



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΔΙΟΙΚΗΣΗ LOGISTICS

ΑΜΕΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΙΑΝΝΑΤΣΗΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΑΝΕΛΛΙΔΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, 2025

ΔΗΛΩΣΗ

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου.

Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού της ΜΔΕ ανήκουν στον/στη μεταπτυχιακό/ή φοιτητή/τρια και στο επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους της ΜΔΕ ανήκουν στον/στη μεταπτυχιακό/ή φοιτητή/τρια και στον/στην επιβλέποντα/ουσα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα/ουσας) ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του/της μη συμμετέχοντα/ουσας στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

Ο/Η Φοιτητής/Φοιτήτρια

(Ονοματεπώνυμο και υπογραφή)

Ο/Η Επιβλέπων/Επιβλέπουσα

(Ονοματεπώνυμο και υπογραφή)

Περίληψη

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing), ευρέως γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση, αποτελεί μία από τις πλέον διαταρακτικές τεχνολογίες της σύγχρονης βιομηχανικής παραγωγής. Η εργασία αυτή εξετάζει σε βάθος τις βασικές τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, τις επιπτώσεις της υιοθέτησής τους σε βιομηχανικό και οικονομικό επίπεδο, καθώς και τις εφαρμογές τους σε διαφορετικούς τομείς παραγωγής. Παρουσιάζονται οι επτά κατηγορίες τεχνολογιών σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900, με ανάλυση των αρχών λειτουργίας, υλικών, πλεονεκτημάτων και περιορισμών. Παράλληλα, διερευνώνται οι επιδράσεις της Προσθετικής Κατασκευής στις αλυσίδες εφοδιασμού, στο κόστος παραγωγής, στην οργάνωση των επιχειρηματικών μοντέλων και στις απαιτούμενες δεξιότητες του ανθρώπινου δυναμικού.

Η μελέτη περιλαμβάνει χαρτογράφηση πραγματικών βιομηχανικών εφαρμογών μέσω case studies που καλύπτουν κλάδους όπως η αεροδιαστημική, η υγεία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυπηγική και η εφοδιαστική αλυσίδα. Τα ευρήματα αναδεικνύουν ότι η Προσθετική Κατασκευή δεν λειτουργεί απλώς ως εργαλείο παραγωγής πρωτοτύπων, αλλά ως στρατηγικός καταλύτης για την ανάπτυξη καινοτομίας, ευελιξίας και βιώσιμων μοντέλων παραγωγής, που ενσωματώνουν διαδικασίες ευέλικτης, αποκεντρωμένης και ψηφιακής παραγωγής, υποστηρίζοντας την εξελισσόμενη βιομηχανική πραγματικότητα της Βιομηχανία 4.0.

Λέξεις κλειδιά:

Προσθετική Κατασκευή, Τρισδιάστατη Εκτύπωση, Ψηφιακή Παραγωγή, Βιομηχανία 4.0, Εφοδιαστική Αλυσίδα, Βιώσιμη Βιομηχανική Παραγωγή, Βιομηχανικές Εφαρμογές

Abstract

Additive Manufacturing (AM), widely known as 3D printing, represents one of the most disruptive technological innovations in modern industrial engineering and production. This research provides a comprehensive analysis of AM technologies, their operational principles, materials, advantages and limitations, and evaluates their industrial, economic, and strategic implications. Based on the ISO/ASTM 52900 classification framework, the study categorizes and analyzes seven primary AM technological domains. Moreover, it examines how AM transforms production cost structures, supply chain configurations, workforce skill requirements, and business models, shifting the manufacturing paradigm from mass production to flexible, on-demand and customized production approaches.

A set of industrial case studies is included, covering sectors such as aerospace, automotive, medical devices, maritime manufacturing, industrial tooling and logistics. The findings indicate that AM is evolving from a prototyping tool to a strategic enabler for innovation, resilience and digital manufacturing ecosystems. The study concludes that Additive Manufacturing acts as a core driver in the transition towards decentralized, digitally connected and sustainable production systems aligned with Industry 4.0 principles.

Keywords:

Additive Manufacturing, 3D Printing, Digital Manufacturing, Industry 4.0, Supply Chain, Sustainable Industrial Production, Industrial Applications

Περιεχόμενα

<i>Εισαγωγή</i>	<i>1</i>
<i>Κεφάλαιο 1 - Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής</i>	<i>2</i>
1.1 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας	2
1.2 Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη	3
1.3 Διεργασίες εξώθησης υλικού.....	4
1.4 Εναπόθεση υλικού	5
1.5 Μέθοδος φωτοπολυμερισμού σε κάδο	6
1.6 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη	6
1.7 Διεργασίες συγκόλλησης επάλληλων φύλλων	7
<i>Κεφάλαιο 2 –Επιπτώσεις της Προσθετικής Κατασκευής</i>	<i>10</i>
2.1 Επιπτώσεις στο κόστος παραγωγής	10
2.2 Επιπτώσεις στις αλυσίδες και διαδικασίες εφοδιασμού	11
2.3 Επιπτώσεις στο ανθρώπινο δυναμικό και στις δεξιότητες	12
2.4 Νέα επιχειρηματικά μοντέλα μέσω της Προσθετικής Κατασκευής.....	14
2.5 Βιωσιμότητα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις	15
2.6 Οικονομικές και στρατηγικές προεκτάσεις της προσθετικής κατασκευής.....	16
2.7 Σύνοψη Κεφαλαίου.....	18
<i>Κεφάλαιο 3 - Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής</i>	<i>19</i>
3.1 Πεδία εφαρμογής της Προσθετικής Κατασκευής.....	19
3.2 Μελέτη εφαρμογών Προσθετικής Κατασκευής.....	23
3.3 Μελέτη εφαρμογών Προσθετικής Κατασκευής.....	25
<i>Κεφάλαιο 4 - Ανάλυση εφαρμογών ΠΚ ανά κλάδο</i>	<i>37</i>
4.1 Αεροδιαστημική Βιομηχανία.....	37
4.2 Αυτοκινητοβιομηχανία.....	39
4.3 Ιατρικά προϊόντα & Υγεία.....	40
4.4 Καταναλωτικά Προϊόντα.....	42
4.5 Βιομηχανική Παραγωγή & Εργαλεία.....	44

4.6 Ενέργεια	45
4.7 Παραγωγή αγροτικών προϊόντων	47
4.8 Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός.....	49
4.9 Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός και κατασκευές.....	50
4.10 Παραγωγή Τροφίμων και Εστίαση	52
4.11 Βιομηχανικά Υδραυλικά Συστήματα	53
4.12 Ναυπηγική Βιομηχανία και Ναυτιλία	54
Κεφάλαιο 5 – Σύνοψη μελέτης και συμπεράσματα	56
Βιβλιογραφία	61
Παράρτημα Α.....	70

Εισαγωγή

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing - AM) ή αλλιώς Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing – 3DP) είναι μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις του 21ου αιώνα. Έχει μεταμορφώσει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζουμε, κατασκευάζουμε και διανέμουμε τα προϊόντα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές μορφοποίησης και κατεργασίας με κοπή/αφαίρεση υλικού, διαμόρφωση ή χύτευση, η Προσθετική Κατασκευή χαρακτηρίζεται από την προσθήκη υλικού σε στρώσεις με βάση πληροφορίες από ένα ψηφιακό μοντέλο, προσφέροντας έτσι ευελιξία στο σχεδιασμό και στην παραγωγή χωρίς επιπλέον κόστος. Οι εφαρμογές της Προσθετικής Κατασκευής επεκτείνονται ραγδαία σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, οι υπηρεσίες υγείας, η ενέργεια και η παραγωγή καταναλωτικών αγαθών. Οι αναδυόμενες επιχειρηματικές στρατηγικές επιτρέπουν πλέον την επέκταση του μοντέλου παραγωγής κατά παραγγελία, τη μείωση των αποθεμάτων και τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτελεί η λεπτομερής χαρτογράφηση σύγχρονων πεδίων εφαρμογής της τεχνολογίας, εστιάζοντας στην άμεση ψηφιακή παραγωγή (direct digital manufacturing), την χρήση δηλ. τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής για την παραγωγή τελικών προϊόντων και εργαλείων παραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό συγκεντρώθηκαν και μελετήθηκαν διεξοδικά χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογών της τεχνολογίας που συναντώνται στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, αλλά και στα σημεία επαγγελματικής/τεχνικής πληροφόρησης που σχετίζονται με την Προσθετική Κατασκευή.

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως εξής. Στο Κεφ. 1 παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι/τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, δίνοντας μία ιστορική αναδρομή στο πως αναπτύχθηκαν στο πέρασμα του χρόνου τόσο από τεχνική πλευρά όσο και από πλευράς εφαρμογής. Στο Κεφ. 2 αναλύονται οι εκτιμώμενες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις από την υιοθέτηση της Προσθετικής Κατασκευής από τις επιχειρήσεις. Στο Κεφ. 3 παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογών της τεχνολογίας, η μεθοδολογία συλλογής των δεδομένων/περιπτώσεων και η ανάλυση των περιπτώσεων εφαρμογής ανά πεδίο, κλάδο και τεχνολογία. Συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογών ανά κλάδο αναλύονται στο Κεφ. 4. Τέλος, στο Κεφ. 5 παρουσιάζεται η συγκεντρωτική αξιολόγηση των ευρημάτων, η ανάλυση των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα σχετικά με τις τρέχουσες και μελλοντικές προοπτικές της Προσθετικής Κατασκευής στη βιομηχανική παραγωγή.

Κεφάλαιο 1 - Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

Η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ), όπως έχει καθοριστεί από το πρότυπο ISO/ASTM 52900, περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών που ταξινομούνται σε επτά βασικές κατηγορίες και επιτρέπουν την κατασκευή εξαρτημάτων μέσω της διαδοχικής προσθήκης υλικού, στρώμα προς στρώμα. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

1. Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting),
2. Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (Directed Energy Deposition),
3. Εξώθηση υλικού (Material Extrusion),
4. Εναπόθεση υλικού (Material Jetting),
5. Φωτοπολυμερισμός σε κάδο (Vat Photopolymerization),
6. Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Power Bed Fusion) και
7. Συγκόλληση επάλληλων φύλλων (Sheet lamination).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται διεξοδικά οι παραπάνω κατηγορίες, αναλύοντας την ιστορική εξέλιξη, τις αρχές τεχνικής λειτουργίας, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μεθόδου. Για κάθε κατηγορία παρουσιάζονται επίσης, χαρακτηριστικές περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών παραγωγής τελικών προϊόντων, εξαρτημάτων και εργαλείων. Όπως θα καταστεί εμφανές και από την ανάλυση που ακολουθεί, καμία μέθοδος ΠΚ δεν είναι απόλυτα κυρίαρχη· κάθε μία παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς, οι οποίοι την καθιστούν κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές.

1.1 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας

Η μέθοδος της εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting - BJ) αναπτύχθηκε αρχικά στο MIT, στις αρχές της δεκαετίας του 1990 από την ερευνητική ομάδα του Ely Sachs και κατοχυρώθηκε εμπορικά το 1993 (Sachs et al., 1993). Προωθήθηκε εμπορικά, αρχικά, με τον όρο "3D Printing", όρος που χρησιμοποιείται σήμερα για να περιγράψει όλο το πεδίο της ΠΚ. Η μέθοδος βασίζεται στην εναπόθεση (ψεκασμό/εκτόξευση) υγρού συγκολλητικού υλικού (binder) πάνω σε στρώσεις πούδρας (συνήθως μετάλλων ή κεραμικών), ώστε να δημιουργείται σταδιακά το επιθυμητό αντικείμενο. Μετά την εκτύπωση, το «πράσινο κομμάτι» (green part) υφίσταται μετεπεξεργασία όπως πυροσυσσωμάτωση ή διήθηση, ώστε να αποκτήσει τις τελικές

μηχανικές ιδιότητές του (Bandyopadhyay & Heer, 2018). Μερικά από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας BJ είναι η σχετικά υψηλή ταχύτητα παραγωγής (Bandyopadhyay & Heer, 2018), το σχετικά χαμηλό κόστος εξοπλισμού και υλικών (Ngo et al., 2018), η δυνατότητα παραγωγής εξαρτημάτων μεγάλων διαστάσεων με πολύπλοκη γεωμετρία (Gibson, Rosen & Stucker, 2015) και η ευρεία γκάμα υλικών που μπορούν να αξιοποιηθούν, όπως μέταλλα (π.χ. Inconel, ανοξείδωτος χάλυβας, χαλκός, μπρούντζος), κεραμικά (SiC, Al₂O₃) και γυαλί (Upadhyay et al., 2021). Μειονεκτήματα της τεχνολογίας BJ είναι η απαίτηση για εκτεταμένη μετεπεξεργασία (πυροσυσσώματωση, διήθηση, κατεργασία), η περιορισμένη μηχανική αντοχή των εκτυπωμένων κομματιών (Ngo , et al., 2018), και η ευαισθησία σε συρρίκνωση και παραμόρφωση κατά τη φάση της μετεπεξεργασίας (Upadhyay et al., 2021).

Χαρακτηριστική περίπτωση εφαρμογής της τεχνολογίας αποτελεί η παραγωγή πολύπλοκων γεωμετρικά, λειτουργικών μεταλλικών εξαρτημάτων για τα ηλεκτρικά οχήματα ID.3 της Volkswagen με μικρότερο κόστος σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους (Volkswagen Additive Manufacturing Report, 2023).

1.2 Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη

Η τεχνολογία εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (Directed Energy Deposition - DED) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1990 ως εξέλιξη της τεχνικής laser cladding, με στόχο την επισκευή και την ενίσχυση μεταλλικών εξαρτημάτων (Mazumder et al., 1997). Το Εθνικό Εργαστήριο Sandia και το Πανεπιστήμιο του Ιλινόι συνέβαλαν στην ανάπτυξη των πρώτων συστημάτων LENS (Laser Engineered Net Shaping), τα οποία διατέθηκαν αργότερα εμπορικά από την Optomec (Griffith et al., 1996).

Η τεχνολογία DED χρησιμοποιεί εστιασμένη πηγή ενέργειας – συνήθως λέιζερ, ηλεκτρονική δέσμη ή τόξο πλάσματος – για την τήξη υλικού (σε μορφή σύρματος ή πούδρας) απευθείας πάνω σε ένα υπόστρωμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να κατασκευάσει ή να επισκευάσει εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας και μεγάλης αξίας (Frazier, 2014). Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας DED είναι η ικανότητα επισκευής κρίσιμων εξαρτημάτων υψηλού κόστους (Griffith et al., 1996) , η κατασκευή μεγάλων μεταλλικών εξαρτημάτων χωρίς περιορισμούς θαλάμου (Frazier , 2014) και η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών υλικών (Herzog et al., 2016). Από την άλλη πλευρά στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται, η ανάγκη για εκτεταμένη κατεργασία μετά την εκτύπωση (Frazier, 2014), το υψηλό κόστος εξοπλισμού και λειτουργίας

(Mazumder et al., 1997) και η παρουσία θερμικών τάσεων και παραμορφώσεων (Herzog et al., 2016).

