του. Δεδομένης μάλιστα της έλλειψης εμπειρικών δεδομένων (καθώς πρόκειται για μια νέα μετάβαση), η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική (de Paula Ferreira, et al., 2020). Όσον αφορά στην προσθετική κατασκευή, έχει ήδη αναφερθεί, ότι το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολο, καθώς οι τελικές ιδιότητες των προϊόντων εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων, η επίδραση των οποίων δεν μπορεί να μελετηθεί μόνο πειραματικά. Αντίθετα, η εισροή ψηφιακών δεδομένων σε λογισμικά προσομοίωσης μπορεί να παρέχει δισδιάστατες ή τρισδιάστατες απεικονίσεις του προϊόντος ή της συμπεριφοράς της διεργασίας υπό διαφορετικές συνθήκες, διευκολύνοντας τον σχεδιασμό βελτιστοποιημένων ροών διεργασιών και προϊόντων προσθετικής κατασκευής. Πλέον, υπάρχει μια πληθώρα εμπορικά διαθέσιμων λογισμικών προσομοίωσης, ειδικά σχεδιασμένων για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν ορισμένα λογισμικά προσομοίωσης διεργασιών (π.χ. AnyLogic, Simul8), τα οποία βοηθούν στην αντιμετώπιση συχνά εμφανιζομένων στην παραγωγή προκλήσεων, όπως ο βέλτιστος σχεδιασμός του προγράμματος παραγωγής, ο σχεδιασμός εγκαταστάσεων, η κατανομή των πόρων, η ροή των υλικών, ο προγραμματισμός των αποθεμάτων. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί ότι η προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων απαιτεί υψηλή υπολογιστική ικανότητα και συνεπώς την αγορά ακριβού εξοπλισμού και αδειών χρήσης λογισμικών, μια δυνατότητα που δεν διαθέτουν όλες οι βιομηχανίες (Butt, 2020).

7.2 IIoT και προσθετική κατασκευή

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) είναι ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων (συσκευές, οχήματα, κτίρια), με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά μέσα, κυκλώματα, λογισμικά, αισθητήρες και συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο, τα οποία επιτρέπουν τη συλλογή και την ανταλλαγή δεδομένων. Το Βιομηχανικό Διαδίκτυο Πραγμάτων (IIoT) αναφέρεται στην επέκταση και χρήση του IoT σε εφαρμογές της σύγχρονης βιομηχανίας και χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0, καθώς συμβάλλει στην αποτελεσματική παρακολούθηση και τον συνεχή έλεγχο των διαδικασιών και των συστημάτων παραγωγής. Επιπλέον, η επικοινωνία και η αλληλεπίδραση των συσκευών τόσο μεταξύ τους όσο και με τον κεντρικό ελεγκτή, καθιστούν εφικτή την «αποκέντρωση» της λήψης αποφάσεων και τη δυνατότητα άμεσης ανταπόκρισης σε αλλαγές που λαμβάνουν χώρα σε πραγματικό χρόνο, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία των χρησιμοποιούμενων συστημάτων (Munirathinam, 2020; Georgios, et al., 2019).

Ο συνδυασμός της τεχνολογίας του IIoT και της προσθετικής κατασκευής μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει τη χρήση του IIoT για τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες (π.χ. αισθητήρες ακουστικής εκπομπής για εντοπισμό μικρορωγμών) κατά την εκτύπωση και την τροποποίηση των παραμέτρων της σε πραγματικό χρόνο (λόγω της εξάλειψης του λανθάνοντος χρόνου επικοινωνίας), με στόχο την παραγωγή καλύτερης ποιότητας προϊόντων. Κάποιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν το IIoT για τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, συνέλεξαν έναν διαρκώς αυξανόμενο αριθμό ανεπεξέργαστων δεδομένων από το σύστημα παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών των υλικών και των δεδομένων σχεδιασμού και χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης μαζικών δεδομένων (Big Data Analytics) κατέληξαν σε συμπεράσματα σχετικά με την τρέχουσα κατανάλωση ενέργειας, λάμβαναν χρήσιμες πληροφορίες για την πρόβλεψή της, καθώς και προτάσεις σχεδιασμού που θα οδηγούσαν στη μείωσή της (Qin, et al., 2017). Μια άλλη δυνατότητα συνδυασμού των δύο τεχνολογιών είναι η αξιοποίηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή συσκευών IoT. Η εταιρία Nano Dimension έχει κατασκευάσει,

παραδείγματος χάριν, τον εκτυπωτή Nano Dimension DragonFly 2020 Pro, που επιτρέπει την απευθείας και ταυτόχρονη εκτύπωση αγώγιμων μεταλλικών νανοσωματιδίων και διηλεκτρικού πολυμερούς για τη δημιουργία πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων και αισθητήρων. Επίσης, η σχεδιαστική ελευθερία που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση καθιστά δυνατή την κατασκευή εύκαμπτων και ελαστικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, που θα μπορούν να διαμορφώνουν το σχήμα τους ανάλογα με την επιφάνεια, στην οποία εφαρμόζονται. Τέλος ο χρόνος εκτύπωσης δεν αποτελεί στην περίπτωση αυτή ανασταλτικό παράγοντα, καθώς το μέγεθος των δομικών μερών των συσκευών είναι μικρό (Kumar, 2018; Butt, 2020).

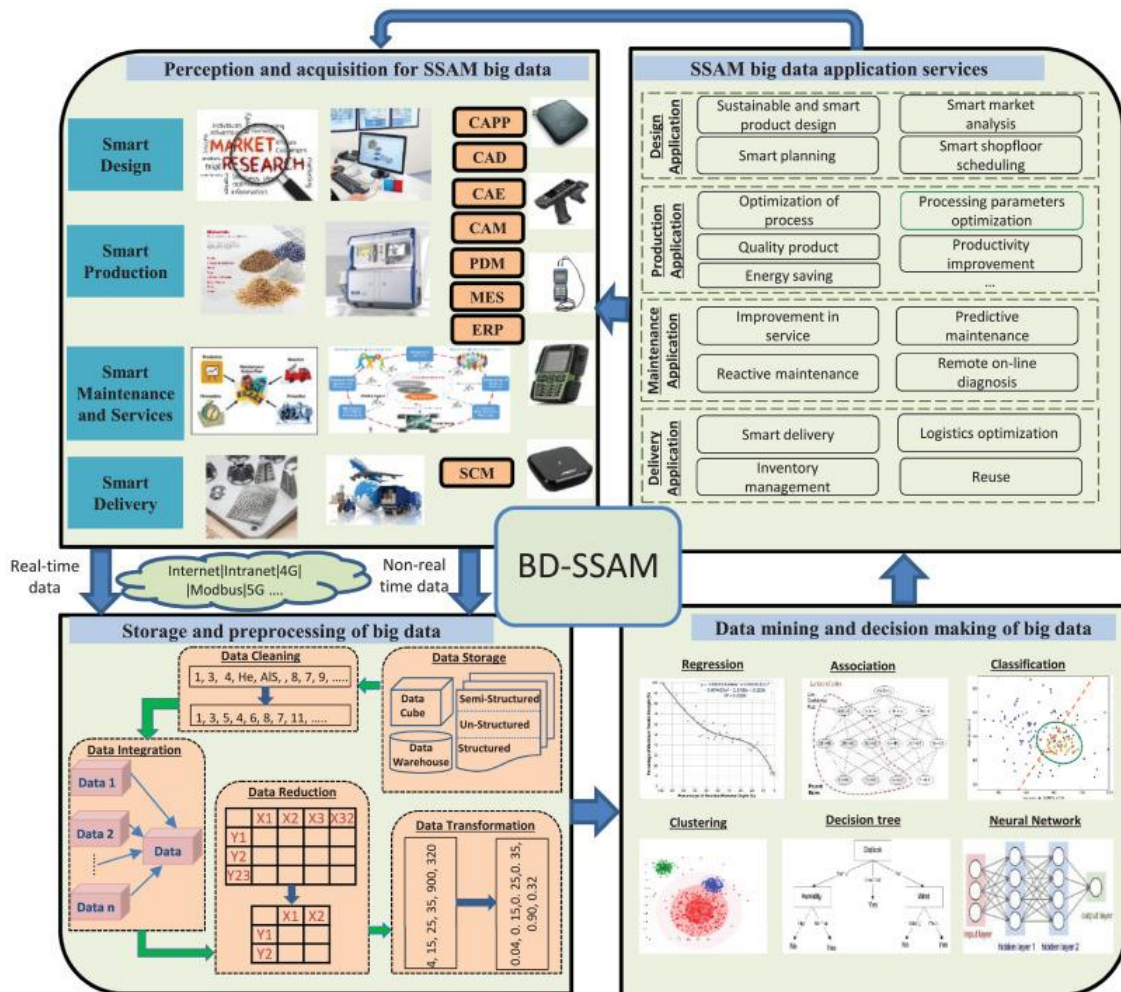
7.3 Ανάλυση μεγάλων δεδομένων και προσθετική κατασκευή

Ο όρος «μεγάλα δεδομένα» αναφέρεται στα δεδομένα, των οποίων η διαχείριση και η επεξεργασία δεν είναι εφικτή με συμβατικά εργαλεία, λόγω του μεγάλου όγκου, του γρήγορου ρυθμού ανανέωσης και των πολυάριθμων πηγών τους (Khan, et al., 2017). Τα βιομηχανικά μαζικά δεδομένα – μια έννοια που εμφανίστηκε μαζί με την έννοια της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης – περιλαμβάνουν τα δεδομένα που δημιουργούνται από μηχανές, διεπαφές ανθρώπου-μηχανής, αισθητήρες και άλλες εγκατεστημένες στις βιομηχανίες συσκευές Internet of Things. Η μετατροπή των ετερογενών αυτών δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία γίνεται μέσω της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (Sharma and Pandey, 2020). Πρόκειται για μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες του Industry 4.0, καθώς μέσω των σχέσεων, των μοτίβων και των τάσεων που αποκαλύπτει, συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της αγοραστικής συμπεριφοράς των καταναλωτών και άρα στην ανάπτυξη προϊόντων βάσει των αναγκών τους, στη βελτιστοποίηση της παραγωγής και τη μείωση του κόστους, χάρη στην πρόβλεψη πιθανών αστοχιών, την υπόδειξη των απαιτούμενων συντηρήσεων και την αποφυγή διακοπών λειτουργίας, στον προγραμματισμό της παραγωγής σύμφωνα με την προβλεπόμενη ζήτηση και στη λήψη ορθότερων αποφάσεων εν γένει (Javaid, et al., 2021).

Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων είναι πολύτιμη και για τις εταιρίες προσθετικής κατασκευής, καθώς ο μεγάλος όγκος δεδομένων που προκύπτει λόγω των πολύπλοκων και ποικίλων αλληλεπιδράσεων μεταξύ του σχεδιασμού, των υλικών, των παραγωγικών διαδικασιών και των χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων, πρέπει να συλλεχθεί και να αναλυθεί, για να εντοπιστούν τα σημεία που χρήζουν βελτίωσης και να προσδιοριστεί ο τρόπος επίτευξής της. Η ίδια τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη σύνδεση των δεδομένων διεργασιών και εξοπλισμού με τα δεδομένα μετρολογίας, ώστε να λαμβάνονται πιο ακριβείς προβλέψεις για τις αστοχίες. Επιπλέον, η επεξεργασία δεδομένων, που προέρχονται από κριτικές ή ερωτηματολόγια, επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των αναγκών των πελατών, η οποία και αποτελεί προϋπόθεση για την εκμετάλλευση των δύο μεγάλων πλεονεκτημάτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης, της σχεδιαστικής, δηλαδή, ελευθερίας και της (συνεπακόλουθης) δυνατότητας εξατομίκευσης (Majeed, et al., 2021; Butt, 2020).

Το Σχήμα 7.1 παρουσιάζει ένα σύστημα κλειστού βρόγχου, το οποίο αποτελείται από τις τέσσερις φάσεις της ανάλυσης μαζικών δεδομένων στην προσθετική κατασκευή. Αρχικά συλλέγονται τα δεδομένα (δομημένα, αδόμητα, ημιδομημένα) πραγματικού και μη χρόνου από ολόκληρο τον κύκλο παραγωγής των προϊόντων και αποθηκεύονται στο σύστημα διαχείρισης δεδομένων. Στη συνέχεια, απομακρύνεται ο θόρυβος και γίνεται η ολοκλήρωση των δεδομένων, η ενοποίηση δηλαδή των δεδομένων, που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, αλλά αφορούν το ίδιο αντικείμενο (π.χ. συντήρηση), σε μια ενιαία βάση. Ακολουθεί η διαδικασία μείωσης του όγκου (χωρίς ωστόσο να μειώνεται η ακρίβεια των δεδομένων) και ο μετασχηματισμός τους, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα εξόρυξης δεδομένων. Στόχος των μοντέλων αυτών είναι η εξαγωγή μέσω μεθόδων (π.χ. ταξινόμηση, συσταδοποίηση, κανόνες συσχετίσεων), άγνωστων γνώσεων και μοτίβων, σε κατανοητή για τον άνθρωπο μορφή. Μάλιστα τα συστήματα αυτά έχουν την ικανότητα μνήμης, εξέλιξης και

αυτομάτησης. Στο τέλος, λαμβάνονται οι αποφάσεις για τις αλλαγές που πρέπει να γίνουν βάσει των αποτελεσμάτων της εξόρυξης σε κάθε στάδιο (Majeed, et al., 2021).



Σχήμα 7.1: Φάσεις ανάλυσης μεγάλων δεδομένων στην προσθετική κατασκευή (Majeed, et al., 2021).

7.4 Κυβερνοασφάλεια και προσθετική κατασκευή

Ο πυρήνας του Industry 4.0 βρίσκεται στην έξυπνη και σε πραγματικό χρόνο σύνδεση ανθρώπων, μηχανών και αντικειμένων, η οποία θα ψηφιοποιήσει τις αλυσίδες αξίες και θα αναδιαμορφώσει τις σχέσεις μεταξύ παραγωγών, καταναλωτών και προμηθευτών (Broggi, et al. 2020). Ο μεγάλος αυτός αριθμός δικτυακών συνδέσεων, καθιστά τα συστήματα παραγωγής ευάλωτα σε επιθέσεις στον κυβερνοχώρο και έτσι η κυβερνοασφάλεια αναδεικνύεται ως μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις του «Industry 4.0». Μάλιστα, σύμφωνα με τη μελέτη του Ευρωπαϊκού Οργανισμού για την Ασφάλεια Δικτύων και Πληροφοριών (ENISA) η ασφάλεια των Συστημάτων Βιομηχανικού Ελέγχου, τα οποία παρακολουθούν και ελέγχουν αυτοματοποιημένες βιομηχανικές διεργασίες, των πυλών του IIoT, των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, που μετρούν συγκεκριμένες παραμέτρους του συστήματος (π.χ. θερμοκρασία) και ενεργοποιούν τις απαραίτητες ενέργειες, αντίστοιχα, είναι καθοριστικής σημασίας (Corallo, et al., 2020). Γενικά, για να χαρακτηριστεί ένα κυβερνο-φυσικό σύστημα ασφαλές θα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής απαιτήσεις (Khalid, et al., 2020; Corallo, et al., 2020):

- **Εμπιστευτικότητα:** Τήρηση απορρήτου δεδομένων/πληροφοριών και απαγόρευση πρόσβασης σε μη εξουσιοδοτημένα άτομα. Συνήθως επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας αλγόριθμους κρυπτογράφησης. Σε περίπτωση διαρροής πληροφοριών που σχετίζονται με τον σχεδιασμό προϊόντων είναι πιθανή η απώλεια του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος. Εάν οι πληροφορίες αφορούν τις συνθήκες λειτουργίας των μηχανών ή τους ελέγχους ποιότητας των ημιέτοιμων προϊόντων και αποκαλυφθούν δυσλειτουργίες ή δείκτες ποιότητας εκτός ορίων, αντίστοιχα, τότε η διαρροή θα υπονομεύσει την εικόνα και τη φήμη της εταιρίας και θα διακυβευθεί η αξιοπιστία της.
- **Ακεραιότητα:** Προστασία δεδομένων έναντι τροποποιήσεως από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Η μη εξουσιοδοτημένη τροποποίηση δεδομένων σχεδιασμού και συνθηκών λειτουργίας των μηχανών θα μπορούσε να οδηγήσει σε υποβάθμιση της ποιότητας των προϊόντων, πιθανή αύξηση των ελαττωματικών και βλάβες των μηχανών.
- **Διαθεσιμότητα:** Δυνατότητα πρόσβασης και χρήσης των δεδομένων, όποτε κριθεί απαραίτητο. Εάν τα δεδομένα σχεδιασμού ή λειτουργίας των μηχανών δεν είναι διαθέσιμα, δεν είναι δυνατή η έναρξη της παραγωγικής διαδικασίας, με αποτέλεσμα πιθανή αύξηση του χρόνου παράδοσης και αδυναμία τήρησης εμπορικών συμφωνιών, ή και αυξημένα επίπεδα αποθεμάτων πρώτων υλών, οι οποίες μετά το πέρας ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος θα έχουν πια καταστεί ακατάλληλες για χρήση.

Όσον αφορά στην προσθετική κατασκευή, η προστασία των αρχείων CAD είναι υψίστης σημασίας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται και στην περίπτωση της εξωτερικής ανάθεσης είτε του σχεδιασμού είτε της εκτύπωσης, λόγω της «επιμήκυνσης» της εφοδιαστικής αλυσίδας και της αύξησης του αριθμού των υποσυστημάτων που θα πρέπει να προστατεύονται. Αύξηση των δικτυακών συνδέσεων συνεπάγεται αύξηση των πιθανών σημείων επιθέσεων. Έτσι λοιπόν, παρόλο που η σύνδεση του εκτυπωτή και των αρχείων σε cloud επιτρέπει την απομακρυσμένη εκτύπωση, είναι πιθανή η παραβίαση του εκτυπωτή μέσω του cloud και η εγκατάσταση κακόβουλων λογισμικών ή ιών σε αυτόν. Μάλιστα, υπάρχει η επιλογή προγραμματισμού των ιών, κατά την οποία προκαλούνται ελαττώματα σε έναν μικρό μόνο αριθμό προϊόντων ανά παρτίδα, και επομένως μειώνεται η πιθανότητα εντοπισμού τους στον δειγματοληπτικό έλεγχο. Επιπλέον, πέρα από την κλοπή ή την τροποποίηση των δεδομένων σχεδιασμού για λόγους απομίμησης ή σαμποτάζ, είναι δυνατή η επίθεση σε πλευρικά συστήματα, για την οποία δεν απαιτείται πρόσβαση στον εκτυπωτή. Ένα παράδειγμα τέτοιας επίθεσης είναι η παραβίαση ενός έξυπνου μετρητή ισχύος, ο οποίος βρίσκεται στην γραμμή ηλεκτρικού ρεύματος και ανήκει σε εταιρία κοινής ωφέλειας, με στόχο τη διακοπή της παραγωγής ή την παραγωγή ελαττωματικών προϊόντων. Προκειμένου, επομένως, να αποφεύγονται τέτοιου είδους επιθέσεις, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η προστασία κάθε επιπέδου της αλυσίδας τροφοδοσίας (Gupta, et al., 2020).

Στη βελτίωση της ορατότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας, της πρόσβασης δηλαδή των μερών της σε ακριβείς και αξιόπιστες πληροφορίες (Somara, et al., 2018), μπορεί να συμβάλει η τεχνολογία Blockchain. Το Blockchain είναι ένα αποκεντρωμένο λογιστικό καθολικό βιβλίο (ledger), που αποτελείται από μια μεγάλη αλυσίδα πολλών και συνδεδεμένων μεταξύ τους με χρονολογική σειρά blocks. Κάθε νέο block έχει αποθηκευμένες τις πληροφορίες των εκκρεμών συναλλαγών, η επαλήθευση των οποίων είναι προϋπόθεση για την προσθήκη του στην αλυσίδα. Η επαλήθευση και ο έλεγχος της ασφάλειας των συναλλαγών πραγματοποιούνται από τους κόμβους (υπολογιστές που μοιράζονται τους πόρους ισοδύναμα) του δικτύου. Στη συνέχεια οι πληροφορίες που βρίσκονται σε ένα block, κωδικοποιούνται και μετατρέπονται σε ένα αλφαριθμητικό αποτέλεσμα με τη χρήση κρυπτογραφίας από τους εξορύχους (miners). Το αλφαριθμητικό αποτέλεσμα λέγεται hash και αυτή είναι η μορφή με την οποία αποθηκεύονται οι πληροφορίες στο block. Οι hashes είναι μοναδικές και έτσι το block που δημιουργείται παραμένει αμετάβλητο (Alkaabi, et al., 2020). Όταν κάποιος προσπαθήσει να τροποποιήσει μια

ήδη υπάρχουσα hash, δηλαδή να εξαπατήσει σε κάποια συναλλαγή, η τροποποιημένη ψευδής hash εντοπίζεται από τους εξορύχους και τόσο το block με τη πλαστή hash, όσο και τα επόμενα blocks που συνδέονται με αυτό ακυρώνονται (Mandolla, et al., 2019). Επομένως, λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης τεχνολογίας, οι συναλλαγές είναι ασφαλείς, αμετάβλητες (δεν υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης των πληροφοριών) και διαφανείς (έχουν ελεγχθεί οι κόμβοι και η ικανότητά τους να επαληθεύουν πληροφορίες).

Έτσι λοιπόν, η χρήση της τεχνολογίας Blockchain θα διευκολύνει τη διαχείριση των δραστηριοτήτων κατά μήκος των ψηφιακών εφοδιαστικών αλυσίδων που αναμένεται να σχηματιστούν κατά την υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο πλαίσιο του Industry 4.0, καθώς θα εξασφαλίσει την πρόσβαση σε αξιόπιστα δεδομένα, των οποίων η προέλευση και η διαδρομή θα είναι γνωστή, αφού θα έχουν καταγραφεί στο Blockchain. Επιπλέον, μέσω της κρυπτογράφησης των δεδομένων σχεδιασμού και λειτουργίας των μηχανών και της σύναψης έξυπνων συμβολαίων, θα επιτρέπεται η πρόσβαση μόνο εξουσιοδοτημένων χρηστών στα δεδομένα αυτά, ενώ ταυτόχρονα θα προσδιορίζεται η διάρκεια και ο τρόπος χρήσης τους, με αποτέλεσμα αφενός την ενίσχυση της προστασίας έναντι επιθέσεων, που έχουν ως στόχο την υποκλοπή ή την τροποποίηση δεδομένων, και αφετέρου την προστασία των δικαιωμάτων των κατασκευαστριών εταιριών και των παρόχων υπηρεσιών εκτύπωσης ή σχεδιασμού που ρυθμίζονται από τις παραπάνω συμβάσεις (Kurjuweit, et al., 2021).

Ωστόσο η έλλειψη ρυθμιστικών προτύπων, η ελλιπής κατανόηση και οι ανεπαρκείς γνώσεις των εταιριών σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής της τεχνολογίας, το κόστος σχεδιασμού, ανάπτυξης, υλοποίησης, μετάβασης και συντήρησης ενός Blockchain συστήματος, η απουσία κατάλληλων υποδομών και η ανάγκη ευθυγράμμισης των υφιστάμενων πληροφοριακών συστημάτων με την τεχνολογία Blockchain (η διαλειτουργικότητα αποτελεί προϋπόθεση για την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία), η πιθανή μελλοντική ελάττωση της ταχύτητας διευθέτησης των συναλλαγών λόγω του συνεχώς αυξανόμενου όγκου δεδομένων και της αδυναμίας διαχείρισής του αποτελούν βασικά εμπόδια για την ευρύτερη υιοθέτηση της τεχνολογίας Blockchain από τη βιομηχανία (Rejeb, et al., 2022).