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία και τις διαθέσιμες πηγές πληροφόρησης στο διαδίκτυο, η τεχνολογία DED έχει ευρεία εφαρμογή στην αεροδιαστημική και την ενέργεια, ειδικά στην επισκευή εξαρτημάτων υψηλής αξίας. Για παράδειγμα, η Siemens Energy χρησιμοποιεί DED για την επισκευή πτερυγίων αεροστροβίλων, μειώνοντας σημαντικά το σχετικό κόστος και χρόνο συντήρησης.

1.3 Διεργασίες εξώθησης υλικού

Η τεχνολογία εξώθησης υλικού (Material Extrusion - ME), αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 από τον Scott Crump, συνιδρυτή της Stratasys, και κατοχυρώθηκε εμπορικά το 1989 (Crump, 1992). Η λήξη του σχετικού διπλώματος το 2009 οδήγησε στη ραγδαία διάδοση της τεχνολογίας, ιδιαίτερα στην αγορά χαμηλού κόστους 3D εκτυπωτών (Gibson, Rosen & Stucker, 2015). Η διαδικασία βασίζεται στη θέρμανση και εξώθηση θερμοπλαστικού νήματος (filament) μέσα από ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο, το οποίο τοποθετεί το υλικό σε στρώσεις για να σχηματιστεί το αντικείμενο (Turner & Gold, 2015). Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας ME αποτελούν το χαμηλό κόστος εξοπλισμού και υλικών (Ngo et al., 2018), η σχετικά εύκολη χρήση (Gibson et al., 2015), η σχετικά ευρεία γκάμα διαθέσιμων υλικών (ABS, PLA, PETG, πολυκαρβονικά, σύνθετα πολυμερή με ίνες άνθρακα) (Turner & Gold, 2015) και το χαμηλό κόστος παραγωγής μεγάλων σε μέγεθος εξαρτημάτων (Ngo et al., 2018). Στα μειονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται η ύπαρξη σχετικά περισσότερων περιορισμών ως προς τη γεωμετρία των κομματιών, η ανάγκη υποστηρικτικών δομών (Ngo et al., 2018), η ύπαρξη εσωτερικών ατελειών, ειδικά μεταξύ στρώσεων, που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες (Ahn et al., 2002), και η χαμηλότερη δυνατότητα επέκτασης σε μεγάλη κλίμακα παραγωγής (Turner & Gold, 2015). Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η Ford Motor Company, που αξιοποιεί την τεχνολογία ME για την παραγωγή πρωτοτύπων, εργαλείων και ιδιοσυσκευών παραγωγής, επιτυγχάνοντας μείωση του αντίστοιχου κόστους κατά 30% και μείωση του χρόνου ανάπτυξης πρωτοτύπων έως 70% (Ford, 2020).

1.4 Εναπόθεση υλικού

Στην εναπόθεση υλικού (Material Jetting - MJ), η οποία αποτελεί μια από τις πλέον ακριβείς τεχνολογίες ΠΚ, υλικό σε υγρή μορφή (συνήθως φωτοπολυμερές ή κερί) εκτοξεύεται/εναποτίθεται από κεφαλές εκτύπωσης σε μορφή μικρο-σταγονιδίων πάνω στην πλατφόρμα και πολυμερίζεται/στερεοποιείται μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας ή ψύξης. Η διεργασία επαναλαμβάνεται στρώμα-στρώμα, επιτυγχάνοντας γεωμετρίες υψηλής λεπτομέρειας (Gibson et al., 2021).

Η τεχνολογία θυμίζει τη λειτουργία των παραδοσιακών εκτυπωτών ψεκασμού μελάνης (inkjet printers), με τη διαφορά ότι αντί για μελάνι χρησιμοποιούνται υλικά μηχανικών και βιομηχανικών εφαρμογών. Οι πρώτες μελέτες για την εναπόθεση/ψεκασμό φωτοπολυμερών πραγματοποιήθηκαν την δεκαετία του 1990 και αφορούσαν κυρίως στη δημιουργία πρωτοτύπων μεγάλης διαστασιολογικής ακρίβειας (Bártolo, 2011). Στην πορεία διευρύνθηκε η γκάμα των διαθέσιμων υλικών με φωτοπολυμερή μεγαλύτερης μηχανικής αντοχής και βιοσυμβατότητας, για εφαρμογές κυρίως στον ιατρικό τομέα και στην παραγωγή καλουπιών χύτευσης (Gibson et al., 2021; ISO/ASTM, 2015). Υλικά τα οποία αξιοποιούνται είναι τα φωτοπολυμερή ακρυλικής βάσης, διαφανή πολυμερή για οπτικά πρωτότυπα, συνθετικά κεριά για χύτευση με τη μέθοδο του χαμένου κεριού (lost wax casting), και οδοντιατρικά/βιοσυμβατά πολυμερή για ιατρικές εφαρμογές. Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η δυνατότητα παράλληλης χρήσης πολλών υλικών και χρωμάτων, ιδανική για προϊόντα με έντονο χαρακτήρα μάρκετινγκ, ιατρικά μοντέλα και πολυτελή προϊόντα (Bártolo, 2011), καθώς και η ελάχιστη ανάγκη για μετεπεξεργασία, διότι τα υποστηρίγματα είναι από εύκολα αφαιρούμενα υλικά. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται το υψηλό κόστος υλικών (Bártolo, 2011), και η περιορισμένη μηχανική αντοχή καθώς τα πολυμερή είναι ευαίσθητα στην υγρασία και στην μακροχρόνια χρήση. Λόγω του περιορισμένου σχετικά χώρου εκτύπωσης των μηχανών, η τεχνολογία δεν θεωρείται επίσης κατάλληλη για μεγάλα εξαρτήματα/αντικείμενα.

Τυπικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η παραγωγή καινοτόμων συσκευασιών και εξατομικευμένων καλουπιών για φιάλες αρωμάτων από τη L'Oréal, η οποία αναφέρει μείωση του κόστους ανάπτυξης προϊόντων κατά περίπου 40%, και επιτάχυνση του κύκλου R&D, ειδικά σε σειρές προϊόντων υψηλής αξίας (L'Oréal, 2020; Ford & Despeisse, 2016).

1.5 Μέθοδος φωτοπολυμερισμού σε κάδο

Η μέθοδος φωτοπολυμερισμού σε κάδο (Vat Photopolymerization - VP) είναι μια από τις παλαιότερες και πιο διαδεδομένες τεχνολογίες ΠΚ. Στηρίζεται στη χρήση μιας δεξαμενής με υγρό φωτοπολυμερές, το οποίο στερεοποιείται επιλεκτικά μέσω μιας πηγής φωτός (λείζερ, προβολέας ή LCD) σχηματίζοντας έτσι, στρώμα-στρώμα την τελική γεωμετρία (Gibson, Rosen & Stucker, 2015). Το πρώτο σύστημα φωτοπολυμερισμού σε κάδο αναπτύχθηκε το 1984 από τον Chuck Hull, ιδρυτή της 3D Systems, δίνοντας το έναυσμα για το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα ΠΚ κυρίως για εφαρμογές πρωτοτυποποίησης (prototyping). Από τότε το πεδίο εφαρμογών της τεχνολογίας έχει επεκταθεί και η VP περιλαμβάνεται σε διάφορα πρότυπα βιομηχανικής πιστοποίησης όπως το ISO 10993 για τη βιοσυμβατότητα ιατρικών υλικών, το ISO/ASTM 52910 για σχεδιασμό, και το ISO 13485 για κατασκευή ιατροτεχνολογικών προϊόντων. Υλικά τα οποία αξιοποιούνται στην VP είναι οι φωτοπολυμερείς ρητίνες, ακρυλικές και εποξειδικές, διαφανή πολυμερή για οπτικές εφαρμογές και οι βιοσυμβατές ρητίνες. Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας είναι η επίτευξη πολύ καλής ποιότητας επιφανειών, η υψηλή ακρίβεια και ανάλυση (Gibson et al., 2021), η ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων των βιοσυμβατών υλικών για ιατρικές εφαρμογές, και η ικανότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών με εσωτερικές κοιλότητες. Από την άλλη ως μειονεκτήματα αναφέρονται η ευαισθησία των ρητινών σε υγρασία και φθορά (Bártolo, 2011), το περιορισμένο μέγεθος εκτύπωσης σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, και το κόστος και η ανακυκλωσιμότητα των υλικών. Τυπική περίπτωση εφαρμογής αποτελεί η εταιρεία LVMH, η οποία αξιοποιεί την τεχνολογία για την κατασκευή πρωτοτύπων συσκευασιών καλλυντικών και αξεσουάρ, αξιοποιώντας την ποιότητα επιφάνειας και την υψηλή ακρίβεια της μεθόδου (LVMH, 2025).

1.6 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη

Η σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Power Bed Fusion - PBF) περιλαμβάνει οικογένεια διεργασιών όπου ένα λεπτό στρώμα σκόνης (πολυμερούς ή μετάλλου) απλώνεται σε κλίνη και επιλεκτικά συντήκεται/τήκεται σημειακά ή επιφανειακά με λείζερ (SLS/SLM/L-PBF) ή δέσμη ηλεκτρονίων (EB-PBF), επαναλαμβάνοντας τη στρώση μέχρι να σχηματισθεί το τεμάχιο (ISO/ASTM 52900). Η τοπικά παρεχόμενη ενέργεια προκαλεί συσσωμάτωση/σύντηξη των σωματιδίων, ενώ η ακατέργαστη πούδρα αφαιρείται στο τέλος (Gibson, Rosen & Stucker, 2015; Frazier, 2014). Κατά τη δεκαετία του 1990 ξεκίνησαν οι πρώτες έρευνες για μεταλλικά

κονιάματα και συστήματα ενεργειακών δεσμών, που οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη τεχνικών πλήρους σύντηξης με λέιζερ, όπως η Selective Laser Melting (SLM) και η Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) (Kruth et al., 1998). Στην περίοδο 1997–2002, αναπτύχθηκε η τεχνολογία Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) για την επεξεργασία κραμάτων τιτανίου και νικελίου, με βασικό πλεονέκτημα τη μείωση των εσωτερικών παραμενουσών τάσεων (residual stresses) μέσω της προθέρμανσης της κλίνης σκόνης (Herzog et al., 2016). Από τη δεκαετία του 2010 έως σήμερα, οι τεχνολογίες L-PBF και EB-PBF έχουν βιομηχανοποιηθεί σε εφαρμογές που αφορούν την αεροδιαστημική, την ιατρική και την αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ η βιβλιογραφία έχει ωριμάσει σημαντικά γύρω από τη μελέτη της μικροδομής, του πορώδους και των στρατηγικών σάρωσης (DebRoy et al., 2018; King et al., 2015). Κάποια ενδεικτικά υλικά είναι τα μέταλλα Ti-6Al-4V, Ti64 ELI, Inconel 718/625, Co-Cr, AlSi10Mg, 17-4PH/316L (Frazier, 2014; DebRoy et al., 2018) καθώς και τα πολυμερή PA12/PA11, TPU/TPE και σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (Gibson et al., 2015; Yap et al., 2015). Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας είναι η υψηλή μηχανική απόδοση σε μεταλλικά εξαρτήματα με δυνατότητα τοπολογικής βελτιστοποίησης (topological optimization) (Frazier, 2014; Herzog et al., 2016), η πολυπλοκότητα των παραγόμενων γεωμετριών (Gibson et al., 2015), η σύντμηση της διαδικασίας παραγωγής με μείωση των εργασιών συναρμολόγησης (DebRoy et al., 2018) και η υψηλή δυνατότητα εξατομίκευσης (Herzog et al., 2016). Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν οι παραμένουσες τάσεις και η ανάγκη για μετέπειτα θερμική κατεργασία (stress relief heat treatment), η ανάγκη για υποστηρικτικές δομές (King et al., 2015; DebRoy et al., 2018), η σχετικά ψηλή τραχύτητα επιφάνειας και η συνεπακόλουθη ανάγκη μετα-κατεργασίας (κατεργασία CNC, αμμοβολή, HIP) για κρίσιμες εφαρμογές (Herzog et al., 2016), το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας (μηχανήματα, αδρανής ατμόσφαιρα/κενό, φίλτρα) (Frazier, 2014). Επίσης, παρότι οι δυνατότητες είναι πολλές, απαιτούνται ακόμα αρκετές μελέτες ούτως ώστε να υπάρξει πιστοποίηση και η συμμόρφωση με τα ισχύοντα διεθνή πρότυπα ανά πεδίο/κλάδο εφαρμογής. Την τεχνολογία PBF χρησιμοποιείται στην BMW για την κατασκευή σχετικά ελαφρών αλλά ανθεκτικών εξαρτημάτων, όπως υποστηρίγματα και εξαρτήματα ειδικών σειρών σχεδιασμένα με μεθόδους τοπολογικής βελτιστοποίησης, καθώς και για την κατασκευή εργαλείων παραγωγής μικρών παρτίδων.

1.7 Διεργασίες συγκόλλησης επάλληλων φύλλων

Η συγκόλληση επάλληλων φύλλων (sheet lamination) αποτελεί μια κατηγορία της ΠΚ, στην οποία αντικείμενα δημιουργούνται με τη διαδοχική στρωματοποίηση φύλλων υλικού, τα οποία

συγκολλούνται μεταξύ τους και στη συνέχεια κόβονται ώστε να διαμορφωθεί η τελική γεωμετρία. Οι μέθοδοι συγκόλλησης ποικίλλουν: συγκόλληση με θερμότητα ή πίεση (Laminated Object Manufacturing – LOM), χρήση υπερηχητικής συγκόλλησης (Ultrasonic Additive Manufacturing – UAM) ή άλλες τεχνικές που επιτρέπουν στα φύλλα να συνδέονται με ισχυρούς δεσμούς (Gibson, Rosen & Stucker, 2015). Η τεχνολογία της συγκόλλησης επάλληλων φύλλων έκανε την εμφάνισή της το 1991 με την ανάπτυξη της Laminated Object Manufacturing (LOM) από την Helisys. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιούσε χαρτί με επικάλυψη κόλλας, το οποίο συγκολλούνταν στρώμα προς στρώμα με θερμό ρολό και στη συνέχεια κοβόταν με λέιζερ για να σχηματιστεί το αντικείμενο (Fessler et al., 1996). Κατά την περίοδο 1999–2005, η τεχνολογία επεκτάθηκε και σε πλαστικά και σύνθετα υλικά, γεγονός που βελτίωσε την ακρίβεια και την ανθεκτικότητα των κατασκευών (Matsuzaki & Ueda, 2000). Στη δεκαετία του 2000 παρουσιάστηκε και η Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), η οποία βασίζεται στη χρήση υπερηχητικών δονήσεων για τη συγκόλληση μεταλλικών φύλλων χωρίς την ανάγκη τήξης. Η καινοτομία αυτή επέτρεψε τη δημιουργία μεταλλικών εξαρτημάτων με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά ή αισθητήρες (White et al., 2017). Σήμερα, η συγκόλληση επάλληλων φύλλων χρησιμοποιείται κυρίως για γρήγορη πρωτοτυποποίηση, την κατασκευή αρχιτεκτονικών μοντέλων και μοντέλων επίδειξης, καθώς και για λειτουργικά εξαρτήματα μέσω της UAM, κυρίως στη βιομηχανία αυτοκινήτων και αεροδιαστημικής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση επάλληλων φύλλων εξαρτώνται από την παραλλαγή της τεχνολογίας. Στην περίπτωση της μεθόδου LOM αξιοποιούνται χαρτί και πολυμερή φύλλα, όπως PVC και ABS. Στην περίπτωση της UAM, χρησιμοποιούνται μεταλλικά φύλλα από αλουμίνιο, χαλκό, τιτάνιο και ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ έχουν αναπτυχθεί και σύνθετα υλικά με πολυμερή ενισχυμένα με ίνες, τα οποία προσφέρουν αυξημένη μηχανική αντοχή. Ως τεχνολογία παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα με βασικότερο το χαμηλό κόστος, καθώς χρησιμοποιούνται οικονομικά υλικά, όπως χαρτί ή απλά πλαστικά, καθιστώντας τη μια συμφέρουσα λύση για την κατασκευή μοντέλων (Zhang et al., 2019). Παράλληλα, η διαδικασία χαρακτηρίζεται από υψηλή ταχύτητα, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματική για την παραγωγή μεγάλων αντικειμένων. Τέλος, με την τεχνολογία UAM είναι εφικτή η ενσωμάτωση αισθητήρων και ηλεκτρονικών στοιχείων στο εσωτερικό των κατασκευών (White et al., 2017). Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή συνοδεύεται και από σημαντικούς περιορισμούς. Τα μοντέλα που παράγονται μέσω LOM εμφανίζουν περιορισμένη μηχανική αντοχή και δεν έχουν ιδιότητες ισοδύναμες με εκείνες των χυτών ή μηχανουργικά κατεργασμένων εξαρτημάτων. Η τελική γεωμετρία συχνά επηρεάζεται από το πάχος των φύλλων και την ακρίβεια κοπής, γεγονός που περιορίζει τη συνολική ακρίβεια της μεθόδου (Gibson et al., 2015). Επιπλέον, η