7.5 Υπολογιστικό νέφος και προσθετική κατασκευή

Σύμφωνα με τον ορισμό του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology - NIST), το υπολογιστικό νέφος είναι ένα μοντέλο που επιτρέπει την κατ' απαίτηση πρόσβαση σε ένα κοινής χρήσης σύνολο πόρων (π.χ. server, εφαρμογές, συσκευές αποθήκευσης), με ελάχιστη υπολογιστική προσπάθεια και αλληλεπίδραση με τον πάροχο. Ανάλογα με τους πόρους που παρέχονται, διακρίνονται οι εξής τρεις κατηγορίες μοντέλων υπολογιστικού νέφους: 1) Infrastructure as a Service (IaaS) για την παροχή διακομιστών, αποθηκευτικών συστημάτων (π.χ. Dropbox), υποδομών δικτύου (network), 2) Platform as a Service (PaaS) για την παροχή λειτουργικών συστημάτων, βάσεων δεδομένων και ενδιάμεσων λογισμικών (συνήθως χρησιμοποιείται από ομάδες ή εταιρίες που αναπτύσσουν λογισμικά) και 3) Software as a Service (SaaS) για την παροχή λογισμικών και την αποφυγή αγοράς άδειας χρήσης, εγκατάστασης και αναβάθμισης των λογισμικών στον υπολογιστή των χρηστών. Γενικά, τα κύρια πλεονεκτήματα του CC (Cloud Computing) είναι το χαμηλό κόστος, η εξάλειψη της ανάγκης αγοράς και συντήρησης των κατάλληλων υποδομών, η εύκολη πρόσβαση ανεξαρτήτως τοποθεσίας, η υψηλή ταχύτητα και η αξιοπιστία (Rashid and Chaturvedi, 2019).

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας IIoT οδηγεί στη συλλογή ενός τεράστιου όγκου δεδομένων, η αποθήκευση και η ανταλλαγή των οποίων διευκολύνεται ιδιαίτερα από την αξιοποίηση του υπολογιστικού νέφους. Εκτός όμως από την παροχή αποθηκευτικού χώρου (μοντέλο IaaS), είναι δυνατή και η ανάλυση των συλλεγόμενων δεδομένων μέσω του μοντέλου Big Data as a Service (BDaaS), το οποίο περιλαμβάνει πολλές από τις λειτουργίες και τα οφέλη των μοντέλων

IaaS και SaaS. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα μοντέλο που παρέχει την υποδομή και το λογισμικό για την αποθήκευση και την ανάλυση, αντίστοιχα, μεγάλων δεδομένων. Υπενθυμίζεται ότι η ανάλυση μεγάλων δεδομένων απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ, ένας περιορισμός που αίρεται χάρη στο υπολογιστικό νέφος (Goldin, et al., 2017). Το μοντέλο αυτό ενδείκνυται και για την ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό, την παραγωγή και τον έλεγχο προϊόντων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί, ότι το CC ήταν ήδη διαδεδομένο, καθώς αρκετές εταιρίες το χρησιμοποιούσαν χωρίς να είχαν στραφεί απαραίτητα προς το πρότυπο του «Industry 4.0». Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα λογισμικά για τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (π.χ. SaaS WMS - σύστημα διαχείρισης αποθεμάτων), που είναι αναπτυγμένα σε cloud.

Τέλος, χάρη στο υπολογιστικό νέφος είναι δυνατή η μετάβαση σε ένα νέο μοντέλο παραγωγής, το «Cloud Manufacturing». Το μοντέλο αυτό μετατρέπει τους παραγωγικούς πόρους και τις παραγωγικές δυνατότητες σε υπηρεσίες κατασκευής, οι οποίες παρέχονται μέσω του υπολογιστικού νέφους. Πιο συγκεκριμένα σχηματίζονται, βάσει των απαιτήσεων των πελατών (ιδιώτες ή εταιρίες), δυναμικές, αυτό-βελτιούμενες, κυβερνοφυσικές γραμμές παραγωγής, που ενισχύουν την αποδοτικότητα, την ευελιξία και τον αυτοματισμό, μειώνουν το κόστος του κύκλου ανάπτυξης των προϊόντων και επιτρέπουν τη βέλτιστη κατανομή των πόρων (Thames and Schaefer, 2016). Οι Rahman, et al ανέπτυξαν ένα κυβερνοφυσικό σύστημα για την εκτύπωση πολυμερικών δοκιμίων, σύμφωνα με τις παραγγελίες των πελατών που κατατίθεντο σε τυποποιημένες φόρμες στην ιστοσελίδα της εταιρίας παροχής υπηρεσιών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονταν τα αρχεία CAD και άλλες πληροφορίες (π.χ. επιθυμητή τιμή αντοχής σε εφελκυσμό) μέσω του προγράμματος περιήγησης ιστού (web browser) της εταιρίας, αποθηκεύονταν στο σύστημα βάσεων δεδομένων SQL της Microsoft και στη συνέχεια αποστέλλονταν στην πλατφόρμα υπολογιστικού νέφους Microsoft Azure. Η πλατφόρμα αυτή λειτουργούσε ως κόμβος, καθώς πριν την αποστολή των δεδομένων στον 3D εκτυπωτή, χρησιμοποιούσε αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για τον προσδιορισμό των κατάλληλων, σύμφωνα με το επιθυμητό αποτέλεσμα, παραμέτρων της εκτύπωσης (π.χ. πάχος στρώματος). Επίσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αλληλεπίδραση του υπολογιστικού νέφους με τον εκτυπωτή, ήταν απαραίτητη η ενσύρματη σύνδεση του με μια συσκευή Raspberry Pi, στην οποία ήταν εγκατεστημένο το λογισμικό Octoprint, που επέτρεπε τον προγραμματισμό και την απομακρυσμένη παρακολούθηση της εκτύπωσης (Rahman, et al., 2022).

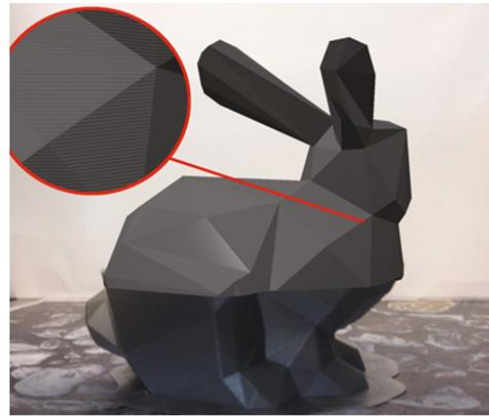
7.6 Επαυξημένη πραγματικότητα και προσθετική κατασκευή

Η επαυξημένη πραγματικότητα επιτρέπει την προσθήκη παραγόμενων από τον υπολογιστή πληροφοριών (ήχος, εικόνα, λέξεις, βίντεο) στο φυσικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Τα βασικά συστατικά στοιχεία των συστημάτων επαυξημένης πραγματικότητας είναι: 1) συσκευή απεικόνισης του επαυξημένου περιβάλλοντος (π.χ. ειδικά γυαλιά, προσαρτημένες στο κεφάλι συσκευές, tablets), 2) συστήματα εισόδου, 3) αισθητήρες εντοπισμού θέσης (π.χ. πυξίδες, γυροσκοπία) για την οπτική καταγραφή του φυσικού περιβάλλοντος και τον προσδιορισμό της θέσης των αντικειμένων στο χώρο, χωρίς τον οποίο δεν θα ήταν δυνατή η προσθήκη των εικονικών πληροφοριών, 4) υπολογιστικό σύστημα για την ανάλυση των δεδομένων εισόδου και την παραγωγή των κατάλληλων σημάτων για την εμφάνιση των πληροφοριών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται σε αρκετούς κλάδους με τις κυριότερες εφαρμογές να αφορούν την ιατρική και την εκπαίδευση (Arena, et al., 2022; Carmigniani, et al., 2011). Είναι δυνατή για παράδειγμα, η λήψη δεδομένων από αξονικές/μαγνητικές τομογραφίες και η «ενίσχυση» της εικόνας που καταγράφει η κάμερα του ιατρού σε πραγματικό χρόνο με τα δεδομένα αυτά (Εικόνα 7.1). (Reyes-Ruiz and Hernández-Hernández, 2020).



Εικόνα 7.1: Αναπαράσταση ανατομίας ασθενούς με επαυξημένη πραγματικότητα (Reyes-Ruiz and Hernández-Hernández, 2020).

Ωστόσο, η επαυξημένη πραγματικότητα χρησιμοποιείται και στη βιομηχανία, καθώς επιτρέπει την παροχή τεχνικής υποστήριξης για διαδικασίες συντήρησης και επισκευής των μηχανών, την εκπαίδευση των εργαζομένων, καθώς και την παρακολούθηση των παραγωγικών διεργασιών. Πιο συγκεκριμένα, οι χειριστές των μηχανών (των εκτυπωτών για την περίπτωση της προσθετικής κατασκευής) μπορούν να συντηρήσουν και να επισκευάσουν τον εξοπλισμό, ακόμα και στην περίπτωση που δεν έχουν χειριστεί στο παρελθόν το συγκεκριμένο μηχάνημα, χωρίς να χρειαστεί να διαβάσουν πολυσέλιδα έντυπα εγχειρίδια. Αντίθετα λαμβάνουν οδηγίες, ακουστικές ή/και οπτικές (σε μορφή τρισδιάστατων σχεδίων), οι οποίες προβάλλονται πάνω στον πραγματικό εξοπλισμό και εξηγούν σταδιακά όλες τις εργασίες που πρέπει να υλοποιηθούν. Επίσης, είναι εφικτή η απομακρυσμένη παροχή τεχνικών οδηγιών από εξειδικευμένους τεχνικούς που δεν βρίσκονται στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μέσω της αναμετάδοσης της εικόνας από τις συσκευές επαυξημένης πραγματικότητας. Οι δυνατότητες αυτές είναι πολύ σημαντικές, καθώς οι έγκαιρες και σωστές συντηρήσεις και επισκευές μειώνουν την πιθανότητα εμφάνισης εργατικών ατυχημάτων και απρόβλεπτων διακοπών της λειτουργίας των μηχανών (Devagiri, et al., 2022). Τέλος, η χρήση της επαυξημένης πραγματικότητας για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της εκτύπωσης μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας της. Οι Eiriksson et al. χρησιμοποίησαν τη συγκεκριμένη τεχνολογία για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας της κεφαλής εκτύπωσης ενός εκτυπωτή τεχνολογίας εξώθησης υλικού. Η αναγνώριση της κεφαλής γινόταν με τη βοήθεια της κάμερας ενός iPad και ενός κωδικού QR, που λειτουργούσε ως οπτικός δείκτης. Μόλις ο οπτικός δείκτης αναγνωριζόταν από την κάμερα, εμφανιζόταν στην οθόνη του iPad η αρχικά ρυθμιζόμενη και η πραγματική θερμοκρασία της κεφαλής. Η βάση εκτύπωσης αποτελούταν επίσης από κωδικούς QR και έτσι ήταν δυνατή η υπέρθεση πάνω στα ήδη εκτυπωμένα στρώματα των υπολειπόμενων, για την ολοκλήρωση του αντικειμένου, στρωμάτων. Στόχος ήταν η ανάλυση της επιφάνειας των εικονικών στρωμάτων, η οποία μάλιστα αποκάλυψε την ύπαρξη του φαινομένου του σκαλοπατιού (Εικόνα 7.2).