επιλογή υλικών είναι πιο περιορισμένη συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες ΠΚ. Τέλος, συχνά απαιτείται μετα-επεξεργασία, όπως λείανση ή επικάλυψη, προκειμένου να βελτιωθεί η επιφάνεια και η αισθητική των τελικών αντικειμένων. Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι η Honda αξιοποιεί την τεχνολογία συγκόλλησης επάλληλων φύλλων για την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων αμαξωμάτων και μοντέλων στα πρώτα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού. Τα πρωτότυπα αυτά είναι σε φυσική κλίμακα, γεγονός που βοηθά τους μηχανικούς στον έλεγχο αεροδυναμικής και εργονομίας. (Koslow, T. 2016)

Κεφάλαιο 2 –Επιπτώσεις της Προσθετικής Κατασκευής

Η ΠΚ έχει εξελιχθεί από μια τεχνολογία που χρησιμοποιούνταν κυρίως για πρωτοτυποποίηση σε έναν καταλύτη αλλαγών με στρατηγικές και οικονομικές επιπτώσεις για πλήθος βιομηχανικών κλάδων. Η βασική της συνεισφορά έγκειται στην ανατροπή των παραδοσιακών αλυσίδων αξίας και στην ανάδειξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων. Οι επιχειρήσεις δεν περιορίζονται πλέον από το κόστος κατασκευής των εργαλείων παραγωγής και την συνεπακόλουθη ανάγκη για μεγάλους όγκους παραγωγής, αλλά μπορούν να παράγουν μικρές παρτίδες ή ακόμα και μοναδικά εξαρτήματα με υψηλή αποδοτικότητα (Gibson et al., 2021). Ας δούμε, όμως, μερικά από τα οφέλη αλλά και τις ευρύτερες επιπτώσεις που εκτιμάται ότι προκύπτουν από την υιοθέτηση της ΠΚ στη βιομηχανική παραγωγή.

2.1 Επιπτώσεις στο κόστος παραγωγής

Η ΠΚ επιφέρει βαθιές αλλαγές στο οικονομικό σκέλος της βιομηχανικής παραγωγής, κυρίως μέσω της ανακατανομής του κόστους και της αύξησης της αποδοτικότητας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους που απαιτούν υψηλές επενδύσεις σε καλούπια, εργαλεία και μεγάλες σειρές παραγωγής, η ΠΚ εξαλείφει την ανάγκη για δαπανηρά εργαλεία παραγωγής, μειώνοντας δραστικά το αρχικό κεφαλαιουχικό κόστος (Gibson et al., 2021). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εταιρείες να μπορούν να υλοποιούν ακόμη και μικρές παρτίδες παραγωγής με χαμηλότερο οικονομικό ρίσκο.

Ένα από τα σημαντικότερα οφέλη της ΠΚ είναι η μείωση των αποβλήτων (scrap material). Στις αφαιρετικές μεθόδους (κατεργασίες κοπής), μεγάλο ποσοστό της πρώτης ύλης καταλήγει σε απορρίμματα, ενώ στην ΠΚ χρησιμοποιείται μόνο η αναγκαία ποσότητα υλικού. Αυτό οδηγεί σε μείωση κόστους έως και 70% σε ορισμένες εφαρμογές, ειδικά σε υλικά υψηλής αξίας όπως τα τιτανιούχα κράματα και τα υπερ-κράματα (Wohlers & Caffrey, 2023).

Η δυνατότητα παραγωγής κατά παραγγελία ή κατ' απαίτηση (on-demand manufacturing) μειώνει τις ανάγκες για μεγάλα αποθέματα, περιορίζοντας τα κόστη διακίνησης και αποθήκευσης. Σημαντικές εταιρείες, όπως η Siemens και η General Electric, έχουν επενδύσει σε ψηφιακά αποθετήρια ανταλλακτικών, τα οποία εκτυπώνονται μόνο όταν απαιτούνται, μειώνοντας τον κύκλο αποθεμάτων και βελτιώνοντας την ταμειακή ροή (Attaran, 2017).

Επιπλέον, η ενοποίηση εξαρτημάτων μέσω της ΠΚ έχει σαφείς οικονομικές συνέπειες. Ένα εξάρτημα που προηγουμένως κατασκευαζόταν από δέκα διαφορετικά κομμάτια μπορεί πλέον να παραχθεί ως ένα ενιαίο σώμα, μειώνοντας το κόστος συναρμολόγησης, τον χρόνο παραγωγής και τον αριθμό των πιθανών σημείων αστοχίας. Μελέτες δείχνουν ότι η εξοικονόμηση κόστους από την ενοποίηση μπορεί να φτάσει το 25–30% σε τομείς όπως η αεροδιαστημική (Ford & Despeisse, 2016).

Ωστόσο, η οικονομική αποδοτικότητα της ΠΚ εξαρτάται από την κλίμακα παραγωγής και το είδος της εφαρμογής. Για μεγάλους όγκους παραγωγής, οι παραδοσιακές μέθοδοι εξακολουθούν να υπερτερούν σε κόστος ανά μονάδα, λόγω ταχύτερων κύκλων και χαμηλότερου κόστους πρώτων υλών. Συνεπώς, η ΠΚ είναι σήμερα πιο ανταγωνιστική σε αγορές υψηλής αξίας, χαμηλού όγκου, όπου η πολυπλοκότητα και η εξατομίκευση προσδίδουν μεγαλύτερη αξία από το χαμηλό μοναδιαίο κόστος (Berman, 2012).

2.2 Επιπτώσεις στις αλυσίδες και διαδικασίες εφοδιασμού

Η ενσωμάτωση της ΠΚ στις βιομηχανικές διαδικασίες έχει καθοριστικές συνέπειες στις αλυσίδες εφοδιασμού και στις διαδικασίες αποθήκευσης και διανομής. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η μετάβαση από τα φυσικά αποθέματα στα ψηφιακά αποθετήρια ανταλλακτικών. Αντί οι εταιρείες να διατηρούν μεγάλες ποσότητες ανταλλακτικών σε αποθήκες, διατηρούν τα αντίστοιχα ψηφιακά αρχεία (CAD files) και εκτυπώνουν τα εξαρτήματα κατά παραγγελία. Αυτό μειώνει το κόστος αποθήκευσης και τα δεσμευμένα κεφάλαια, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο απαξίωσης των αποθεμάτων (Khajavi et al., 2014).

Η δυνατότητα παραγωγής κατ' απαίτηση φέρνει σημαντικές αλλαγές στη γεωγραφία της παραγωγής. Εξαρτήματα που προηγουμένως μεταφέρονταν σε μεγάλες αποστάσεις μπορούν πλέον να παραχθούν τοπικά, κοντά στο σημείο κατανάλωσης ή χρήσης. Αυτό μειώνει τα κόστη μεταφορών, επιταχύνει τον χρόνο παράδοσης και ενισχύει την ανθεκτικότητα των εφοδιαστικών αλυσίδων απέναντι σε διαταραχές, όπως πανδημίες ή γεωπολιτικές κρίσεις (Ivanov & Dolgui, 2020).

Ένα χαρακτηριστικό πιθανό πεδίο εφαρμογής της ΠΚ είναι η αμυντική και η αεροδιαστημική βιομηχανία, όπου ανταλλακτικά μπορούν να παραχθούν σε απομακρυσμένες βάσεις ή ακόμη και σε πλοία. Η μείωση του χρόνου ακινησίας εξοπλισμού μεταφράζεται σε

υψηλότερη επιχειρησιακή διαθεσιμότητα και χαμηλότερο κόστος συντήρησης (Manning & Reeves, 2019). Παράλληλα, μεγάλες επιχειρήσεις στον κλάδο των μεταφορών, όπως η Deutsche Bahn έχει επενδύσει σε κέντρα ΠΚ για την παραγωγή ανταλλακτικών κατά παραγγελία, δημιουργώντας νέες διαδικασίες διακίνησης και διανομής που βασίζονται στην τοπική παραγωγή.

Επιπλέον, η ΠΚ μπορεί να συμβάλει στη βιωσιμότητα των εφοδιαστικών αλυσίδων. Η μείωση των μεταφορών περιορίζει τις εκπομπές CO₂, ενώ η χρήση ακριβώς της απαραίτητης ποσότητας υλικού μειώνει τα απόβλητα. Αυτή η τάση συνδέεται με τους στόχους της κυκλικής οικονομίας και ενισχύει την περιβαλλοντική υπευθυνότητα των εταιρειών (Gebler et al., 2014).

Ωστόσο, η μετάβαση σε αποκεντρωμένα μοντέλα παραγωγής δημιουργεί και προκλήσεις. Θέματα πνευματικής ιδιοκτησίας, πιστοποίησης και ασφάλειας δεδομένων καθίστανται κρίσιμα, καθώς τα ψηφιακά σχέδια ανταλλακτικών διακινούνται διεθνώς. Επίσης, η ενσωμάτωση της ΠΚ στις υπάρχουσες διαδικασίες διανομής και διακίνησης απαιτεί νέες μορφές συνεργασίας μεταξύ κατασκευαστών, προμηθευτών και παροχών μεταφορών.

2.3 Επιπτώσεις στο ανθρώπινο δυναμικό και στις δεξιότητες

Η εξάπλωση της ΠΚ δεν επηρεάζει μόνο τα τεχνικά και οικονομικά δεδομένα, αλλά και το ίδιο το ανθρώπινο δυναμικό που συμμετέχει στη βιομηχανική παραγωγή. Η εισαγωγή των τεχνολογιών αυτών οδηγεί σε αναδιαμόρφωση των απαιτούμενων δεξιοτήτων και δημιουργεί νέες επαγγελματικές ειδικότητες, ενώ παράλληλα μειώνει την ανάγκη για ορισμένους παραδοσιακούς ρόλους.

Πρώτον, η ΠΚ απαιτεί προσωπικό με εξειδίκευση στον ψηφιακό σχεδιασμό και στη μηχανολογία υπολογιστών, καθώς η διαδικασία ξεκινά με την ανάπτυξη τρισδιάστατων μοντέλων σε συστήματα CAD και την προετοιμασία αρχείων για εκτύπωση. Η γνώση τεχνικών και συστημάτων τοπολογικής βελτιστοποίησης, σχεδιασμού δικτυωτών δομών και προσομοίωσης μηχανικών ιδιοτήτων είναι πλέον κρίσιμη (Gibson et al., 2021). Παράλληλα, η ανάγκη για κατανόηση των ειδικών χαρακτηριστικών των επιμέρους τεχνολογιών ΠΚ, δημιουργεί ζήτηση για τεχνικούς και μηχανικούς που μπορούν να χειριστούν, να συντηρήσουν και να βελτιστοποιήσουν τον εξοπλισμό.

Δεύτερον, αναδύονται νέες ειδικότητες στον τομέα της διαχείρισης δεδομένων, καθώς η παραγωγή βασίζεται σε ψηφιακά σχέδια που πρέπει να προστατεύονται από ζητήματα πνευματικής ιδιοκτησίας και κυβερνοεπιθέσεων. Ειδικοί στην κυβερνοασφάλεια και τις ψηφιακά μεθόδους διακίνησης και διανομής αποκτούν στρατηγικό ρόλο (Ford & Despeisse, 2016).

Τρίτον, η εισαγωγή της ΠΚ μεταβάλλει την ίδια τη δομή της εργασίας στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η αυτοματοποίηση που προσφέρει μειώνει την ανάγκη για χειρωνακτική εργασία σε παραδοσιακές διεργασίες κατεργασίας, αλλά αυξάνει τη σημασία της επίβλεψης και του ελέγχου ποιότητας. Οι εργαζόμενοι καλούνται να αποκτήσουν δεξιότητες ανάλυσης δεδομένων, χειρισμού αισθητήρων και ελέγχου μεθόδων μη καταστροφικής δοκιμής για την αξιολόγηση εκτυπωμένων εξαρτημάτων.

Παράλληλα, το εκπαιδευτικό σύστημα και τα επαγγελματικά κέντρα κατάρτισης πρέπει να προσαρμοστούν στη νέα πραγματικότητα, ενσωματώνοντας προγράμματα εκπαίδευσης γύρω από τις τεχνολογίες ΠΚ. Ήδη πανεπιστήμια και βιομηχανικοί οργανισμοί συνεργάζονται για την ανάπτυξη νέων προγραμμάτων σπουδών που συνδυάζουν μηχανολογία, πληροφορική και υλικά (Bandyopadhyay & Heer, 2019).

Ωστόσο, η μετάβαση δεν είναι απλή. Υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας ενός κενού δεξιοτήτων (skill gap) ανάμεσα στις απαιτήσεις των επιχειρήσεων και στις γνώσεις που διαθέτει το υπάρχον εργατικό δυναμικό. Αυτό σημαίνει ότι εταιρείες και κυβερνήσεις πρέπει να επενδύσουν συστηματικά σε προγράμματα επανακατάρτισης και διά βίου μάθησης, ώστε η ενσωμάτωση της ΠΚ να μην οδηγήσει σε κοινωνικές ανισότητες ή απώλεια θέσεων εργασίας σε μεγάλες κλίμακες.

Η συνολική εικόνα δείχνει ότι η ΠΚ δεν αντικαθιστά απλώς παραδοσιακές θέσεις εργασίας, αλλά επανακαθορίζει τον ρόλο του ανθρώπινου παράγοντα στη βιομηχανία. Ο άνθρωπος περνά από τη χειρωνακτική κατασκευή στη διαχείριση και τον έλεγχο ψηφιακών διαδικασιών, αποκτώντας πιο στρατηγικό και δημιουργικό ρόλο στη βιομηχανική αλυσίδα αξίας.