Εικόνα 7.2: Χρήση επαυξημένης πραγματικότητας για έλεγχο της επιφάνειας και της θερμοκρασίας κεφαλής εκτύπωσης (Eiriksson, et al., 2017)

7.7 Αυτόνομα ρομπότ και προσθετική κατασκευή

Τα αυτόνομα ρομπότ μπορούν να συγκεντρώνουν, μέσω των αισθητήρων που διαθέτουν, πληροφορίες για το περιβάλλον, να το κατανοούν, να ενεργούν και να μαθαίνουν. Στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής έχει παρουσιαστεί η ανάγκη συνεργασίας ανθρώπων και βιομηχανικών ρομπότ για την από κοινού και ασφαλή εκτέλεση εργασιών. Έτσι, σχεδιάστηκαν τα Cobots (collaborative robots), τα οποία είναι μικρά, ελαφριά και ευέλικτα, μπορούν να συνεργάζονται και να επικοινωνούν με τους ανθρώπους και προσδίδουν τα στοιχεία της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας σε εργασίες που μέχρι πρότινος γίνονταν χειρωνακτικά. Επίσης, ενισχύουν τις γνωστικές και τις σωματικές δεξιότητες των εργαζομένων, αφού λαμβάνουν σωστές αποφάσεις βάσει αναλύσεων μεγάλου όγκου δεδομένων και εκτελούν πιο επικίνδυνες ή ανθυγιεινές εργασίες (π.χ. ανύψωση μεγάλων φορτίων). Η τοποθέτηση των αποθεμάτων σε αποθήκη, η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων και η μεταφορά υλικών εντός του δικτύου παραγωγής με αυτόνομα κινητά ρομπότ, που φέρουν ιμάντες μεταφοράς, εντοπίζουν τη συντομότερη διαδρομή και επιτρέπουν την δυναμική και ευέλικτη σύνδεση διαφορετικών σταθμών εργασίας, αποτελούν από τις πιο συχνά αναφερόμενες στη βιβλιογραφία εφαρμογές (Goel and Gupta, 2020; Bragança, et al., 2019; Fragarane, et al., 2022). Συνολικά, η χρήση των ρομποτικών συστημάτων συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας, του βαθμού αυτοματισμού, της ταχύτητας και της αξιοπιστίας των παραγωγικών διεργασιών, στοιχεία τα οποία κυριαρχούν στο πρότυπο της Βιομηχανίας 4.0.

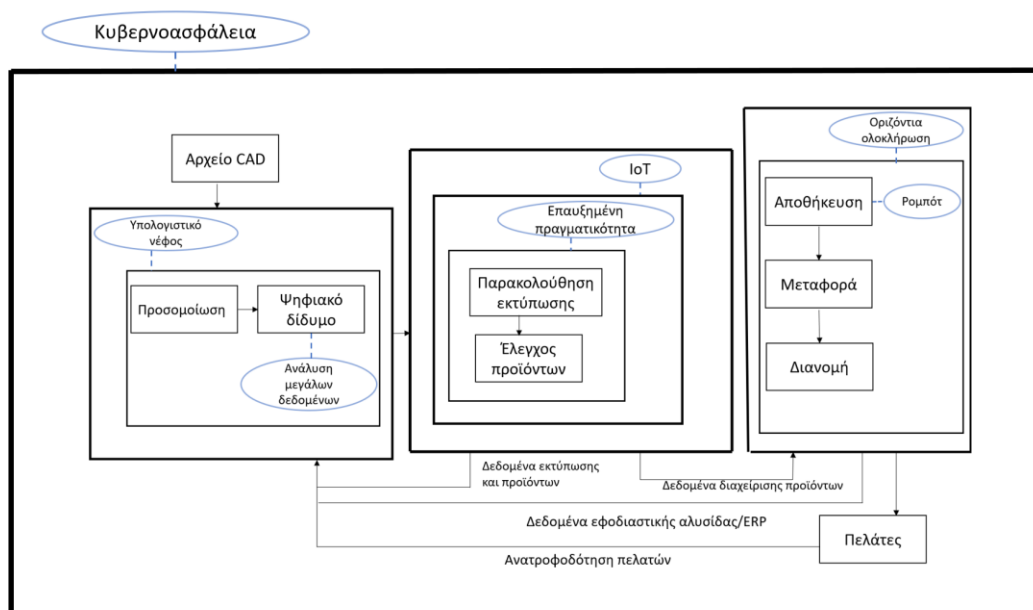
Η αξιοποίηση αυτόνομων ρομπότ στην προσθετική κατασκευή δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, καθώς πρόκειται για μια τεχνολογία που ακόμα εξελίσσεται, δοκιμάζεται και δεν έχει εφαρμοστεί από τις βιομηχανίες σε μεγάλη κλίμακα. Η ανάπτυξη και η ενσωμάτωση ρομποτικών συστημάτων στην εκτύπωση δεν θεωρείται επομένως άμεση ανάγκη και ούτε αναμένεται ότι θα φέρει τα οφέλη, που παρατηρούνται στην περίπτωση των συμβατικών μεθόδων παραγωγής. Άλλωστε η τρισδιάστατη εκτύπωση χαρακτηρίζεται ήδη από υψηλό βαθμό αυτοματισμού. Εξάιρεση αποτελεί ο κλάδος των υποδομών, ο οποίος λόγω του περιορισμένου όγκου του χώρου κατασκευής των εκτυπωτών, απαιτεί τη χρήση ρομποτικών πλατφόρμων που φέρουν βραχίονες εναπόθεσης υλικού. Μάλιστα, έχουν σχεδιαστεί συστήματα που αντιλαμβάνονται τη θέση και τον προσανατολισμό τους και κινούνται ακολουθώντας της βέλτιστη διαδρομή, αποφεύγοντας παράλληλα τα εμπόδια που βρίσκονται στο εργοστάσιο. (Dörfler, et al., 2022).

7.8 Οριζόντια/κάθετη ολοκλήρωση και προσθετική κατασκευή

Η οριζόντια ολοκλήρωση αναφέρεται στη ψηφιοποίηση της αλυσίδας αξίας και την ενσωμάτωση ICT συστημάτων, με στόχο τη συνεχή ροή πληροφοριών και πόρων σε πραγματικό χρόνο και επομένως την άριστη συνεργασία μεταξύ των εταιριών. Συμβάλλει στην επίτευξη καλύτερου συντονισμού, την αύξηση της ταχύτητας και της ευελιξίας και την εξοικονόμηση κόστους. Η κάθετη ολοκλήρωση, από την άλλη πλευρά, αναφέρεται στην ενσωμάτωση ICT συστημάτων στα ιεραρχικά επίπεδα της παραγωγής (δικτύωση παραγωγικής διαδικασίας με αισθητήρες και ενεργοποιητές, ρύθμιση μηχανών, παρακολούθηση παραγωγικής διαδικασίας, προγραμματισμός παραγωγής και διαχείριση ποιότητας, διαχείριση και επεξεργασία παραγγελιών), καθώς και στην ευέλικτη προσαρμογή αυτής, υποδηλώνοντας ουσιαστικά τη λειτουργία του έξυπνου εργοστασίου ή αλλιώς «Smart Factory». Η οριζόντια και η κάθετη ολοκλήρωση καθίστανται δυνατές χάρη στο IIoT, το Cloud Computing, την ανάλυση μεγάλων δεδομένων, τα κυβερνοφυσικά συστήματα και τις προσομοιώσεις (Dalenogare, et al., 2018; Zhou, et al., 2015; Butt, 2020). Ήδη έχουν αναπτυχθεί πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους που βασίζονται στο IIoT και επιτρέπουν το συνδυασμό όλων των προαναφερθέντων τεχνολογιών και τελικά την οριζόντια και κάθετη ολοκλήρωση. Οι πλατφόρμες αυτές μπορούν να κατασκευάσουν ψηφιακά δίδυμα, ηλεκτρονικά δηλαδή μοντέλα ενός φυσικού συστήματος, τα οποία επικοινωνούν με το φυσικό σύστημα σε πραγματικό χρόνο, παρέχουν πληροφορίες για την τρέχουσα κατάστασή του και προβλέπουν τις μελλοντικές αποκρίσεις του. Διαφέρουν από τις προσομοιώσεις, καθώς δεν είναι στατικά, αλλά δυναμικά και δίνουν συνεχώς νέα αποτελέσματα βάσει των πραγματικών, διαρκώς μεταβαλλόμενων δεδομένων που λαμβάνουν (Chen, 2017). Η πλατφόρμα Teamcenter της Siemens ενδείκνυται και για εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής, καθώς παρέχει όλα τα εργαλεία για τον σχεδιασμό, την προσομοίωση, τη βελτιστοποίηση τοπολογίας και την παρακολούθηση της εκτύπωσης. Παράλληλα, αναλύοντας τα δεδομένα που προκύπτουν, προτείνει τρόπους βελτίωσης της διεργασίας. Επίσης, υποστηρίζει και την περίπτωση εξωτερικής ανάθεσης της εκτύπωσης, καθώς κατασκευαστές και πάροχοι υπηρεσιών έχουν τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης μέσω της διαδικτυακής της πλατφόρμα, προκειμένου να δημιουργήσουν από κοινού τα προϊόντα τους (Butt, 2020).

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση των τεχνολογιών που αναλύθηκαν προηγουμένως και της προσθετικής κατασκευής στο πλαίσιο του «Industry 4.0». Αρχικά σχεδιάζεται το αρχείο CAD και με τη βοήθεια προσομοιώσεων εξετάζεται η συμπεριφορά των παραγόμενων προϊόντων υπό διαφορετικές συνθήκες εκτύπωσης. Αφού αποφασιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων, κατασκευάζεται το ψηφιακό δίδυμο, το οποίο κατά την παρακολούθηση της εκτύπωσης και τον έλεγχο των προϊόντων θα ενημερώνεται αυτόματα. Τα

δεδομένα που παράγονται θα συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες και τις συσκευές IoT, θα μεταφέρονται στο υπολογιστικό νέφος, θα επεξεργάζονται με τεχνικές ανάλυσης μεγάλων δεδομένων και θα τροφοδοτούν το ψηφιακό δίδυμο. Στην παρακολούθηση της εκτύπωσης μπορεί να συμβάλει η τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας. Παράλληλα, δεδομένα που σχετίζονται με την ασφαλή αποθήκευση, μεταφορά και διανομή των προϊόντων αποστέλλονται στα αρμόδια μέρη της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αυτόνομα ρομπότ μπορούν να αξιοποιηθούν για την τοποθέτηση των έτοιμων προϊόντων στις αποθήκες. Ακολουθεί η ανάλυση των δεδομένων, που προέρχονται από την αλυσίδα τροφοδοσίας, τα συστήματα ERP και τους ίδιους τους πελάτες, με στόχο τον έλεγχο του κύκλου ζωής των προϊόντων σε πραγματικό χρόνο και τη βελτίωση όχι μόνο του παραγωγικού συστήματος, αλλά και ολόκληρης της αλυσίδας αξίας. Τέλος, η προστασία των ψηφιακών συσκευών, των λογισμικών και των αποθηκευμένων δεδομένων επιτυγχάνεται με την εφαρμογή τεχνολογιών κυβερνοασφάλειας.



Σχήμα 7.2: Αλληλεπίδραση των εννιά τεχνολογικών πυλώνων του Industry 4.0.

7.8 Επισκόπηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ο βιομηχανικός κλάδος διανύει την εποχή της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης, η οποία χαρακτηρίζεται από την ψηφιοποίηση, την αυτοματοποίηση, την ευέλικτη προσαρμογή, την επικοινωνία μεταξύ μηχανών και ανθρώπων και τη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων. Μετασχηματίζει ολόκληρη την αλυσίδα αξίας και οδηγεί στην αύξηση της παραγωγικότητας και της ευελιξίας, στη γρήγορη επίλυση προβλημάτων και στη λήψη βέλτιστων αποφάσεων. Όλα τα παραπάνω επιτυγχάνονται χάρη στην αξιοποίηση εννιά τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένης και της προσθετικής κατασκευής. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι εναρμονισμένη με τις απαιτήσεις του Industry 4.0, καθώς επιτρέπει την εξατομίκευση, την αποκεντρωμένη παραγωγή και τον σχηματισμό ευέλικτων αλυσίδων τροφοδοσίας. Η πλήρης εκμετάλλευση, ωστόσο, των οφελών του νέου αυτού προτύπου απαιτεί τον συνδυασμό των τεχνολογιών και όχι την μεμονωμένη εφαρμογή της καθεμίας από αυτές. Προς το παρόν, ελάχιστες μελέτες έχουν εξετάσει συστήματα προσθετικής κατασκευής, στα οποία να ενσωματώνονται και οι υπόλοιπες οχτώ τεχνολογίες. Κυρίως μελετάται η αλληλεπίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης με μία ή δύο τεχνολογίες ταυτόχρονα. Οι συνδυασμοί που

εντοπίζονται συνηθέστερα στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν την προσθετική κατασκευή, την προσομοίωση, το IIot, το υπολογιστικό νέφος και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην προσπάθεια αντιμετώπισης μιας από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης, της ανάλυσης δηλαδή του μεγάλου όγκου δεδομένων που προκύπτει από τις πολύπλοκες και ποικίλες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του σχεδιασμού, των ιδιοτήτων των υλικών, των παραμέτρων της εκτύπωσης και των χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων. Βέβαια, οι περισσότερες μελέτες, που έχουν διεξαχθεί σχετικά με την προσθετική κατασκευή στο πλαίσιο του Industry 4.0, δεν είναι εμπειρικές/πειραματικές, αλλά θεωρητικές. Προκειμένου, λοιπόν, να σχηματιστεί μια συνολική εικόνα, με ποσοτικά αποτελέσματα, των πραγματικών δυνατοτήτων ενός τέτοιου συστήματος απαιτούνται συστηματικές, μακροπρόθεσμες, εμπειρικές μελέτες. Επίσης, η αξιοποίηση της επαυξημένης πραγματικότητας και των αυτόνομων ρομπότ στη διεργασία της εκτύπωσης έχει εξεταστεί ελάχιστα.

Προχωρώντας στις τεχνολογίες που έχουν ήδη μελετηθεί, αξίζει να αναφερθεί, ότι η προσομοίωση, παρόλο που αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, συχνά δεν αρκεί για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η επικύρωση των αποτελεσμάτων της με πειραματικές μετρήσεις. Μια ακόμα πρόταση για περαιτέρω έρευνα είναι η ανάπτυξη βελτιωμένων αισθητήρων και συσκευών IIot, ικανών να αντλούν δεδομένα υψηλής ποιότητας κατά την εκτύπωση, τα οποία θα τροφοδοτούν στη συνέχεια τα μοντέλα μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται στα ψηφιακά δίδυμα. Επίσης, χρειάζεται να αναπτυχθούν αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση παραγωγικών διεργασιών, οι οποίες στηρίζονται όχι μόνο στην εξώθηση υλικού, αλλά και σε άλλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Οι τεχνικές ανάλυσης δεδομένων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση της ταυτόχρονης λειτουργίας πολλών εκτυπωτών, με στόχο τη βέλτιστη και ευέλικτη διαμόρφωση των «ουρών εκτύπωσης» βάσει της ζήτησης, της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας των προϊόντων και της ταχύτητας των εκτυπωτών.

Τέλος, πρέπει να δοθεί έμφαση και στο θέμα της διαλειτουργικότητας. Πολλές βιομηχανίες δεν είναι ακόμα έτοιμες για τη μετάβαση στο πρότυπο του Industry 4.0. Μελέτες σχετικά με το κόστος και τον τρόπο σχεδιασμού, ανάπτυξης, υλοποίησης και συντήρησης του νέου αυτού συστήματος παραγωγής, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις υφιστάμενες υποδομές και τα διαθέσιμα πληροφοριακά συστήματα, καθώς και την ανάγκη ευθυγράμμισης τους με τις σύγχρονες τεχνολογίες, είναι απαραίτητες.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα σημαντικότερα σημεία της παρούσας εργασίας, θα σχολιαστούν τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από αυτή και θα δοθούν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η διερεύνηση της επίδρασής της στην εφοδιαστική αλυσίδα. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει πρώτα να κατανοηθεί η αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας και να εξεταστούν τα χαρακτηριστικά που τη διακρίνουν από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Αποτέλεσμα των παραπάνω χαρακτηριστικών είναι η εμφάνιση νέων δυνατοτήτων, αλλά και προκλήσεων, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν όχι μόνο την παραγωγή, αλλά ολόκληρη την αλυσίδα αξίας.

Η κύρια διαφορά της προσθετικής κατασκευής και των συμβατικών, αφαιρετικών μεθόδων παραγωγής έγκειται στον τρόπο κατασκευής των αντικειμένων. Πιο συγκεκριμένα, η προσθετική κατασκευή βασίζεται στην εναπόθεση υλικού ανά στρώματα και όχι στη συνεχή αφαίρεσή του από μία ακατέργαστη μάζα σώματος έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά με τη δημιουργία ψηφιακών αρχείων σχεδιασμού, που περιέχουν τρισδιάστατα μοντέλα του προς εκτύπωση αντικειμένου, τα οποία περιγράφουν τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, και τη μετατροπή στη συνέχεια των αρχείων αυτών σε αρχεία οδηγιών εναπόθεσης του υλικού. Δεδομένης της προσθετικής φύσης της τεχνολογίας, είναι θεωρητικά εφικτή η κατασκευή οποιασδήποτε γεωμετρίας, χωρίς προηγουμένως να απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων εργαλείων και καλουπιών, η οποία και είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και κοστοβόρα.

Οι περισσότερες μελέτες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία εστιάζουν στις αλλαγές που επιφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση στο στάδιο του σχεδιασμού και της παραγωγής. Αρχικά, είχε εξεταστεί η χρήση της τεχνολογίας για την ταχεία δημιουργία εργαλείων και προτύπων, με στόχο την επιτάχυνση της φάσης του σχεδιασμού, αλλά γρήγορα ενσωματώθηκε στις έρευνες και το στάδιο της παραγωγής. Οι πρώτες εφαρμογές που καταγράφηκαν αφορούσαν τον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής και της ιατρικής. Η μελέτη τέτοιων εφαρμογών κυριαρχεί ακόμα και σήμερα στη βιβλιογραφία. Προφανώς, η υπεροχή της προσθετικής κατασκευής έναντι των αφαιρετικών μεθόδων παραγωγής είναι περισσότερο εμφανής στις περιπτώσεις κατασκευής περίπλοκων γεωμετριών. Επίσης, η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την αξιοποίηση των εργαλείων βελτιστοποίησης της τοπολογίας, τα οποία χρησιμοποιούνται στο στάδιο του σχεδιασμού για τη δημιουργία κατασκευών υψηλών επιδόσεων, εξοικονομώντας παράλληλα ενέργεια και υλικά. Γνωρίζοντας, λοιπόν, ότι στους προαναφερθέντες κλάδους χρησιμοποιούνται κατά κόρον εξαρτήματα περίπλοκων γεωμετριών και όσο το δυνατό χαμηλότερου βάρους, είναι λογικό να δίνεται περισσότερη έμφαση εκεί.

Σταδιακά, άρχισαν να αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, οι οποίες αν και είχαν την ίδια αρχή λειτουργίας, διέφεραν ως προς τον τρόπο σχηματισμού των στρωμάτων, τα χρησιμοποιούμενα υλικά και τις ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων. Μάλιστα, αρκετές μελέτες έχουν εξετάσει τη χρήση συγκεκριμένης τεχνολογίας σε συγκεκριμένη εφαρμογή. Γενικά, οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες είναι η εξώθηση υλικού λόγω της υψηλής ταχύτητας και του χαμηλού κόστους, και η στερεολιθογραφία και η σύντηξη πούδρας σε κλίση λόγω της υψηλής ακρίβειας και της ποιότητας επιφανειών. Βέβαια, το είδος της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εκάστοτε εφαρμογή.

Η διεύθυνση της προσθετικής κατασκευής σε νέους κλάδους (π.χ. είδη υπόδησης, ηλεκτρονικά είδη, έργα υποδομής), οι οποίοι χαρακτηρίζονταν από μεγάλους όγκους παραγωγής ή μεγάλους όγκους προϊόντων, υπογράμμισε δύο από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής, το κόστος και τον χρόνο εκτύπωσης. Αδιαμφισβήτητα, η τρισδιάστατη εκτύπωση ενδείκνυται για εφαρμογές σε αγορές που χαρακτηρίζονται από τη

χαμηλού όγκου παραγωγή εξατομικευμένων (π.χ. εμφυτεύματα), μικρών διαστάσεων και περίπλοκης γεωμετρίας προϊόντων, η ζήτηση των οποίων είναι δύσκολο να προβλεφθεί (π.χ. βιομηχανικά εξαρτήματα και ανταλλακτικά παλιών προϊόντων, που όμως χρησιμοποιούνται ακόμα). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ικανότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας να παράγει προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις των πελατών προϊόντα απλά τροποποιώντας τα αρχεία σχεδιασμού, χωρίς την οικονομική επιβάρυνση και τη χρονική καθυστέρηση που προκαλεί η ανάπτυξη ειδικά σχεδιασμένων εργαλείων και καλουπιών. Η υιοθέτηση όμως της προσθετικής κατασκευής στην περίπτωση της μαζικής παραγωγής οδηγεί σε αύξηση του χρόνου και του κόστους παραγωγής. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το υψηλό κόστος της παραγωγής οφείλεται στο υψηλό κόστος των υλικών και του εξοπλισμού και στην αδυναμία επίτευξης οικονομικών κλίμακας λόγω της χαμηλής ταχύτητας εκτύπωσης. Αρκετές μελέτες έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη μοντέλων κόστους και την εύρεση του νεκρού σημείου σε μονάδες παραγόμενου προϊόντος, άνω του οποίου οι συμβατικές μέθοδοι είναι οικονομικά πιο συμφέρουσες. Η κατανάλωση υλικών και ενέργειας έχει μελετηθεί σε ακόμα μεγαλύτερη έκταση στο πλαίσιο τόσο της οικονομικής όσο και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης της αποδοτικότητας ως προς την κατανάλωση ενέργειας και υλικών εξαρτάται από τις διαστάσεις και το ποσοστό σε κοιλότητες των προϊόντων. Ωστόσο, στις μελέτες αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη όλες οι θετικές επιδράσεις που έχει η προσθετική κατασκευή σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων (π.χ. μείωση κατανάλωσης καυσίμων αεροσκάφους λόγω χρήσης ελαφρύτερων εξαρτημάτων).

Βάσει της βιβλιογραφικής έρευνας που έγινε, συμπεραίνεται ότι η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης εξετάζεται κυρίως σε επίπεδο σχεδιασμού – παραγωγής και όχι στο πλαίσιο ενός ευρύτερου συστήματος, που να περιλαμβάνει ολόκληρη την αλυσίδα αξίας. Σίγουρα, οι μεγαλύτερες αλλαγές εντοπίζονται στο στάδιο του σχεδιασμού και της παραγωγής. Ωστόσο η υιοθέτηση της προσθετικής κατασκευής από μια βιομηχανία προκαλεί «αλυσιδωτές αντιδράσεις». Η αποθήκευση των προϊόντων σε ψηφιακά αρχεία, τα οποία τροποποιούνται και μεταφέρονται εύκολα, η απουσία εργαλείων, η ολοκλήρωση της εκτύπωσης σε ένα στάδιο χωρίς την ανάγκη για προμήθεια, μεταφορά και αποθήκευση πολλών διαφορετικών ενδιάμεσων εξαρτημάτων, απλοποιούν και καθιστούν πιο ευέλικτες τις αλυσίδες τροφοδοσίας, καθώς μειώνουν τον αριθμό των προμηθευτών και παρέχουν τη δυνατότητα κατανεμημένης και κατά παραγγελία παραγωγής. Η δυνατότητα αυτή οδηγεί με τη σειρά της στη μείωση των μεταφορών και στην εξάλειψη της ανάγκης διατήρησης φυσικών αποθεμάτων. Όλα τα παραπάνω αναλύονται στη βιβλιογραφία σε θεωρητικό επίπεδο και δεν υπάρχουν εμπειρικές μελέτες που να μπορούν να τα επιβεβαιώσουν, εξετάζοντας τη συνολική επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εφοδιαστική αλυσίδα. Για τον λόγο αυτό δεν περιλαμβάνονται και στα μοντέλα κόστους και ενέργειας οι αντίστοιχες εξοικονομήσεις που επιτυγχάνονται χάρη στη μείωση των μεταφορών και του αριθμού των αποθεμάτων. Από την άλλη πλευρά, η μικρής κλίμακας εφαρμογή της τεχνολογίας και η ύπαρξη εμποδίων που σχετίζονται άμεσα με το στάδιο της παραγωγής και άρα προέχει να αντιμετωπιστούν, δικαιολογούν την κατάσταση αυτή. Όσον αφορά στα εμπόδια, τα κυριότερα είναι η χαμηλή ποιότητα επιφανειών, οι υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες, η περιορισμένη διαθεσιμότητα υλικών και η έλλειψη προτύπων. Βέβαια, γίνονται αρκετές προσπάθειες τόσο για τη βελτίωση των υφιστάμενων 3D συστημάτων εκτύπωσης, όσο και για την ανάπτυξη νέων υλικών και προτύπων.