2.4 Νέα επιχειρηματικά μοντέλα μέσω της Προσθετικής Κατασκευής

Η υιοθέτηση της ΠΚ δεν αλλάζει μόνο τα τεχνικά δεδομένα της παραγωγής, αλλά οδηγεί και στη διαμόρφωση νέων επιχειρηματικών μοντέλων, τα οποία επανακαθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι επιχειρήσεις δημιουργούν και αποδίδουν αξία. Οι αλλαγές αυτές αφορούν τόσο τις βιομηχανίες παραγωγής όσο και τις υπηρεσίες που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, τη διανομή και τη συντήρηση προϊόντων.

Ένα πρώτο μοντέλο που αναδύεται είναι αυτό της κατ' απαίτηση παραγωγής (on-demand manufacturing), όπου οι επιχειρήσεις δεν χρειάζεται να διατηρούν μεγάλες αποθήκες ανταλλακτικών, αλλά εκτυπώνουν εξαρτήματα όταν προκύπτει ανάγκη. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το κόστος αποθεμάτων και διακίνησης, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ευελιξία στην εξυπηρέτηση των πελατών (Holmström et al., 2016). Οι εταιρείες μεταφορών, η αεροδιαστημική βιομηχανία και ο κλάδος της ενέργειας αξιοποιούν ήδη αυτό το μοντέλο.

Δεύτερο σημαντικό μοντέλο είναι η μαζική εξατομίκευση (mass customization). Μέσω της ΠΚ οι εταιρείες μπορούν να προσφέρουν εξατομικευμένα προϊόντα σε βιομηχανική κλίμακα, χωρίς το κόστος που συνεπάγεται η κατασκευή μιας σειράς καλουπιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Adidas με τα Futurecraft 4D παπούτσια ή η Stryker με τα εξατομικευμένα ορθοπεδικά εμφυτεύματα. Η δυνατότητα αυτή συνδυάζει την προσωπική εμπειρία του πελάτη με την αποδοτικότητα της βιομηχανικής παραγωγής (Piller & Tseng, 2017).

Ένα τρίτο επιχειρηματικό μοντέλο που συνδέεται με την ΠΚ είναι τα ψηφιακά αποθετήρια ανταλλακτικών (digital spare parts libraries). Οι εταιρείες δημιουργούν βάσεις δεδομένων με αρχεία CAD για κρίσιμα εξαρτήματα, τα οποία μπορούν να παραχθούν σε διαφορετικές τοποθεσίες όταν χρειάζεται. Με αυτό τον τρόπο οι πολυεθνικές μειώνουν την εξάρτηση από κεντρικές αποθήκες και διασφαλίζουν μεγαλύτερη επιχειρησιακή συνέχεια, ιδιαίτερα σε περιόδους κρίσεων ή διαταραχών στις εφοδιαστικές αλυσίδες (Mohr & Khan, 2015).

Επιπλέον, η ΠΚ προωθεί την ανάπτυξη υπηρεσιών ΠΚ (AM-as-a-Service), όπου εξειδικευμένες εταιρείες παρέχουν πρόσβαση σε υποδομές εκτύπωσης χωρίς οι χρήστες να χρειάζεται να επενδύσουν σε δικό τους εξοπλισμό. Το μοντέλο αυτό μειώνει το αρχικό κόστος εισόδου και επιτρέπει σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις να επωφεληθούν από τις δυνατότητες της ΠΚ.

Τέλος, σημαντική καινοτομία αποτελεί το κυκλικό επιχειρηματικό μοντέλο, που βασίζεται στη βιωσιμότητα. Μέσω της ανακύκλωσης πρώτων υλών και της επισκευής εξαρτημάτων με μεθόδους όπως η DED, οι επιχειρήσεις περιορίζουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και δημιουργούν αξία με βάση τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Despeisse et al., 2017).

Συνολικά, η ΠΚ οδηγεί σε ένα νέο τοπίο επιχειρηματικών πρακτικών, όπου η φυσική παραγωγή συνδέεται στενά με ψηφιακές υποδομές και η αξία μετατοπίζεται από τις κλασικές οικονομίες κλίμακας προς τις οικονομίες σκοπού και ευελιξίας. Η εξέλιξη αυτή δεν αφορά μόνο τη μείωση κόστους, αλλά και τη δημιουργία νέων πηγών εσόδων και την προσφορά εξατομικευμένων εμπειριών στους πελάτες.

2.5 Βιωσιμότητα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η ΠΚ αποτελεί μια τεχνολογία που συνδέεται στενά με τη βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική διαχείριση, καθώς μπορεί να μειώσει σημαντικά το υλικό απόβλητο, να βελτιστοποιήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα και να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών CO₂. Σε αντίθεση με τις συμβατικές αφαιρετικές μεθόδους κατεργασίας, όπου μεγάλο μέρος του υλικού χάνεται, η ΠΚ λειτουργεί με προσθήκη υλικού μόνο όπου απαιτείται, μειώνοντας το scrap έως και 90% σε ορισμένες περιπτώσεις (Ford & Despeisse, 2016).

Ένα από τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη αφορά τη μείωση του αποτυπώματος διακίνησης και διανομής (logistics footprint). Η κατ' απαίτηση παραγωγή ανταλλακτικών και εξαρτημάτων, κοντά στο σημείο κατανάλωσης, μειώνει την ανάγκη για μαζική αποθήκευση και τις διεθνείς μεταφορές, περιορίζοντας το περιβαλλοντικό κόστος. Επιπλέον, η ψηφιακή διανομή αρχείων CAD αντικαθιστά τη φυσική διακίνηση προϊόντων, ενισχύοντας την αποδοτικότητα της αλυσίδας αξίας (Gebler et al., 2014).

Η ΠΚ συνεισφέρει και στη μείωση βάρους προϊόντων, ιδιαίτερα στους τομείς της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της ενέργειας. Μέσω τοπολογικής βελτιστοποίησης και ελαφρών δομών lattice, μειώνεται το βάρος εξαρτημάτων, οδηγώντας σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων και εκπομπών CO₂ κατά τη λειτουργία των συστημάτων (Faludi et al., 2017).

Επιπλέον, η ΠΚ δίνει τη δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης υλικών. Υπάρχουν πλέον μέθοδοι που επιτρέπουν την τήξη και επαναξιοποίηση μεταλλικών σκονών ή

πλαστικών υπολειμμάτων για νέα παραγωγή, μειώνοντας την εξάρτηση από παρθένες πρώτες ύλες (Le Bourhis et al., 2013). Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη βιοδιασπώμενων πολυμερών και ανακυκλωμένων υλικών, που συνδέονται με πιο φιλικές προς το περιβάλλον εφαρμογές.

Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ΠΚ δεν είναι αμιγώς θετικές. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας σε τεχνολογίες όπως η PBF και η DED μπορεί να εξισορροπήσει τα οφέλη, ειδικά αν η ενέργεια δεν προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές (Baumers et al., 2017). Παράλληλα, η εκπομπή σωματιδίων και αναθυμιάσεων από ορισμένα πολυμερή ή μεταλλικές σκόνες αποτελεί πρόκληση για την υγεία και την ασφάλεια, απαιτώντας εξειδικευμένα φίλτρα και προστατευτικά μέτρα.

Η συνολική περιβαλλοντική συνεισφορά της ΠΚ εξαρτάται από μια ολιστική ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA). Έρευνες δείχνουν ότι ενώ το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής μπορεί να είναι υψηλότερο ανά τεμάχιο σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους, τα οφέλη σε επίπεδο χρήσης (π.χ. ελαφρύτερα αεροσκάφη, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας) υπερκαλύπτουν τη διαφορά (Matsumoto et al., 2016).

Συνολικά, η ΠΚ ενσωματώνει δυνατότητες που ευθυγραμμίζονται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας: παραγωγή κατά παραγγελία, μείωση αποβλήτων, ελαφρύτερα προϊόντα και ανακυκλώσιμα υλικά. Για να αξιοποιηθούν πλήρως τα οφέλη, απαιτείται εστίαση στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών και στη θεσμοθέτηση προτύπων που θα διασφαλίζουν βιώσιμες πρακτικές σε βιομηχανικό επίπεδο.

2.6 Οικονομικές και στρατηγικές προεκτάσεις της προσθετικής κατασκευής

Η ΠΚ δεν αποτελεί απλώς μία νέα τεχνολογική επιλογή παραγωγής, αλλά ένα στρατηγικό εργαλείο που αναδιαμορφώνει τις παγκόσμιες βιομηχανίες, δημιουργώντας νέες ισορροπίες στην οικονομία, στην εφοδιαστική αλυσίδα, στο ανθρώπινο δυναμικό και στη βιωσιμότητα. Οι οικονομικές επιπτώσεις συνδέονται με την ανακατανομή του κόστους παραγωγής, τη μείωση του αποθέματος, τη δυνατότητα παραγωγής κατά παραγγελία και την ταχύτερη εμπορική διάθεση προϊόντων. Το κόστος παραγωγής ανά μονάδα μπορεί να παραμένει υψηλότερο σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, αλλά η εξοικονόμηση που προκύπτει από τον περιορισμό εργαλείων, την ελαχιστοποίηση τους και την επιτάχυνση του R&D οδηγεί σε συνολική αύξηση της κερδοφορίας (Wohlers & Caffrey, 2023).

Στρατηγικά, η ΠΚ δίνει στις επιχειρήσεις μεγαλύτερη ευελιξία και ανθεκτικότητα. Η δυνατότητα τοπικής και αποκεντρωμένης παραγωγής μειώνει την εξάρτηση από παγκόσμιες εφοδιαστικές αλυσίδες, ενισχύοντας την περιφερειακή αυτονομία. Η πρακτική αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική κατά την πανδημία COVID-19, όταν διαταράχθηκαν οι διεθνείς ροές υλικών και εταιρείες υιοθέτησαν την ΠΚ για την ταχεία κατασκευή κρίσιμων εξαρτημάτων και ιατρικού εξοπλισμού (Attaran, 2020).

Η ΠΚ δημιουργεί νέες επιχειρηματικές προοπτικές. Η ψηφιοποίηση της παραγωγής οδηγεί στη γέννηση νέων μοντέλων βασισμένων σε ψηφιακές βιβλιοθήκες σχεδίων και υπηρεσίες πληρωμής-ανά-εκτύπωση (pay-per-print), που μετατρέπουν την ίδια τη σχεδίαση σε εμπορεύσιμο προϊόν. Επιπλέον, η δυνατότητα εξατομίκευσης προϊόντων σε βιομηχανική κλίμακα ενισχύει την αξία για τον καταναλωτή και διαφοροποιεί τις εταιρείες που υιοθετούν την τεχνολογία.

Παράλληλα, η ΠΚ εντάσσεται στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης, καθώς περιορίζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μέσω ελαφρύτερων προϊόντων, μείωσης των αποβλήτων υλικών και χρήσης βιοσυμβατών ή ανακυκλώσιμων πολυμερών. Η στρατηγική αυτή διάσταση ευθυγραμμίζεται με τις πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης και διεθνών οργανισμών για την κυκλική οικονομία και την κλιματική ουδετερότητα (European Commission, 2020).

Τέλος, οι προεκτάσεις της ΠΚ σε γεωοικονομικό επίπεδο εκτιμάται ότι μπορούν να είναι καθοριστικές. Η τεχνολογία μπορεί να μειώσει την ανάγκη για υπεργολαβική παραγωγή (outsourcing) στο εξωτερικό, ενισχύοντας την εγχώρια παραγωγή και προσφέροντας σε κράτη και περιφέρειες τη δυνατότητα να αποκτήσουν βιομηχανική αυτάρκεια σε κρίσιμους τομείς όπως η άμυνα, η ενέργεια και η υγεία. Έτσι, η ΠΚ εξελίσσεται σε παράγοντα αναδιάταξης της βιομηχανικής ισχύος, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα οικονομιών που υιοθετούν γρήγορα τις δυνατότητές της (Campbell et al., 2022).

Συνολικά, η ΠΚ διαμορφώνει ένα νέο βιομηχανικό και οικονομικό τοπίο. Οι επιχειρήσεις που επενδύουν σε αυτήν δεν αποκτούν μόνο τεχνολογικά πλεονεκτήματα, αλλά και στρατηγικές θέσεις σε μια παγκόσμια αγορά που κινείται προς μεγαλύτερη ευελιξία, βιωσιμότητα και ψηφιακή καινοτομία.

2.7 Σύνοψη Κεφαλαίου

Η ανάλυση του Κεφαλαίου 2 κατέδειξε ότι η ΠΚ δεν αποτελεί πλέον μια απλή τεχνολογική καινοτομία, αλλά έναν στρατηγικό καταλύτη για τον μετασχηματισμό των βιομηχανικών, επιχειρηματικών και κοινωνικοοικονομικών δομών. Σε οικονομικό επίπεδο, η αξιοποίησή της οδηγεί σε μείωση κόστους παραγωγής και χρόνου ανάπτυξης προϊόντων, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα επιχειρήσεων που υιοθετούν την τεχνολογία. Παράλληλα, οι αλυσίδες εφοδιασμού μετασχηματίζονται ριζικά μέσω της μετάβασης σε αποκεντρωμένα μοντέλα παραγωγής και την ανάπτυξη ψηφιακών αποθετηρίων ανταλλακτικών, μειώνοντας την εξάρτηση από πολύπλοκα δίκτυα διακίνησης και διανομής (Wohlers & Caffrey, 2023). Επιπλέον, η ενοποίηση εξαρτημάτων (part consolidation) οδηγεί σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους συναρμολόγησης, καθώς λιγότερα εξαρτήματα συνεπάγονται λιγότερες διεργασίες και χαμηλότερο χρόνο συναρμολόγησης.

Τέλος, οι περιβαλλοντικές και στρατηγικές διαστάσεις αναδεικνύουν την ΠΚ ως βασικό εργαλείο βιώσιμης ανάπτυξης. Η μείωση αποβλήτων, η περιορισμένη κατανάλωση πρώτων υλών και η δυνατότητα τοπικής παραγωγής μειώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ενώ ενισχύεται η στρατηγική αυτονομία κρίσιμων βιομηχανιών, όπως η αεροναυπηγική, η άμυνα και η ενέργεια. Από στρατηγική άποψη, η ΠΚ δημιουργεί νέες αγορές και επιτρέπει την είσοδο σε εξειδικευμένα τμήματα της αγοράς (niche), εφαρμόζοντας τακτικές μαζικής εξατομίκευσης (mass customization) όπως π.χ. στην περίπτωση των εξατομικευμένων ιατρικών εμφυτευμάτων. Παράλληλα, η τεχνολογία δίνει ώθηση στην ανάπτυξη καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων, τα οποία βασίζονται σε υπηρεσίες παραγωγής κατά παραγγελία, στη μαζική εξατομίκευση και στην εκμετάλλευση ψηφιακών πλατφορμών για ανταλλαγή σχεδίων και δεδομένων.