Συνοψίζοντας, οι κύριες κατευθύνσεις στις οποίες κινείται η υπάρχουσα βιβλιογραφία είναι η σύγκριση των διαφορετικών τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής, βάσει των ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων και των εγγενών χαρακτηριστικών τους, και η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας, βάσει των δεδομένων που αντλούνται από το στάδιο της παραγωγής. Η επίδραση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην εφοδιαστική αλυσίδα είναι ένα θέμα που έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια, αλλά δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς. Η συλλογή στοιχείων από ποιοτικές και ποσοτικές έρευνες, οι οποίες θα αξιολογούν την επίδραση της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε ολόκληρη την αλυσίδα τροφοδοσίας, θα βοηθήσει όχι μόνο στην ανάδειξη των πραγματικών δυνατοτήτων και αδυναμιών που η υιοθέτησή της

συνεπάγεται, αλλά και στη διερεύνηση των παρακάτω ερωτημάτων, η απάντηση των οποίων θα διευκολύνει τη λήψη, διαφορετικών για την κάθε βιομηχανία, αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε αυτή:

- Ποιοι κλάδοι μπορούν να επωφεληθούν από την υιοθέτηση της τεχνολογίας
- Σε ποιες περιπτώσεις προτείνεται η εξωτερική ανάθεση του σχεδιασμού ή της εκτύπωσης
- Σε ποιες περιπτώσεις ενδείκνυται η λειτουργία του υβριδικού μοντέλου προσθετικής/αφαιρετικής κατασκευής και πώς αυτό μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς (π.χ. αξιοποίηση AM για παραγωγή προϊόντων ασταθούς ζήτησης, όπως είναι τα ανταλλακτικά ή τα προϊόντα στην αρχή του κύκλου ζωής, και χρήση συμβατικών τεχνολογιών για προϊόντα σταθερής ζήτησης)
- Ποια είναι η κατάλληλη στιγμή υιοθέτησης της τεχνολογίας δεδομένου ότι ακόμα εξελίσσεται
- Ποιο το κόστος μετάβασης από την αφαιρετική στην προσθετική κατασκευή, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σε ανθρώπινο δυναμικό και ICT συστήματα, καθώς και την ανάγκη συνεργασίας με νέους προμηθευτές, κέντρα αποθήκης και διανομής

Τέλος, αν και κατά την ολοκλήρωση του κάθε κεφαλαίου δίνονται αναλυτικά προτάσεις για μελλοντική έρευνα, κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο, να παρουσιαστούν οι σημαντικότερες εξ αυτών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, παρόλο που το επίκεντρο των βιβλιογραφικών ερευνών είναι η διεργασία της εκτύπωσης αυτής καθαυτής, οι ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων δεν είναι πάντα οι επιθυμητές. Η μείωση του χάσματος μεταξύ επιθυμητών και πραγματικών ιδιοτήτων προϋποθέτει την πλήρη κατανόηση του μηχανισμού επίδρασης των χαρακτηριστικών της εκάστοτε τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, των παραμέτρων της εκτύπωσης και των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών στις τελικές ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων. Προς την κατεύθυνση αυτή θα συμβάλει τόσο η διεξαγωγή συστηματικών πειραματικών μελετών όσο και η χρήση εργαλείων προσομοίωσης. Η ανάπτυξη μοντέλων μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων, τα οποία θα τροφοδοτούνται από δεδομένα που θα λαμβάνονται μέσω συσκευών IIoT, κατά την παρακολούθηση και τον έλεγχο, καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης, της ποιότητας των προϊόντων, αποτελεί μια ακόμα πρόταση για περαιτέρω έρευνα. Η εφαρμογή της πρότασης αυτής θα είναι μάλιστα ιδιαίτερα επωφελής για τις εταιρίες παροχής υπηρεσιών τρισδιάστατης εκτύπωσης, λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που διαθέτουν.

Δεδομένης της περιορισμένης ποικιλίας υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης και της έλλειψης εκτυπωτών, που είναι συμβατά με περισσότερα του ενός υλικά, προτείνεται οι μελλοντικές έρευνες να εστιάσουν όχι μόνο στην ανάπτυξη νέων υλικών, αλλά και στην τροποποίηση και βελτίωση των υπαρχόντων τεχνολογιών και εξοπλισμών προσθετικής κατασκευής, ώστε να μπορούν να επεξεργάζονται υλικά διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται και για την αντιμετώπιση ενός από τους σημαντικότερους περιορισμούς της προσθετικής κατασκευής, της έλλειψης δηλαδή ολοκληρωμένων και ευρέως αποδεκτών προτύπων, τα οποία θα συμβάλουν στη διασφάλιση της σταθερής ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ανάπτυξη προτύπων για το στάδιο του σχεδιασμού, στον οποίο έγκεινται και οι κύριες διαφορές μεταξύ των μεθόδων προσθετικής και αφαιρετικής κατασκευής.

Ένα ακόμη πεδίο που χρήζει περαιτέρω έρευνας είναι η ανάπτυξη μοντέλων, στα οποία θα συμπεριλαμβάνεται η εξοικονόμηση ενέργειας και υλικών που επιτυγχάνεται χάρη στη μείωση των αποθεμάτων και των μεταφορών, καθώς και η θετική επίδραση που έχει η δυνατότητα βελτιστοποίησης της τοπολογίας κατά τη φάση χρήσης των προϊόντων. Με τον τρόπο αυτό θα σχηματιστεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της προσθετικής κατασκευής. Αντίστοιχα, στα μοντέλα κόστους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη

όχι μόνο τα κόστη της διεργασίας της εκτύπωσης, αλλά και όσα προκύπτουν από δραστηριότητες σε όλο το μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Ιδιαίτερη σημαντική για την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας είναι επίσης η προσπάθεια ανάπτυξης μεθόδων επεξεργασίας και ανακύκλωσης των μη χρησιμοποιούμενων στην εκτύπωση υλικών, καθώς και των τελικών προϊόντων της, προκειμένου αυτά να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά, χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των νέων παραγόμενων προϊόντων.

Επιπλέον, δεδομένης της υψηλής εξάρτησης από τον περιορισμένο αριθμό των προμηθευτών υλικών και συνεπώς της αυξημένης «ευαλωτότητας» της εφοδιαστικής αλυσίδας απέναντι σε οποιαδήποτε μεταβολή σχετίζεται με τη συνεργασία αυτή, προτείνεται η εξέταση της περίπτωσης παραγωγής των συγκεκριμένων υλικών εντός των εγκαταστάσεων των κατασκευαστών.

Μια τελευταία πρόταση, που πιθανώς να διευκολύνει τη διείσδυση της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε περισσότερους κλάδους και εφαρμογές, είναι η ανάπτυξη και η μελέτη του υβριδικού μοντέλου προσθετικής – αφαιρετικής κατασκευής, μέσω του οποίου θα αξιοποιούνται οι δυνατότητες και θα μετριάζονται τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η κάθε μέθοδος μεμονωμένα.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, *11*, 1687814018822880.
- Achillas, C., Aidonis, D., Iakovou, E., Thymianidis, M., & Tzetzis, D. (2015). A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory. *Journal of manufacturing Systems*, *37*, 328-339.
- Achillas, C., Tzetzis, D., & Raimondo, M. O. (2017). Alternative production strategies based on the comparison of additive and traditional manufacturing technologies. *International Journal of Production Research*, *55*, 3497-3509.
- Ahn, D. G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *8*, 703-742.
- Alkaabi, N., Salah, K., Jayaraman, R., Arshad, J., & Omar, M. (2020). Blockchain-based traceability and management for additive manufacturing. *IEEE access*, *8*, 188363-188377.
- Arena, F., Collotta, M., Pau, G., & Termine, F. (2022). An Overview of Augmented Reality. *Computers*, *11*, 28.
- Arena, M., Ciceri, N. D., Terzi, S., Bengo, I., Azzone, G., & Garetti, M. (2009). A state-of-the-art of industrial sustainability: definitions, tools and metrics. *International Journal of Product Lifecycle Management*, *4*, 207-251.
- Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S. K., & Singh, S. (2021). Automation and manufacturing of smart materials in Additive Manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 5081-5088.
- Attaran, M. (2017). Additive manufacturing: the most promising technology to alter the supply chain and logistics. *Journal of Service Science and Management*, *10*, 189.
- Atzeni, E., & Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-useable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *62*, 1147-1155.
- Bahl, S. (2021). Fiber reinforced metal matrix composites-a review. *Materials Today: Proceedings*, *39*, 317-323.
- Ballantyne, K. N., Van Oorschot, R. A., & Mitchell, R. J. (2008). Reduce optimisation time and effort: Taguchi experimental design methods. *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, *1*, 7-8.
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., & Hague, R. (2016). The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological forecasting and social change*, *102*, 193-201.
- Baumers, M., & Holweg, M. (2019). On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. *Journal of Operations Management*, *65*, 794-809.

- Baumers, M., Tuck, C., Hague, R., Ashcroft, I., & Wildman, R. (2010, September). A comparative study of metallic additive manufacturing power consumption. In *2010 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- Belhadi, A., Kamble, S. S., Venkatesh, M., Jabbour, C. J. C., & Benkhati, I. (2022). Building supply chain resilience and efficiency through additive manufacturing: An ambidextrous perspective on the dynamic capability view. *International Journal of Production Economics*, *249*, 108516.
- Beltagui, A., Kunz, N., & Gold, S. (2020). The role of 3D printing and open design on adoption of socially sustainable supply chain innovation. *International Journal of Production Economics*, *221*, 107462.
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2021). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... & du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, *209*, 110008.
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, *66*, 659-681.
- Bozkurt, Y., & Karayel, E. (2021). 3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends. *Journal of Materials Research and Technology*, *14*, 1430-1450.
- Bragança, S., Costa, E., Castellucci, I., & Arezes, P. M. (2019). A brief overview of the use of collaborative robots in industry 4.0: human role and safety. *Occupational and environmental safety and health*, 641-650.
- Bravi, L., Murmura, F., & Santos, G. (2019). Additive manufacturing: possible problems with indoor air quality. *Procedia Manufacturing*, *41*, 952-959.
- Brown, A., Yampolskiy, M., Gatlin, J., & Andel, T. (2016, March). Legal aspects of protecting intellectual property in additive manufacturing. In *International Conference on Critical Infrastructure Protection* (pp. 63-79). Springer, Cham.
- Brozzi, R., Forti, D., Rauch, E., & Matt, D. T. (2020). The advantages of industry 4.0 applications for sustainability: Results from a sample of manufacturing companies. *Sustainability*, *12*, 3647.
- Butt, J. (2020). Exploring the interrelationship between additive manufacturing and Industry 4.0. *Designs*, *4*, 13.
- Byard, D. J., Woern, A. L., Oakley, R. B., Fiedler, M. J., Snabes, S. L., & Pearce, J. M. (2019). Green fab lab applications of large-area waste polymer-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, *27*, 515-525.
- Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Automation in construction*, *89*, 110-119.
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., & Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia tools and applications*, *51*, 341-377.