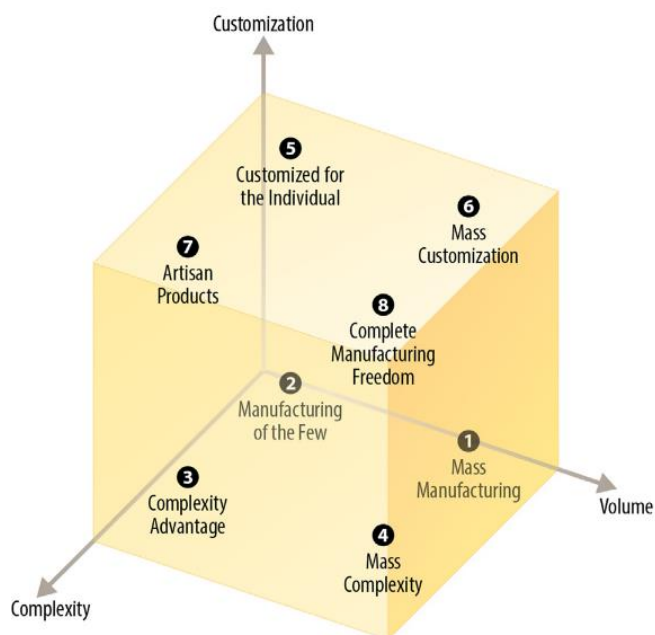
Συνολικά, η ΠΚ διαμορφώνει ένα νέο οικοσύστημα παραγωγής, το οποίο συνδυάζει τεχνολογική καινοτομία, οικονομική αποδοτικότητα, κοινωνικό μετασχηματισμό και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η επιτυχής ενσωμάτωσή της στις βιομηχανικές πρακτικές απαιτεί επενδύσεις στην ανάπτυξη νέων υλικών, την πιστοποίηση των διαδικασιών και την προσαρμογή των επιχειρηματικών μοντέλων. Η διάσταση του ανθρώπινου δυναμικού είναι επίσης κρίσιμη, καθώς αναδύεται η ανάγκη για νέες δεξιότητες που σχετίζονται με τον ψηφιακό σχεδιασμό, τη διαχείριση της ΠΚ και τον ποιοτικό έλεγχο των διεργασιών. Αυτό οδηγεί σε αναδιαμόρφωση της αγοράς εργασίας και σε νέες ευκαιρίες εκπαίδευσης και κατάρτισης.

Κεφάλαιο 3 - Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής

3.1 Πεδία εφαρμογής της Προσθετικής Κατασκευής

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζουμε πώς οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής αξιοποιούνται πρακτικά σε διαφορετικούς κλάδους και συστήματα παραγωγής, ακολουθώντας τη μεθοδολογία ταξινόμησης που πρότειναν οι Conner et al. (2014). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, οι εφαρμογές της τεχνολογίας μπορούν να ταξινομηθούν σε οκτώ περιοχές/πεδία (regions) με βάση τρία κριτήρια (διαστάσεις), τον όγκο παραγωγής (volume), το βαθμό εξατομίκευσης (customization) και τη γεωμετρική πολυπλοκότητα (complexity) κάθε περίπτωσης (Εικ. 2.1). Τα οκτώ αυτά πεδία είναι τα εξής:

1. Μαζική Παραγωγή (Mass Manufacturing),
2. Κατασκευή Μικρών ποσοτήτων (Manufacturing of the Few),
3. Πλεονέκτημα Πολυπλοκότητας (Complexity Advantage),
4. Μαζική Πολυπλοκότητα (Mass Complexity),
5. Εξατομίκευση (Customized for the Individual),
6. Μαζική Εξατομίκευση (Mass Customization),
7. Κατασκευή Τεχνουργημάτων (Artisan Products), και
8. Απόλυτη Ελευθερία Κατασκευής (Complete Manufacturing Freedom).



Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών ΠΚ σε οκτώ πεδία (Conner et al., 2014)

Ας περάσουμε αρχικά στην ανάλυση των παραπάνω πεδίων.

Πεδίο 1: Μαζική παραγωγή

Η μαζική παραγωγή αναφέρεται στην παραγωγή μεγάλου όγκου με ελάχιστη προσαρμογή και χαμηλή πολυπλοκότητα. Παραδοσιακά, οι τεχνολογίες ΠΚ ήταν λιγότερο αποτελεσματικές σε αυτόν τον τομέα λόγω περιορισμών στο κόστος και την ταχύτητα (Conner et al., 2014). Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις στην εξώθηση υλικών και στην απευθείας εναπόθεση υλικού (MJ) ή συνδεδετικού υλικού (BJ) επιτρέπουν πλέον την ενσωμάτωσή τους στις γραμμές παραγωγής, προσφέροντας αυξημένη παραγωγικότητα και μείωση κόστους (Gibson et al., 2021; ISO/ASTM, 2015). Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής που ταξινομούνται στο πεδίο 1 εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MJ, η οποία επιτρέπει τη μαζική παραγωγή μεταλλικών ή κεραμικών εξαρτημάτων χαμηλού κόστους, και της τεχνολογίας BJ, η οποία επιτυγχάνει υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης και είναι κατάλληλη για βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Rayna & Striukova, 2016).

Πεδίο 2: Κατασκευή μικρών ποσοτήτων

Η κατασκευή μικρών ποσοτήτων αφορά την παραγωγή περιορισμένων σειρών προϊόντων, που χρησιμοποιούνται κυρίως για σκοπούς δοκιμών, πρωτοτυποποίησης, συντήρησης ή επισκευής (Conner et al., 2014). Σε αυτό το πεδίο, οι τεχνολογίες ΠΚ έχουν καθοριστική σημασία, καθώς επιτρέπουν την άμεση κατασκευή εξαρτημάτων χωρίς την ανάγκη για καλούπια ή δαπανηρές γραμμές παραγωγής (Gibson et al., 2021). Τυπικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η αξιοποίηση της μεθόδου DED για την κατασκευή ή επισκευή μεγάλων μεταλλικών εξαρτημάτων, όπως είναι τα εξαρτήματα αεροπορικών κινητήρων και βιομηχανικού εξοπλισμού, επιτρέποντας την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τους και τη μείωση του κόστους αντικατάστασης (Thompson et al., 2016). Αντίστοιχα, η τεχνολογία SL χρησιμοποιείται για την παραγωγή μοντέλων και εξαρτημάτων μεγάλης κλίμακας, ειδικά όταν δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις πολυπλοκότητας, προσφέροντας υψηλή ακρίβεια επιφανείας και δυνατότητα γρήγορης κατασκευής (ISO/ASTM 52900:2015). Συνολικά, η χρήση της ΠΚ σε μικρούς όγκους παραγωγής προσφέρει ευελιξία σχεδίασης, μειωμένους χρόνους παράδοσης και οικονομικά αποδοτική παραγωγή κατά παραγγελία εξαρτημάτων για ειδικές εφαρμογές, γεγονός που ενισχύει τη στρατηγική σημασία της στο σύγχρονο βιομηχανικό πεδίο (Rayna & Striukova, 2016).

Πεδίο 3: Πλεονέκτημα Πολυπλοκότητας

Η ΠΚ εισάγει μια νέα παράμετρο στην παραγωγή, καθώς επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών χωρίς σημαντικό επιπλέον κόστος (Lipson & Kurman, 2013), γεγονός που έχει αποδοθεί στη βιβλιογραφία και ως «η πολυπλοκότητα είναι δωρεάν» (complexity for free). Η δυνατότητα αυτή προσφέρει στρατηγικά πλεονεκτήματα, ιδίως σε τομείς που απαιτούν τοπολογικά βελτιστοποιημένα εξαρτήματα, δομές πλέγματος ή εσωτερικά κανάλια ψύξης και θέρμανσης (Gibson et al., 2021). Ενδεικτικά, η μέθοδος PBF αξιοποιείται για την παραγωγή μεταλλικών και πολυμερών εξαρτημάτων με πολύπλοκες εσωτερικές δομές και υψηλή μηχανική αντοχή, ενώ η VP δίνει τη δυνατότητα παραγωγής εξαρτημάτων με υψηλή ακρίβεια και λεπτομέρεια, που βρίσκουν εφαρμογή σε βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας (Thompson et al., 2016). Η συγκεκριμένη περιοχή εφαρμογής αναδεικνύει τη βασική διαφοροποίηση της ΠΚ από τις συμβατικές μεθόδους, καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση λειτουργικών χαρακτηριστικών σε επίπεδο σχεδιασμού, μειώνοντας τον αριθμό εξαρτημάτων και την ανάγκη για συναρμολόγηση (Rayna & Striukova, 2016).

Πεδίο 4 : Μαζική Πολυπλοκότητα

Η μαζική πολυπλοκότητα αναφέρεται στην ικανότητα της ΠΚ να παράγει μεγάλες ποσότητες εξαρτημάτων που συνδυάζουν υψηλή γεωμετρική πολυπλοκότητα με αυξημένες απαιτήσεις λεπτομέρειας και μηχανικής απόδοσης. Αν και στο παρελθόν η ΠΚ θεωρούνταν ακατάλληλη για τέτοιου είδους εφαρμογές λόγω περιορισμών κόστους και ταχύτητας, οι πρόσφατες εξελίξεις σε τεχνολογίες όπως η MJ και η PBF έχουν ανοίξει νέες δυνατότητες (Gibson et al., 2021). Η MJ προσφέρει δυνατότητα παραγωγής προϊόντων με υψηλή λεπτομέρεια, πολύχρωμα χαρακτηριστικά και συνδυασμό διαφορετικών υλικών, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία ελκυστική για διακοσμητικά αντικείμενα και καταναλωτικά αγαθά. Η μέθοδος PBF, αντίστοιχα, έχει καθιερωθεί σε κλάδους όπως η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς επιτρέπει ελευθερία σχεδιασμού και την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων μεγάλης ακρίβειας και υψηλής αντοχής σε σχετικά μεγάλες ποσότητες, οδηγώντας έτσι σε νέες μορφές βιομηχανικής και καταναλωτικής καινοτομίας (Rayna & Striukova, 2016).

Πεδίο 5: Εξατομίκευση

Η εξατομίκευση αποτελεί, ίσως, την πιο χαρακτηριστική καινοτομία που εισάγει η ΠΚ, καθώς δίνει τη δυνατότητα παραγωγής προϊόντων ακριβώς προσαρμοσμένων στις ανάγκες κάθε χρήστη. Η χρήση σαρώσεων ή δεδομένων βιομετρίας επιτρέπει την κατασκευή απόλυτα εξατομικευμένων ιατρικών εμφυτευμάτων, εργονομικών εξαρτημάτων και καταναλωτικών αγαθών (Mellor et al., 2014). Η μέθοδος VP αξιοποιείται για την παραγωγή εξατομικευμένων

προϊόντων υψηλής ακρίβειας, όπως ιατρικά καλούπια και οδοντιατρικά βοηθήματα. Αντίστοιχα, η τεχνική MJ επιτρέπει τη δημιουργία πολύχρωμων και πολύπλοκων εξατομικευμένων αντικειμένων, ενώ η ΜΕ αποτελεί λύση χαμηλού κόστους για την ταχεία και οικονομική παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων (Gibson et al., 2021). Εφαρμογές που ταξινομούνται στο συγκεκριμένο πεδίο υπογραμμίζουν τη σημασία της ΠΚ ως καταλύτη στη μετάβαση προς εξατομικευμένα προϊόντα, με σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο (Rayna & Striukova, 2016).

Πεδίο 6: Μαζική Εξατομίκευση

Η μαζική εξατομίκευση συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της εξατομίκευσης με την αποδοτικότητα της μαζικής παραγωγής, επιτρέποντας τη δημιουργία χιλιάδων ή και εκατομμυρίων μοναδικών προϊόντων χωρίς αλλαγές στη γραμμή παραγωγής (Pine, 1993). Η δυνατότητα αυτή έχει ενισχυθεί σημαντικά με την υιοθέτηση τεχνολογιών ΠΚ που υποστηρίζουν υψηλό όγκο παραγωγής, όπως οι μέθοδοι MJ και BJ, που επιτρέπουν τη μαζική παραγωγή εξατομικευμένων εξαρτημάτων σχετικά χαμηλού κόστους, αλλά και η μέθοδος PBF, η οποία χρησιμοποιείται στην παραγωγή προϊόντων υψηλότερης αξίας από μέταλλα ή πολυμερή (Conner et al., 2014). Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών δίνει τη δυνατότητα σε κλάδους όπως η παραγωγή ιατρικών προϊόντων, προϊόντων ένδυσης και καταναλωτικών αγαθών να μεταβούν σε νέα επιχειρηματικά μοντέλα όπου η εξατομίκευση είναι πλέον ο κανόνας και όχι η εξαίρεση (Anderson, 2012).

Πεδίο 7: Κατασκευή τεχνουργημάτων

Η ΠΚ έχει δημιουργήσει νέες προοπτικές στον χώρο των παραγωγής τεχνουργημάτων, όπου η αισθητική αξία και η προσωπική έκφραση υπερισχύουν έναντι της μαζικής παραγωγής. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κοσμήματα, έργα τέχνης και αρχιτεκτονικές διακοσμήσεις, τα οποία επωφελούνται από την ικανότητα της ΠΚ να προσφέρει μοναδικότητα και εξαιρετική λεπτομέρεια (Kuznetsov et al., 2018). Η μέθοδος MJ αξιοποιείται για την παραγωγή πολύχρωμων και περίτεχνων αντικειμένων, ενώ η μέθοδος VP επιτρέπει τη δημιουργία διακοσμητικών μοντέλων μεγάλης γεωμετρικής πολυπλοκότητας και υψηλού βαθμού λεπτομέρειας με υψηλή ακρίβειας. Η χρήση της ΠΚ με αυτό τον τρόπο αναδιαμορφώνει και την ίδια την έννοια του καλλιτεχνικού προϊόντος / τεχνουργήματος, καθώς επιτρέπει το συνδυασμό παραδοσιακών τεχνικών με τη σύγχρονη ψηφιακή κατασκευή (Ford & Despeisse, 2016).

Πεδίο 8: Απόλυτη Ελευθερία Κατασκευής

Το πεδίο της απόλυτης ελευθερίας κατασκευής αντιπροσωπεύει την κορυφή των δυνατοτήτων της ΠΚ, καθώς αξιοποιεί στο έπακρο την ευελιξία που παρέχουν οι ψηφιακές διαδικασίες σχεδιασμού και παραγωγής. Σε αυτό το πλαίσιο, η ΠΚ δεν περιορίζεται στην παραγωγή πρωτοτύπων ή εργαλείων, αλλά εφαρμόζεται σε τελικά προϊόντα που συνδυάζουν υψηλή πολυπλοκότητα, μηχανική απόδοση και εξατομίκευση (Gibson et al., 2021). Το κοινό χαρακτηριστικό των εφαρμογών που ταξινομούνται στο πεδίο αυτό είναι ότι η εκμετάλλευση της σχεδιαστικής ελευθερίας για την κατάργηση των περιορισμών που επιβάλλει η συμβατική κατασκευή, επιτρέποντας έτσι την παραγωγή κομματιών με εσωτερικά κανάλια, τοπολογικά βελτιστοποιημένων εξαρτημάτων και οργανικών μορφών, τα οποία δεν θα ήταν εφικτό να παραχθούν με παραδοσιακές μεθόδους (Rosen, 2007).

Η προσέγγιση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία σε βιομηχανίες αιχμής όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική τεχνολογία και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η ανάγκη για καινοτόμες λύσεις υψηλής απόδοσης είναι κρίσιμη. Η δυνατότητα συνδυασμού εξατομίκευσης με την ελευθερία σχεδιασμού ενισχύει την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων και ανοίγει τον δρόμο για την καθιέρωση μιας νέας εποχής στην παραγωγή, όπου η καινοτομία περιορίζεται όχι τόσο από τις δυνατότητες της τεχνολογίας αλλά περισσότερο από τη φαντασία του σχεδιαστή (Conner et al., 2014; Ford & Despeisse, 2016).

3.2 Μελέτη εφαρμογών Προσθετικής Κατασκευής

Το προαναφερθέν μεθοδολογικό πλαίσιο αυτό λειτουργεί ως «χάρτης» και μας βοηθά να εξηγήσουμε γιατί μία τεχνολογία ευδοκμεί σε ένα πεδίο, ενώ μια άλλη προσφέρει ανώτερη αξία αλλού. Το παραπάνω πλαίσιο μπορεί, επίσης να αποτελέσει τη βάση για μια ταξινόμηση πραγματικών περιπτώσεων εφαρμογής των συγκεκριμένων τεχνολογιών σε επιμέρους κλάδους και εφαρμογές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει σε αυτή την περίπτωση η συστηματική αποτύπωση των εφαρμογών των τεχνολογιών ΠΚ στην παραγωγή τελικών προϊόντων, η οποία απουσιάζει σε μεγάλο βαθμό από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Με στόχο να καλυφθεί το συγκεκριμένο κενό διενεργήθηκε μια ενδελεχής μελέτη της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, και του ειδικού τύπου έτσι ώστε να συγκροτηθεί ένας κατάλογος επιχειρήσεων που αποτυπώνουν την παρούσα κατάσταση στο χώρο των εφαρμογών της τεχνολογίας ΠΚ στις παραγωγικές διαδικασίες. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν επιχειρήσεις/περιπτώσεις που αξιοποιούν την τεχνολογία για την παραγωγή τελικών προϊόντων είτε εξ ολοκλήρου είτε για τμήματα αυτών, όπως είναι η περίπτωση

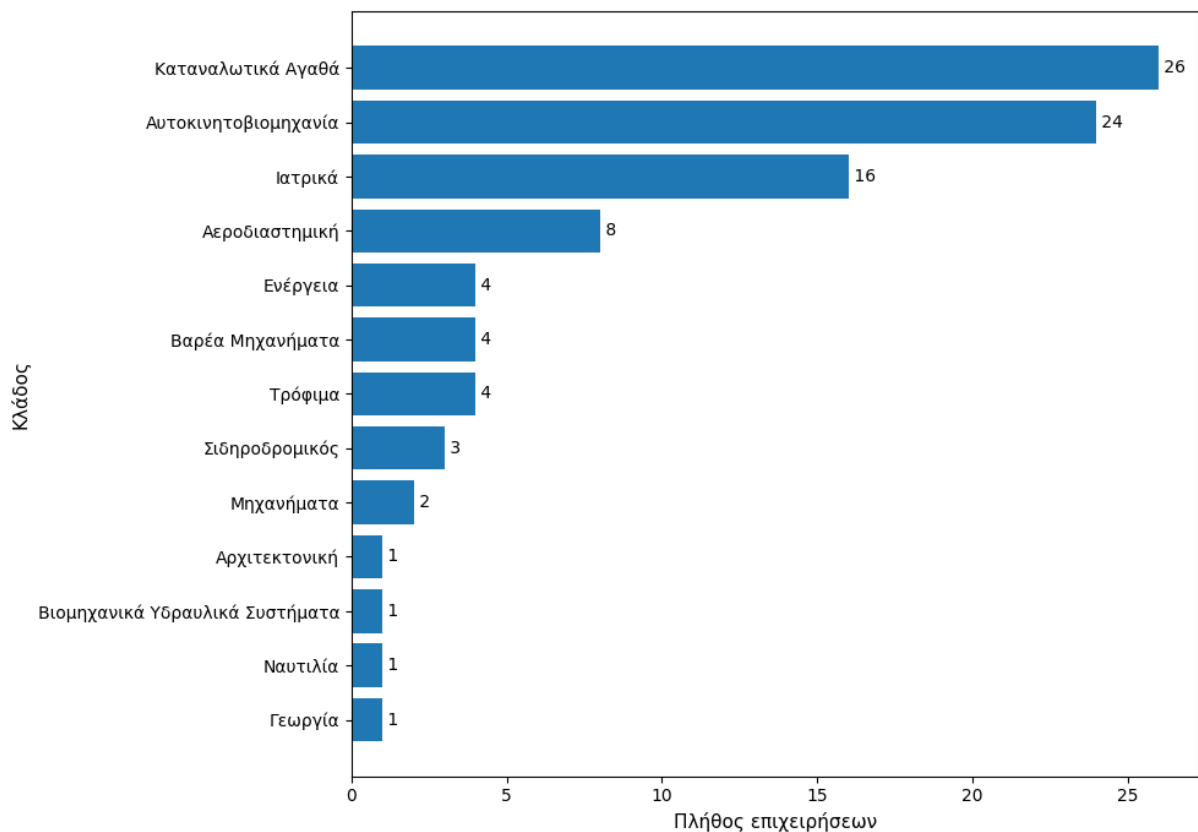
κατασκευής εξαρτημάτων για σύνθετα προϊόντα συναρμολόγησης. Από την άλλη πλευρά, αποκλείστηκαν από την ανάλυση επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν την τεχνολογία στην κατασκευή πρωτοτύπων και μοντέλων σχεδιασμού (design prototypes and models), καθώς η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ενδελεχώς μελετημένη και καταγεγραμμένη στη διεθνή βιβλιογραφία. Αποκλείστηκαν, επίσης, από το δείγμα περιπτώσεις εφαρμογών που έχουν παραγωγικό προσανατολισμό αλλά είναι ακόμα σε πρώιμο διερευνητικό/δοκιμαστικό στάδιο (π.χ. διάφορες εφαρμογές στο πεδίο της αεροδιαστημικής και της βιοτεχνολογίας) ή έχουν παύσει να υλοποιούνται. Τέλος, ενσωματώθηκαν στο δείγμα περιπτώσεις επιχειρήσεων που χρησιμοποιούν τις μεθόδους ΠΚ για την κατασκευή εργαλείων παραγωγής (tooling), όπως καλούπια χύτευσης, μήτρες, ιδιοσυσκευές κλπ., εφόσον τα συγκεκριμένα εργαλεία χρησιμοποιούνταν στην καθαυτό παραγωγή και όχι στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πρωτοτύπων ή μοντέλων σχεδιασμού.

Τα σχετικά δεδομένα προήλθαν από τέσσερις πηγές: α) επιστημονική βιβλιογραφία με χρήση των μηχανών αναζήτησης *Google Scholar* και *Scopus*, β) εξειδικευμένα μέσα επαγγελματικής πληροφόρησης σχετικά με την ΠΚ, όπως τα *3D Printing Media Network*, *additivemanufacturing.media*, *3dprint.com*, *voxelmatters.com* και *metal-am.com*, γ) ιστότοποι κατασκευαστών εξοπλισμού ΠΚ, όπως οι ιστότοποι των *Stratasys*, *3D Systems*, *Carbon*, *HP*, *EOS* κ.α. και δ) από τις επίσημες ιστοσελίδες των επιχειρήσεων που παράγουν υπεργολαβικά ή διαθέτουν τα συγκεκριμένα προϊόντα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε η εγκυρότητα και η επικαιρότητα των πληροφοριών, ενώ το τελικό σύνολο εταιρειών αντιπροσωπεύει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της βιομηχανικής αξιοποίησης των τεχνολογιών ΠΚ σε διαφορετικούς κλάδους.

Ο τελικός αναλυτικός κατάλογος με τις επιχειρήσεις του δείγματος και τις επιμέρους πληροφορίες παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α. Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύονται αρχικά τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της μελέτης ως προς τα χαρακτηριστικά των επιχειρήσεων (κλάδος, προϊόν, μέγεθος κλπ.) και των επιμέρους τεχνολογιών (μέθοδος, υλικά, όγκος παραγωγής κλπ.). Στη συνέχεια, γίνεται μια περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά κλάδο εστιάζοντας σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις επιχειρήσεων, έτσι ώστε να καταστεί πιο ευκρινής η σχέση μεταξύ συγκεκριμένων τεχνικών και των αντίστοιχων παραγωγικών εφαρμογών, αλλά και να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα και οι προκλήσεις που εμφανίζονται σε διαφορετικά πλαίσια εφαρμογής.

3.3 Μελέτη εφαρμογών Προσθετικής Κατασκευής

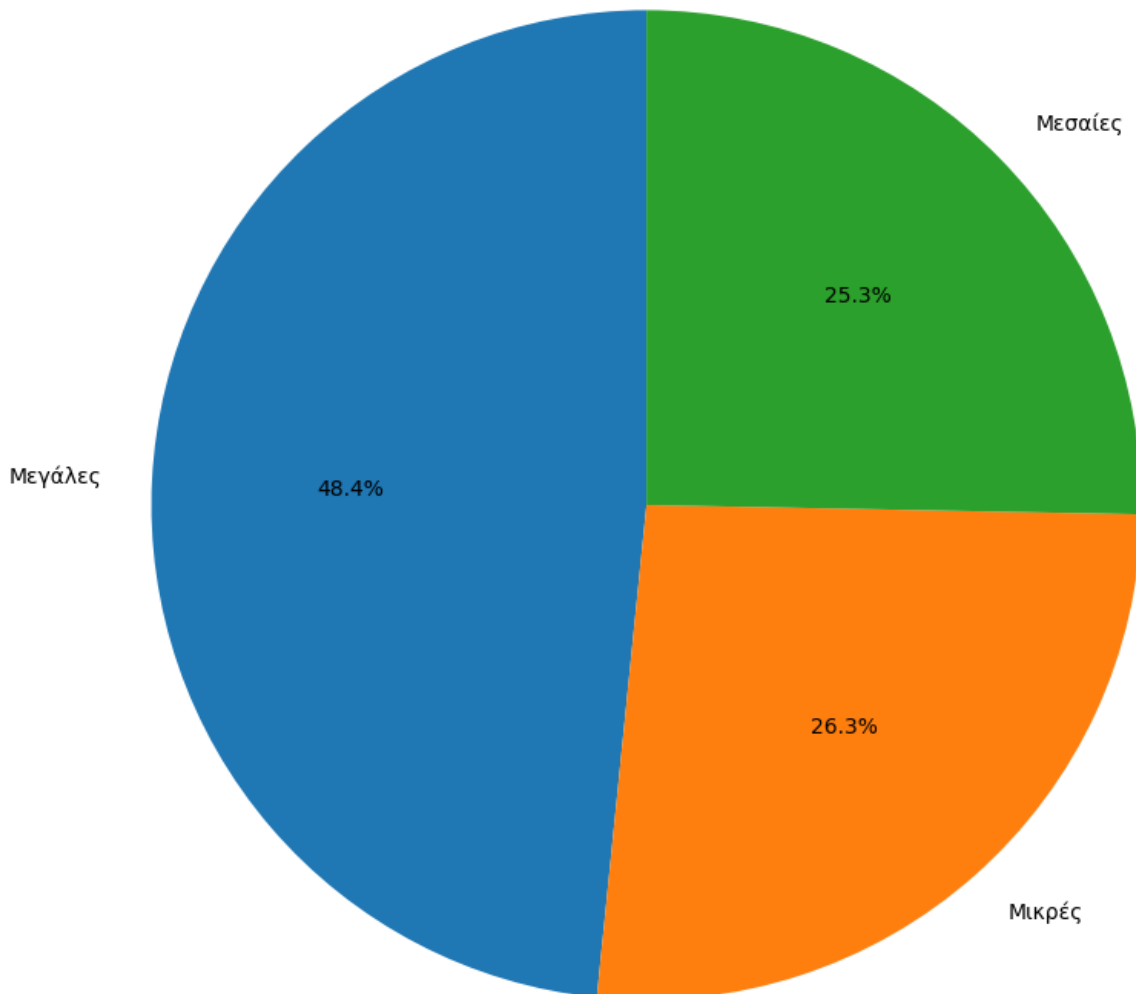
Η μελέτη των προαναφερθέντων πηγών οδήγησε στην εξεύρεση πλήθους περιπτώσεων εφαρμογών της τεχνολογίας ΠΚ από τις οποίες 95 αφορούσαν σε παραγωγικές εφαρμογές. Όπως φαίνεται και από το γράφημα στο Σχήμα 2 οι επιχειρήσεις του δείγματος καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών κλάδων. Πιο συγκεκριμένα, οι επιχειρήσεις που αξιοποιούν παραγωγικά την Προσθετική Κατασκευή ανήκουν στους κλάδους των καταναλωτικών αγαθών (26), της αυτοκινητοβιομηχανίας (24) και των ιατρικών προϊόντων/παροχής υπηρεσιών υγείας σε αριθμό (16). Άλλοι κλάδοι στους οποίους χρησιμοποιείται παραγωγικά η ΠΚ είναι αυτοί της αεροδιαστημικής, των βαρέων οχημάτων και του βιομηχανικού εξοπλισμού, των τροφίμων, της ενέργειας, του σιδηροδρομικού εξοπλισμού, της γεωργικής παραγωγής και της ναυτιλίας.



Σχήμα 2. Κατανομή επιχειρήσεων δείγματος ανά κλάδο δραστηριότητας.