- Caviggioli, F., & Ughetto, E. (2019). A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society. *International journal of production economics*, 208, 254-268.
- Chadha, K., Tian, Y., Spray, J. G., & Aranas Jr, C. (2020). Effect of annealing heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of hot isostatic pressed 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion. *Metals*, 10, 753.
- Chakraborty, S., & Biswas, M. C. (2020). 3D printing technology of polymer-fiber composites in textile and fashion industry: A potential roadmap of concept to consumer. *Composite Structures*, 248, 112562.
- Chan, H. K., Griffin, J., Lim, J. J., Zeng, F., & Chiu, A. S. (2018). The impact of 3D Printing Technology on the supply chain: Manufacturing and legal perspectives. *International Journal of Production Economics*, 205, 156-162.
- Chen, H., & Zhao, Y. F. (2016). Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process. *Rapid Prototyping Journal*, 22, 527-538.
- Chen, Y. (2017). Integrated and intelligent manufacturing: perspectives and enablers. *Engineering*, 3, 588-595.
- Chohan, J. S., & Singh, R. (2017). Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. *Rapid Prototyping Journal*.
- Choudhury, D., Anand, S., & Naing, M. W. (2018). The arrival of commercial bioprinters—Towards 3D bioprinting revolution!. *International Journal of Bioprinting*, 4.
- Chowdhury, S., Shahvari, O., Marufuzzaman, M., Francis, J., & Bian, L. (2019). Sustainable design of on-demand supply chain network for additive manufacturing. *Ijse Transactions*, 51, 744-765.
- Chua, C. K., Wong, C. H., & Yeong, W. Y. (2017). *Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing*. Academic Press.
- Colorado, H. A., Velásquez, E. I. G., & Monteiro, S. N. (2020). Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 8221-8234.
- Corallo, A., Lazoi, M., & Lezzi, M. (2020). Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts. *Computers in industry*, 114, 103165.
- Costabile, G., Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A., & Pham, D. (2017). Cost models of additive manufacturing: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8, 263-283.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 204, 383-394.
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., & De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868.

- Devagiri, J. S., Paheding, S., Niyaz, Q., Yang, X., & Smith, S. (2022). Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges. *Expert Systems with Applications*, 118002.
- Diegel, O., Singamneni, S., Huang, B., & Gibson, I. (2011). Curved layer fused deposition modeling in conductive polymer additive manufacturing. In *Advanced Materials Research* (Vol. 199, pp. 1984-1987). Trans Tech Publications Ltd.
- Ding, J., Baumers, M., Clark, E. A., & Wildman, R. D. (2021). The economics of additive manufacturing: Towards a general cost model including process failure. *International Journal of Production Economics*, 237, 108087.
- Dodziuk, H. (2016). Applications of 3D printing in healthcare. *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska/Polish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 13, 283-293.
- Dörfler, K., Dielemans, G., Lachmayer, L., Recker, T., Raatz, A., Lowke, D., & Gerke, M. (2022). Additive Manufacturing using mobile robots: Opportunities and challenges for building construction. *Cement and Concrete Research*, 158, 106772.
- Dou, R., Tang, W., Hu, K., & Wang, L. (2022). Ceramic paste for space stereolithography 3D printing technology in microgravity environment. *Journal of the European Ceramic Society*, 42, 3968-3975.
- Du, W., Ren, X., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Ceramic binder jetting additive manufacturing: a literature review on density. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142, 040801.
- Durakovic, B. (2018). Design for additive manufacturing: Benefits, trends and challenges. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 6, 179-191.
- Eiriksson, E. R., Pedersen, D. B., Frisvad, J. R., Skovmand, L., Heun, V., Maes, P., & Aanæs, H. (2017, June). Augmented reality interfaces for additive manufacturing. In *Scandinavian Conference on Image Analysis* (pp. 515-525). Springer, Cham.
- Elakkad, A. S. (2019). 3D technology in the automotive industry. *Int. J. Eng. Tech. Res*, 8, 248-251.
- Espera, A. H., Dizon, J. R. C., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2019). 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 245-267.
- Eyers, D. R., Potter, A. T., Gosling, J., & Naim, M. M. (2018). The flexibility of industrial additive manufacturing systems. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., & Iribarne, M. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner Production*, 137, 1573-1587.
- Fragapane, G., Ivanov, D., Peron, M., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2022). Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. *Annals of operations research*, 308, 125-143.

- Franchetti, M., & Kress, C. (2017). An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 2573-2579.
- Georgios, L., Kerstin, S., & Theofylaktos, A. (2019). Internet of things in the context of industry 4.0: An overview.
- Ghimire, T., Joshi, A., Sen, S., Kapruan, C., Chadha, U., & Selvaraj, S. K. (2022). Blockchain in additive manufacturing processes: recent trends & its future possibilities. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2170-2180.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Development of additive manufacturing technology. In *Additive manufacturing technologies* (pp. 23-51). Springer, Cham.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., ... & Khorasani, M. (2021). Sheet lamination. *Additive Manufacturing Technologies*, 253-283.
- Goel, R., & Gupta, P. (2020). Robotics and industry 4.0. *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development*, 157-169.
- Goldin, E., Feldman, D., Georgoulas, G., Castano, M., & Nikolakopoulos, G. (2017, July). Cloud computing for big data analytics in the Process Control Industry. In *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 1373-1378). IEEE.
- Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A. (2021). The state of the art of material jetting—a critical review. *Polymers*, 13, 2829.
- Gupta, N., Tiwari, A., Bukkapatnam, S. T., & Karri, R. (2020). Additive manufacturing cyber-physical system: Supply chain cybersecurity and risks. *IEEE Access*, 8, 47322-47333.
- Haghighat Khajavi, S., Flores Ituarte, I., Jaribion, A., An, J., Chee Kai, C., & Holmstrom, J. (2020). Impact of additive manufacturing on supply chain complexity.
- Heinen, J. J., & Hoberg, K. (2019). Assessing the potential of additive manufacturing for the provision of spare parts. *Journal of Operations Management*, 65, 810-826.
- Haleem, A., & Javaid, M. (2019). Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 4, 1930001.
- Hohn, M. M., & Durach, C. F. (2021). Additive manufacturing in the apparel supply chain—impact on supply chain governance and social sustainability. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Holland, M., Stjepandić, J., & Nigischer, C. (2018, June). Intellectual property protection of 3D print supply chain with blockchain technology. In *2018 IEEE International conference on engineering, technology and innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-8). IEEE.
- Hsiang Loh, G., Pei, E., Gonzalez-Gutierrez, J., & Monzón, M. (2020). An overview of material extrusion troubleshooting. *Applied Sciences*, 10, 4776.
- Hu, J. (2017). Study on STL-based slicing process for 3D printing. In *2017 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.

- Ingarao, G., & Priarone, P. C. (2020). A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive-and subtractive-based manufacturing approaches. *Journal of Manufacturing Processes*, *56*, 1219-1229.
- Jain, P. A. K., Sattar, S., Mulqueen, D., Pedrazzoli, D., Kravchenko, S. G., & Kravchenko, O. G. (2022). Role of annealing and isostatic compaction on mechanical properties of 3D printed short glass fiber nylon composites. *Additive Manufacturing*, *51*, 102599.
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design (1980-2015)*, *56*, 1078-1113.
- Janvier-James, A. M. (2012). A new introduction to supply chains and supply chain management: Definitions and theories perspective. *International Business Research*, *5*, 194-207.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2021). Significant applications of big data in Industry 4.0. *Journal of Industrial Integration and Management*, *6*, 429-447.
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2019). Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *59*, 317-325.
- Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., Espinosa, M. D. M., & Domínguez, M. (2019). Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects. *Complexity*, *2019*.
- Kalender, M., Kılıç, S. E., Ersoy, S., Bozkurt, Y., & Salman, S. (2019, June). Additive manufacturing and 3D printer technology in aerospace industry. In *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 689-694). IEEE.
- Kamran, M., & Saxena, A. (2016). A comprehensive study on 3D printing technology. *MIT Int J Mech Eng*, *6*, 63-69.
- Karwasz, A., & Osinski, F. (2020). Literature review on emissions from additive manufacturing by FDM method and their impact on human health. *Management and Production Engineering Review*.
- Kawalkar, R., Dubey, H. K., & Lokhande, S. P. (2022). A review for advancements in standardization for additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, *50*, 1983-1990.
- Khajavi, S. H., Partanen, J., & Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in industry*, *65*, 50-63.
- Khalid, H., Hashim, S. J., Ahmad, S., Hashim, F., & Chaudary, M. A. (2020). Cybersecurity in Industry 4.0 context: Background, issues, and future directions. *The nine pillars of technologies for industry*, *4*, 263-307.
- Khan, M., Wu, X., Xu, X., & Dou, W. (2017, May). Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Khorasani, M., Ghasemi, A., Rolfe, B., & Gibson, I. (2021). Additive manufacturing a powerful tool for the aerospace industry. *Rapid prototyping journal*.
- Khosravani, M. R., & Reinicke, T. (2020). On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today*, *20*, 100689.

- Kim, H., Lin, Y., & Tseng, T. L. B. (2018). A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*.
- Konda Gokuldoss, P., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—Selection guidelines. *materials*, *10*, 672.
- Knofius, N., van der Heijden, M. C., & Zijm, W. H. (2019). Consolidating spare parts for asset maintenance with additive manufacturing. *International journal of production economics*, *208*, 269-280.
- Kumar, A. (2018). Methods and materials for smart manufacturing: additive manufacturing, internet of things, flexible sensors and soft robotics. *Manufacturing Letters*, *15*, 122-125.
- Kumar, S., Choudhary, A. K. S., Singh, A. K., & Gupta, A. K. (2016). A comparison of additive manufacturing technologies. *Int. J. Innov. Res. Sci. Technol*, *3*, 147-152.
- Kunovjanek, M., Knofius, N., & Reiner, G. (2022). Additive manufacturing and supply chains—a systematic review. *Production Planning & Control*, *33*, 1231-1251.
- Kurpjuweit, S., Schmidt, C. G., Klöckner, M., & Wagner, S. M. (2021). Blockchain in additive manufacturing and its impact on supply chains. *Journal of Business Logistics*, *42*, 46-70.
- Lacroix, R., Seifert, R. W., & Timonina-Farkas, A. (2021). Benefiting from additive manufacturing for mass customization across the product life cycle. *Operations Research Perspectives*, *8*, 100201.
- Lakhdar, Y., Tuck, C., Binner, J., Terry, A., & Goodridge, R. (2021). Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, *116*, 100736.
- Lee, J. Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied materials today*, *7*, 120-133.
- Li, X., Jia, X., Yang, Q., & Lee, J. (2020). Quality analysis in metal additive manufacturing with deep learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *31*, 2003-2017.
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, *69*, 83-94.
- Longhitano, G. A., Nunes, G. B., Candido, G., & da Silva, J. V. L. (2021). The role of 3D printing during COVID-19 pandemic: a review. *Progress in additive manufacturing*, *6*, 19-37.
- Lundstedt, T., Seifert, E., Abramo, L., Thelin, B., Nyström, Å., Pettersen, J., & Bergman, R. (1998). Experimental design and optimization. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, *42*, 3-40.
- Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2016). Achieving mass customization through additive manufacturing. In *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future* (pp. 385-390). Springer, Cham.
- Majeed, A., Zhang, Y., Ren, S., Lv, J., Peng, T., Waqar, S., & Yin, E. (2021). A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *67*, 102026.

- Maresch, D., & Gartner, J. (2020). Make disruptive technological change happen-The case of additive manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, *155*, 119216.
- Mehrpouya, M., Tuma, D., Vaneker, T., Afrasiabi, M., Bambach, M., & Gibson, I. (2022). Multimaterial powder bed fusion techniques. *Rapid prototyping journal*.
- Maleki, E., Bagherifard, S., Bandini, M., & Guagliano, M. (2021). Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities. *Additive Manufacturing*, *37*, 101619.
- Mandolla, C., Petruzzelli, A. M., Percoco, G., & Urbinati, A. (2019). Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: A case analysis of the aircraft industry. *Computers in industry*, *109*, 134-152.
- Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International journal of production economics*, *149*, 194-201.
- Modrić, D., Kovačić, I., & Cviljušac, V. (2020). Anisotropic mechanical properties of materials in stereolithographic additive manufacturing. *Tehnički vjesnik*, *27*, 1748-1753.
- Monzón, M. D., Ortega, Z., Martínez, A., & Ortega, F. (2015). Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. *The international journal of advanced manufacturing technology*, *76*, 1111-1121.
- Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., ... & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, *119*, 100707.
- Moroni, G., Petrò, S., & Shao, H. (2020). On standardization efforts for additive manufacturing. In *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing* (pp. 156-172). Springer, Cham.
- Nachal, N., Moses, J. A., Karthik, P., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Applications of 3D printing in food processing. *Food Engineering Reviews*, *11*, 123-141.
- Naghshineh, B., & Carvalho, H. (2021). The implications of additive manufacturing technology adoption for supply chain resilience: A systematic search and review. *International Journal of Production Economics*, 108387.
- Naghshineh, B., Ribeiro, A., Jacinto, C., & Carvalho, H. (2021). Social impacts of additive manufacturing: A stakeholder-driven framework. *Technological Forecasting and Social Change*, *164*, 120368.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, *143*, 172-196.
- Niaki, M. K., & Nonino, F. (2017). Impact of additive manufacturing on business competitiveness: a multiple case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Niaki, M. K., Torabi, S. A., & Nonino, F. (2019). Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability. *Journal of cleaner production*, *222*, 381-392.

- Ntintakis, I., Stavroulakis, G. E., & Plakia, N. (2020). Topology optimization by the use of 3D printing technology in the product design process. *HighTech and Innovation Journal*, *1*, 161-171.
- Nyman, H. J., & Sarlin, P. (2014, January). From bits to atoms: 3D printing in the context of supply chain strategies. In *2014 47th Hawaii international conference on system sciences* (pp. 4190-4199). IEEE.
- O'Connor, D., & Kennedy, J. (2021). An evaluation of 3D printing for the manufacture of a binaural recording device. *Applied Acoustics*, *171*, 107610.
- Oke, A. (2005). A framework for analysing manufacturing flexibility. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Oleff, A., Küster, B., Stonis, M., & Overmeyer, L. (2021). Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: a state-of-the-art review. *Progress in Additive Manufacturing*, *6*, 705-730.
- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q. P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing. *Polymers*, *13*, 598.
- Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive manufacturing*, *30*, 100894.
- Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M., & Ituarte, I. F. (2016). Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, *65*, 29-32.
- Peng, T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C., & Chen, G. (2018). Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing*, *21*, 694-704.
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, *13*, 1206-1214.
- Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, *30*, 11-18.
- Ponis, S., Aretoulaki, E., Maroutas, T. N., Plakas, G., & Dimogiorgi, K. (2021). A systematic literature review on additive manufacturing in the context of circular economy. *Sustainability*, *13*, 6007.
- Pour, M. A., Zanardini, M., Bacchetti, A., & Zanoni, S. (2016). *IFAC-PapersOnLine*, *49*, 1679-1684.
- Prakash, C., Singh, S., Kopperi, H., Ramakrihna, S., & Mohan, S. V. (2021). Comparative job production based life cycle assessment of conventional and additive manufacturing assisted investment casting of aluminium: A case study. *Journal of Cleaner Production*, *289*, 125164.
- Prashar, G., Vasudev, H., & Bhuddhi, D. (2022). Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-15.

- Pravin, S., & Sudhir, A. (2018). Integration of 3D printing with dosage forms: A new perspective for modern healthcare. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *107*, 146-154.
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability science*, *14*, 681-695.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2017). A framework of energy consumption modelling for additive manufacturing using internet of things. *Procedia CIRP*, *63*, 307-312.
- Rahman, M.A. *et al.* (2022) "A cloud-based cyber-physical system with industry 4.0: Remote and digitized additive manufacturing," *Automation*, *3*, pp. 400–425.
- Raina, A., Haq, M. I. U., Javaid, M., Rab, S., & Haleem, A. (2021). 4D printing for automotive industry applications. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, *102*, 521-529.
- Al Rashid, A., Khan, S. A., Al-Ghamdi, S. G., & Koc, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*, *118*, 103268.
- Rashid, A., & Chaturvedi, A. (2019). Cloud computing characteristics and services: a brief review. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, *7*, 421-426.
- 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.
- Rejeb, A., Rejeb, K., Keogh, J. G., & Zailani, S. (2022). Barriers to Blockchain Adoption in the Circular Economy: A Fuzzy Delphi and Best-Worst Approach. *Sustainability*, *14*, 3611.
- Rejeski, D., Zhao, F., & Huang, Y. (2018). Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, *19*, 21-28.
- Rodič, B. (2017). Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, *50*, 193.
- Rogers, H., Baricz, N., & Pawar, K. S. (2016). 3D printing services: classification, supply chain implications and research agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- Rosochowski, A., & Matuszak, A. (2000). Rapid tooling: the state of the art. *Journal of materials processing technology*, *106*, 191-198.
- Ruffo, M., Tuck, C., & Hague, R. (2006). Cost estimation for rapid manufacturing-laser sintering production for low to medium volumes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *220*, 1417-1427.
- Ruiz, L. E., Pinho, A. C., & Resende, D. N. (2022). 3D Printing as a Disruptive Technology for the Circular Economy of Plastic Components of End-of-Life Vehicles: A Systematic Review. *Sustainability*, *14*, 13256.
- Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2019). Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*, *9*, 3316.
- Sacco, E., & Moon, S. K. (2019). Additive manufacturing for space: status and promises. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *105*, 4123-4146.

- Sarvankar, S. G., & Yewale, S. N. (2019). Additive manufacturing in automobile industry. *Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng*, 7, 1-10.
- Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites—a review. *Journal of reinforced plastics and composites*, 33, 1258-1275.
- Savolainen, J., & Collan, M. (2020). How additive manufacturing technology changes business models?—review of literature. *Additive manufacturing*, 32, 101070.
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296.
- Sharma, A., & Pandey, H. (2020). Big data and analytics in industry 4.0. In *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development* (pp. 57-72). Springer, Cham.
- Sharma, N., Raj, T., & Jangra, K. (2015). Applications of nickel-titanium alloy. *Journal of Engineering and Technology*, 5, 1.
- Singh, D. D., Mahender, T., & Reddy, A. R. (2021). Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 350-355.
- Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., ... & Saxena, K. K. (2020). Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3058-3070.
- Singh, T., Kumar, S., & Sehgal, S. (2020). 3D printing of engineering materials: A state of the art review. *Materials today: proceedings*, 28, 1927-1931.
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185-200.
- Sitotaw, D. B., Ahrendt, D., Kyosev, Y., & Kabish, A. K. (2020). Additive manufacturing and textiles—state-of-the-art. *Applied Sciences*, 10, 5033.
- Somapa, S., Cools, M., & Dullaert, W. (2018). Characterizing supply chain visibility—a literature review. *The International Journal of Logistics Management*.
- Spahiu, T., Canaj, E., & Shehi, E. (2020). 3D printing for clothing production. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 1558925020948216.
- Sreejith, M., & Rajeev, R. S. (2021). Fiber reinforced composites for aerospace and sports applications. In *Fiber Reinforced Composites* (pp. 821-859). Woodhead Publishing.
- Suwanpreecha, C., & Manonukul, A. (2022). A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding. *Metals*, 12, 429.
- Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., & Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295.
- Szymczyk-Ziółkowska, P., Łabowska, M. B., Detyna, J., Michalak, I., & Gruber, P. (2020). A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40, 624-638.

- Tan, H. W., Choong, Y. Y. C., Kuo, C. N., Low, H. Y., & Chua, C. K. (2022). 3D printed electronics: Processes, materials and future trends. *Progress in Materials Science*, 100945.
- Tareq, M. S., Rahman, T., Hossain, M., & Dorrington, P. (2021). Additive manufacturing and the COVID-19 challenges: An in-depth study. *Journal of Manufacturing systems*, 60, 787-798.
- Tay, S. I., Lee, T. C., Hamid, N. Z. A., & Ahmad, A. N. A. (2018). An overview of industry 4.0: Definition, components, and government initiatives. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 10, 1379-1387.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia cirp*, 52, 12-17.
- Thomas, D. S., & Gilbert, S. W. (2014). Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. *NIST special publication*, 1176, 12.
- Thomas, D. (2016). Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1857-1876.
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ... & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*, 65, 737-760.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21, 22-37.
- Tosello, G., Charalambis, A., Kerbache, L., Mischkot, M., Pedersen, D. B., Calaon, M., & Hansen, H. N. (2019). Value chain and production cost optimization by integrating additive manufacturing in injection molding process chain. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 783-795.
- Unal, R., & Dean, E. B. (1990, January). Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview. In *1991 Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts*.
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*, 11, 1213.
- Vanderploeg, A., Lee, S. E., & Mamp, M. (2017). The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10, 170-179.
- Verboeket, V., & Krikke, H. (2019). The disruptive impact of additive manufacturing on supply chains: A literature study, conceptual framework and research agenda. *Computers in Industry*, 111, 91-107.
- Vock, S., Klöden, B., Kirchner, A., Weißgärber, T., & Kieback, B. (2019). Powders for powder bed fusion: a review. *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 383-397.
- Watson, J. K., & Taminger, K. M. B. (2018). A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1316-1322.

Weller, C., Kleer, R., & Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics*, 164, 43-56.

Wohlers, T., & Gornet, T. (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24, 118.

Wu, H. C., & Chen, T. C. T. (2018). Quality control issues in 3D-printing manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 24, 607-614.

Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., ... & Du, S. (2021). Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104115.

Yampolskiy, M., Schutzle, L., Vaidya, U., & Yasinsac, A. (2015, March). Security challenges of additive manufacturing with metals and alloys. In *International Conference on Critical Infrastructure Protection* (pp. 169-183). Springer, Cham.

Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, 4, 729-742.

Yang, B., Burns, N. D., & Backhouse, C. J. (2004). Management of uncertainty through postponement. *International Journal of Production Research*, 42, 1049-1064.

Yang, B., Yang, Y., & Wijngaard, J. (2007). Postponement: an inter-organizational perspective. *International Journal of Production Research*, 45, 971-988.

Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.

Zhang, F., Zhu, L., Li, Z., Wang, S., Shi, J., Tang, W., ... & Yang, J. (2021). The recent development of vat photopolymerization: A review. *Additive Manufacturing*, 48, 102423.

Zhang, J. Y., Pandya, J. K., McClements, D. J., Lu, J., & Kinchla, A. J. (2022). Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62, 4752-4768.

Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G., ... & Zhang, J. (2018). Additive manufacturing of metallic materials: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 1-13.

Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015, August). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)* (pp. 2147-2152). IEEE.

Zhuo, P., Li, S., Ashcroft, I. A., & Jones, A. I. (2021). Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109143.

Books

Bartodziej, C. J. (2017). The concept industry 4.0. In *The concept industry 4.0* (pp. 27-50). Springer Gabler, Wiesbaden.

Freddi, A., & Salmon, M. (2018). Design principles and methodologies. *From conceptualization to first prototyping with examples and case studies*.

Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015); Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, 2nd ed, Springer, New York.

Munirathinam, S. (2020). Industry 4.0: Industrial internet of things (IIOT). In *Advances in computers* (Vol. 117, No. 1, pp. 129-164). Elsevier.

Niaki, M. K., & Nonino, F. (2018). The management of additive manufacturing. *Birmingham: Springer*.

Piller, F. T., Weller, C., & Kleer, R. (2015). *Business models with additive manufacturing—opportunities and challenges from the perspective of economics and management* (pp. 39-48). Springer International Publishing.

Reyes-Ruiz, G., & Hernández-Hernández, M. (2020). Augmented reality as a new and innovative learning platform for the medical area. In *Mixed Reality and Three-Dimensional Computer Graphics* (p. 23). IntechOpen.

Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.