Από πλευράς μεγέθους, οι επιχειρήσεις που αξιοποιούν σε μεγαλύτερη κλίμακα την Προσθετική Κατασκευή είναι μεγάλες (>249 εργαζόμενοι/-ες και κύκλος εργασιών >50 εκατ. €) ενώ ακολουθούν οι μεσαίες επιχειρήσεις (50–249 εργαζόμενοι/-ες και κύκλος εργασιών 10–50 εκατ. €) και οι μικρές επιχειρήσεις (<50 εργαζόμενοι/-ες και κύκλος εργασιών που κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 εκατ. €). Τα σχετικά ποσοστά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3 όπου

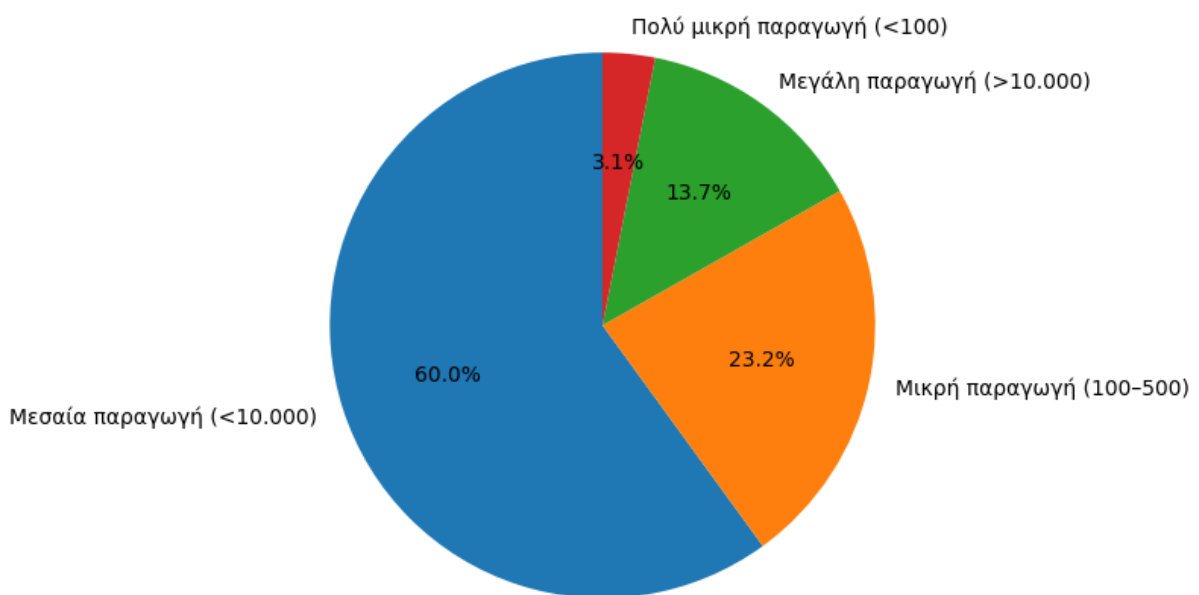
είναι εμφανής η κυριαρχία των μεγάλων επιχειρήσεων με ποσοστό 48.4%, όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ ακολουθούν οι μικρές επιχειρήσεις με ποσοστό 26.3% και οι μεσαίες επιχειρήσεις με ποσοστό 25.3%. Ωστόσο, η σχετικά μεγάλη αθροιστική παρουσία μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων δείχνει τη δυνατότητα αποτελεσματικής χρήσης της τεχνολογίας σε καινοτόμες και εξειδικευμένες εφαρμογές.



Σχήμα 3: Κατανομή επιχειρήσεων δείγματος ανά μέγεθος.

Ακολούθως, στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η κατανομή των εφαρμογών που εντοπίστηκαν συναρτήσει του ετήσιου όγκου παραγωγής, ο οποίος πλέον αποτιμάται σε τέσσερα επίπεδα: πολύ μικρή (μέχρι 100 τεμάχια/έτος), μικρή (100–500 τεμάχια/έτος), μεσαία (μερικές εκατοντάδες/χιλιάδες τεμάχια/έτος, <10.000) και μεγάλη παραγωγή (>10.000 τεμαχίων/έτος).

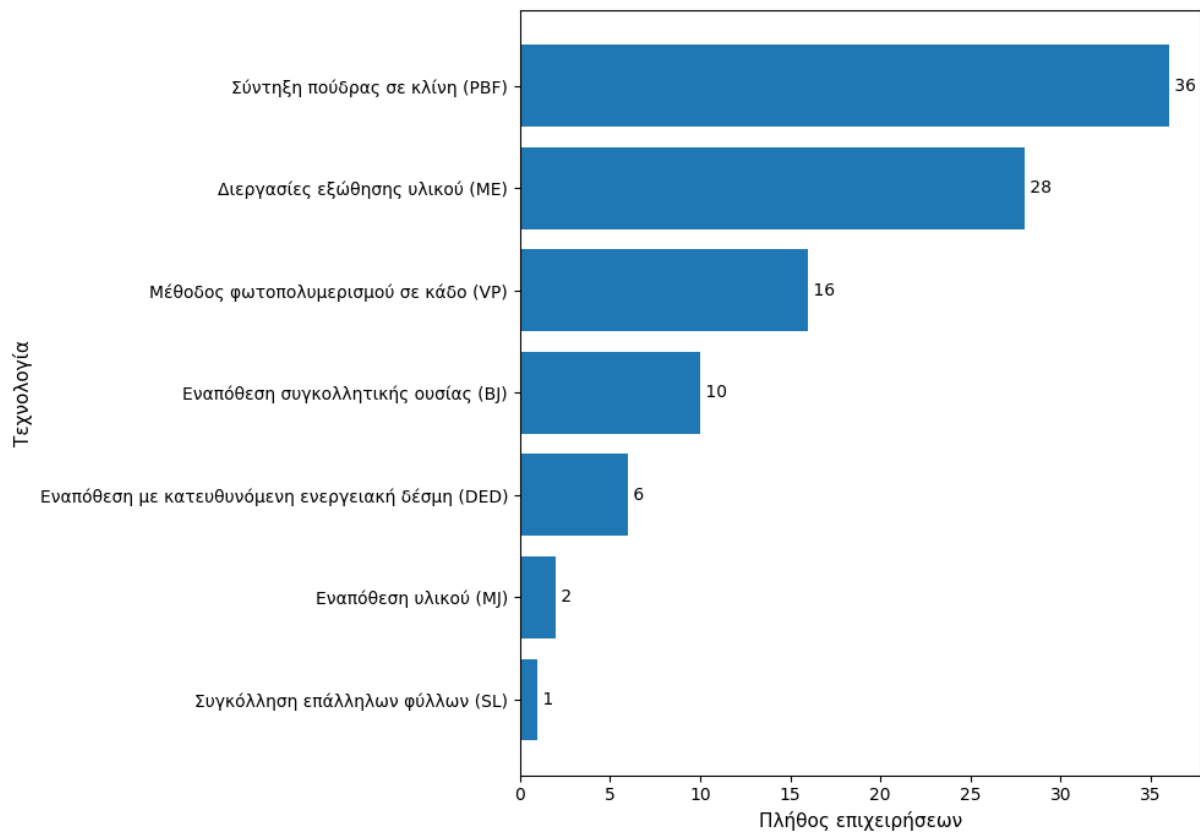
Όπως είναι εμφανές, στην πλειονότητα των περιπτώσεων η ΠΚ χρησιμοποιείται για μεσαίας κλίμακας παραγωγή τελικών προϊόντων (60.0%), αξιοποιώντας την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα της τεχνολογίας, όπως ήταν εν μέρει αναμενόμενο. Σχετικά υψηλό, ωστόσο, είναι και το ποσοστό περιπτώσεων μεγάλης παραγωγής (13.7%), το οποίο δείχνει ότι σε ορισμένες εφαρμογές υπάρχει ένα επίπεδο ωριμότητας που επιτρέπει την οικονομικά βιώσιμη μαζική παραγωγή. Παράλληλα, η κατηγορία μικρού όγκου παραγωγής (23.2%) αποτελεί σημαντικό ποσοστό των περιπτώσεων και συνδέεται με παραγωγές περιορισμένων ποσοτήτων που αξιοποιούν την ευελιξία και τον μειωμένο χρόνο μετάβασης από τον σχεδιασμό στο τελικό προϊόν. Τέλος, παρατηρείται και ένα μικρό ποσοστό (3.1%) εφαρμογών πολύ μικρού όγκου παραγωγής, το οποίο συνδέεται συνήθως με εξειδικευμένα προϊόντα και εργαλεία παραγωγής.



Σχήμα 4: Κατανομή καταγεγραμμένων παραγωγικών εφαρμογών ΠΚ ανά επίπεδο όγκου παραγωγής.

Το καταγεγραμμένο δείγμα εφαρμογών δίνει και μια καλή απεικόνιση του εύρους χρήσης κάθε τεχνολογίας ΠΚ στο παραγωγικό πεδίο. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5 η τεχνολογία με τις περισσότερες εφαρμογές είναι αυτή της σύντηξης πούδρας σε κλίνη (PBF), με 36 καταγεγραμμένες αναφορές, επιβεβαιώνοντας τη δεσπόζουσα θέση της στην παραγωγή μεταλλικών αλλά και πλαστικών εξαρτημάτων υψηλής αντοχής και ακρίβειας. Η ευρεία υιοθέτησή της συνδέεται με βιομηχανικούς τομείς όπου απαιτούνται μηχανικές ιδιότητες συγκρίσιμες με αυτές των παραδοσιακά κατεργασμένων μετάλλων, όπως η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία. Ακολουθεί η τεχνολογία της εξώθησης υλικού με 28 εντοπισθείσες περιπτώσεις που σχετίζονται κυρίως με την παραγωγή προϊόντων σχετικά χαμηλότερου κόστους αλλά με μεγάλο εύρος εφαρμογών. Σχετικά υψηλό και το ποσοστό χρήσης συστημάτων φωτοπολυμερισμού σε κάδο, όπου καταγράφηκαν 16 περιπτώσεις, κυρίως σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως οδοντιατρικά και βιοϊατρικά εξαρτήματα, αξιοποιώντας την εξαιρετική επιφανειακή ποιότητα που προσφέρει η διεργασία. Αντίστοιχο ποσοστό καταγράφεται και για την τεχνολογία της εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας (10 περιπτώσεις) που χρησιμοποιείται κυρίως στη μαζική παραγωγή πλαστικών προϊόντων. Από την άλλη πλευρά, οι μέθοδοι εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας και εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη εμφανίζονται με αρκετά χαμηλότερη συχνότητα, συνδεδεμένες με εξειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές και μικρή παραγωγή αντικειμένων υψηλής προστιθέμενης αξίας, ενώ καταγράφηκε μία εφαρμογή της μεθόδου συγκόλλησης επάλληλων

φύλλων.

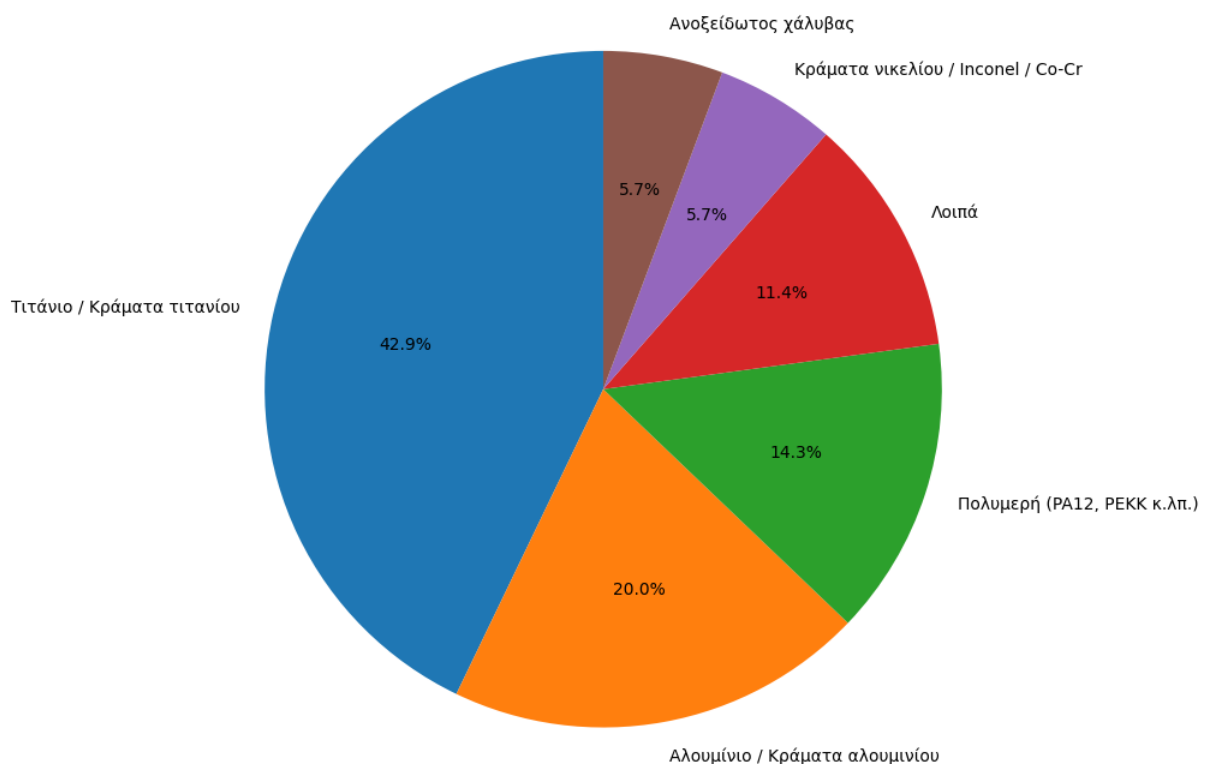


Σχήμα 5: Κατανομή τεχνολογιών που αξιοποιούν οι κλάδοι για την Προσθετική Κατασκευή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η παρατήρηση ότι αρκετές από τις επιχειρήσεις του δείγματος (4 επιχειρήσεις), που χρησιμοποιούν περισσότερες από μία τεχνολογίες, εκμεταλλεύομενες τις δυνατότητες που προσφέρει κάθε μία από αυτές σε διαφορετικές εφαρμογές. Οι παρατηρούμενοι συνδυασμοί τεχνολογιών έχουν συνήθως ως κοινό την οικογένεια υλικών που κατεργάζονται π.χ. συνδυασμένη χρήση σύντηξης πούδρας σε κλίνη και εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη για κατεργασία μετάλλων, και συνδυασμένη χρήση τεχνικών φωτοπολυμερισμού και εξώθησης υλικού. Αυτές οι στρατηγικές επιλογές δείχνουν τεχνολογική ωριμότητα και προσανατολισμό στην καινοτομία, αφού οι εταιρείες επενδύουν σε συστήματα που συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες για να επιτύχουν ευελιξία παραγωγής, μειωμένο χρόνο ανάπτυξης προϊόντων και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

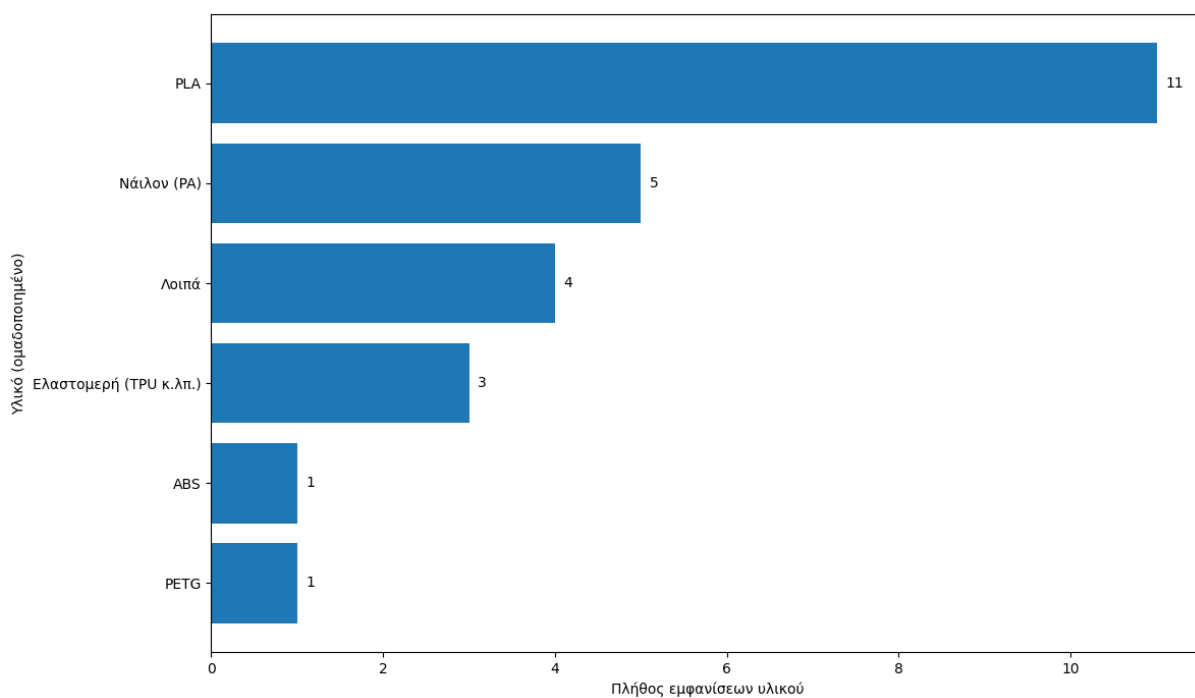
Η ανάλυση της έρευνας συνεχίζει με την αποτύπωση των υλικών που αξιοποιούνται στην κάθε τεχνολογία. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η κατανομή υλικών που χρησιμοποιούνται σε

εφαρμογές σύντηξης πούδρας σε κλίνη όπου κυριαρχούν οι μεταλλικές πούδρες που ικανοποιούν απαιτήσεις υψηλής μηχανικής απόδοσης, θερμικής/διαβρωτικής ανθεκτικότητας και πιστοποίησης. Όπως γίνεται αντιληπτό, δεσπόζουσα θέση έχουν το τιτάνιο και τα κράματά του με ποσοστό 42.9%, το αλουμίνιο και τα κράματά του με ποσοστό 20.0%, το νικέλιο και τα κράματά του με ποσοστό 5.7% και τα πολυμερή με ποσοστό 14.3%. Η κατηγορία «Λοιπά» που αντιπροσωπεύει το 11.4%, αναφέρεται σε συνδυασμό μεταλλικών κραμάτων από τις παραπάνω κατηγορίες, αλλά και χάλυβα ή/και χαλκού.



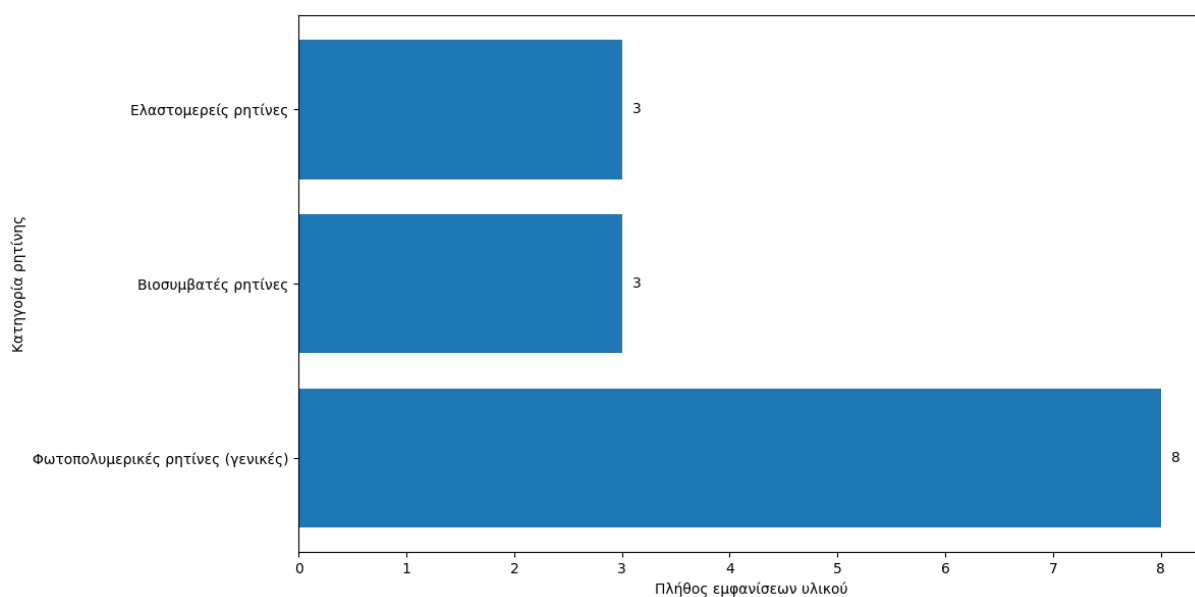
Σχήμα 6: Κατανομή υλικών που αξιοποιούνται στην τεχνολογία σύντηξη πούδρας σε κλίνη.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται τα υλικά τα οποία αξιοποιούνται στην παραγωγή προϊόντων/εργαλείων με διεργασίες εξώθησης υλικού. Όπως είναι εμφανές, επικρατέστερο υλικό είναι το PLA (11 εφαρμογές) και ακολουθούν διάφοροι τύποι πολυαμιδίου (νάιλον) με 5 καταγεγραμμένες εφαρμογές και τα ελαστομερή με 3. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η παρατήρηση ότι το ABS, το πρώτο και πιο δημοφιλές υλικό κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της τεχνολογίας χρησιμοποιείται σε μόνο 1 εφαρμογές.



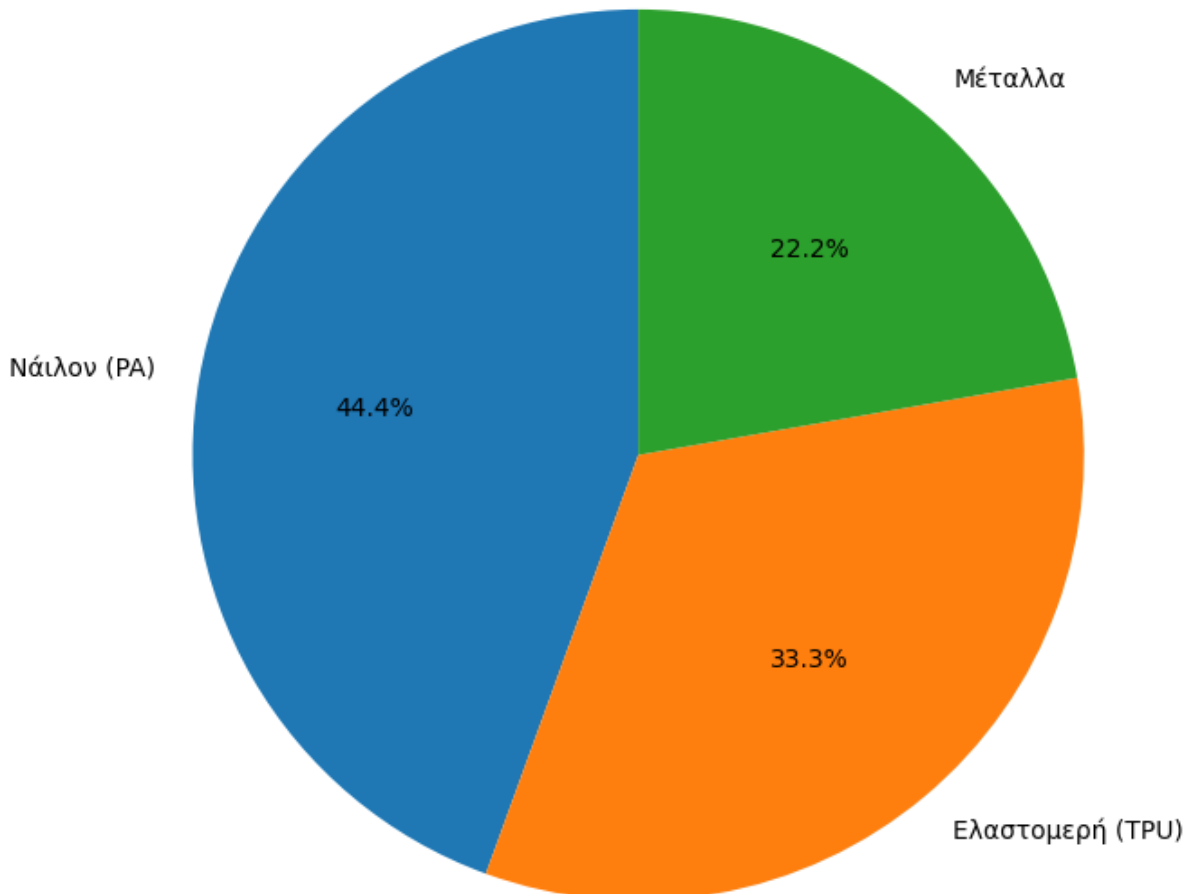
Σχήμα 7: Κατανομή υλικών που αξιοποιούνται σε διεργασίες εξώθησης υλικού.

Σε ότι αφορά στην τεχνολογία φωτοπολυμερισμού σε κάδο (Σχήμα 8) όπως αναμενόταν το σύνολο των χρησιμοποιούμενων υλικών ανήκει στην κατηγορία των φωτοπολυμερών ρητινών, είτε γενικής χρήσης (8 εφαρμογές) είτε πιο εξειδικευμένου χαρακτήρα με 3 περιπτώσεις να αφορούν σε βιοσυμβατές ρητίνες και 3 σε ελαστομερείς ρητίνες.



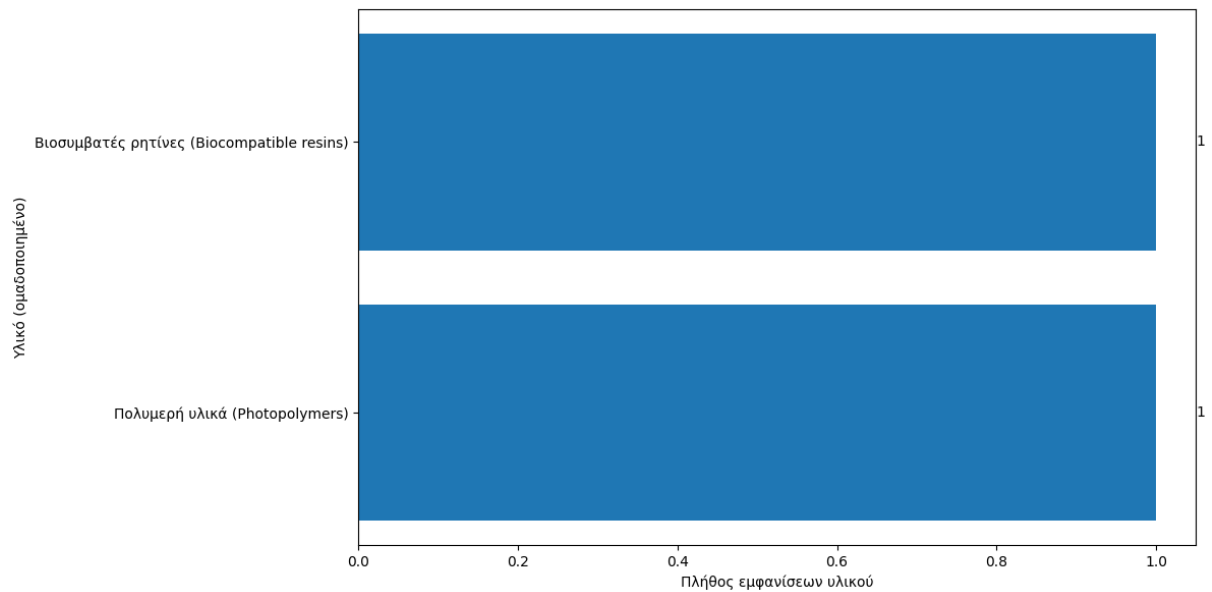
Σχήμα 8: Κατανομή υλικών που αξιοποιούνται σε εφαρμογές φωτοπολυμερισμού σε κάδο.

Στην περίπτωση της εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος υλικών που ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών αλλά και των μεταλλικών και κεραμικών υλικών (Σχήμα 9). Σε κάθε περίπτωση, σημαντικό στάδιο της διαδικασίας που συνδέεται άμεσα και με το επιλεγθέν υλικό είναι αυτό της μετέπειτα πυροσυσσωμάτωσης/διήθησης, καθώς επηρεάζει άμεσα τις τελικές ιδιοτήτων και τη διαστατική ακρίβεια.



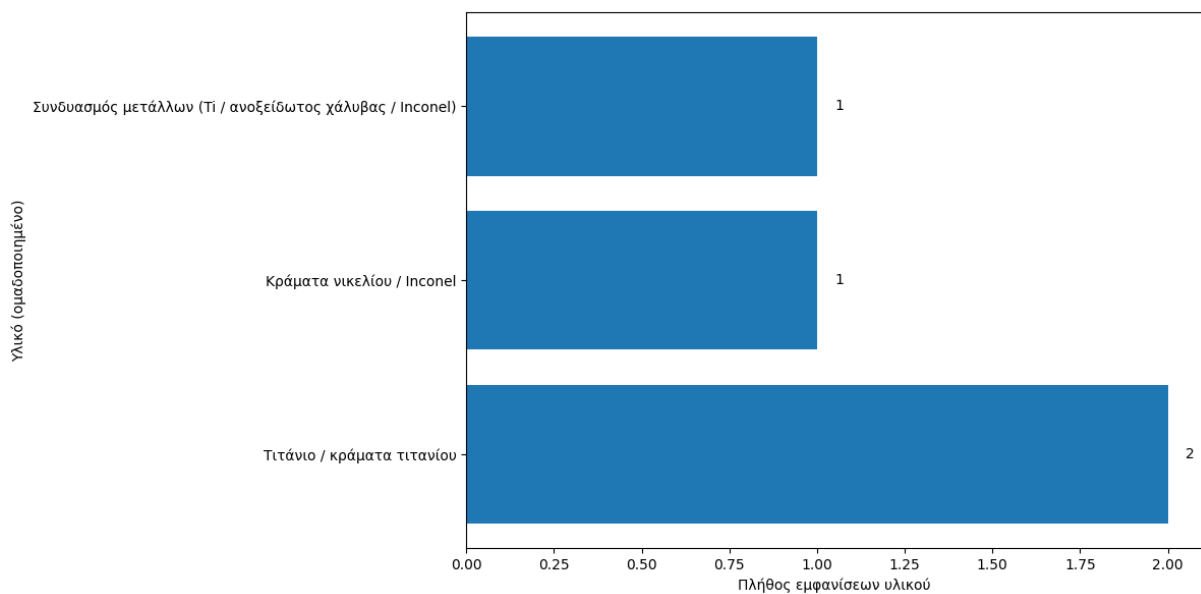
Σχήμα 9: Κατανομή υλικών που αξιοποιούνται σε παραγωγικές εφαρμογές της μεθόδου εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας.

Στην περίπτωση της εναπόθεσης υλικού τα χρησιμοποιούμενα υλικά ανήκουν στην οικογένεια των φωτοπολυμερών και σε μία περίπτωση στην οικογένεια των βιοσυμβατών ρητινών, ειδικότερα (Σχήμα 10). Τα συγκεκριμένα υλικά θεωρούνται κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας σε συνδυασμό με ιδιαίτερες οπτικές ιδιότητες (χρώμα, διαύγεια) ικανοποιώντας παράλληλα κάποιους βασικούς περιορισμούς αντοχής και θερμοκρασίας.



Σχήμα 10: Κατανομή υλικών που αξιοποιούνται παραγωγικά σε εφαρμογές εναπόθεσης υλικού.

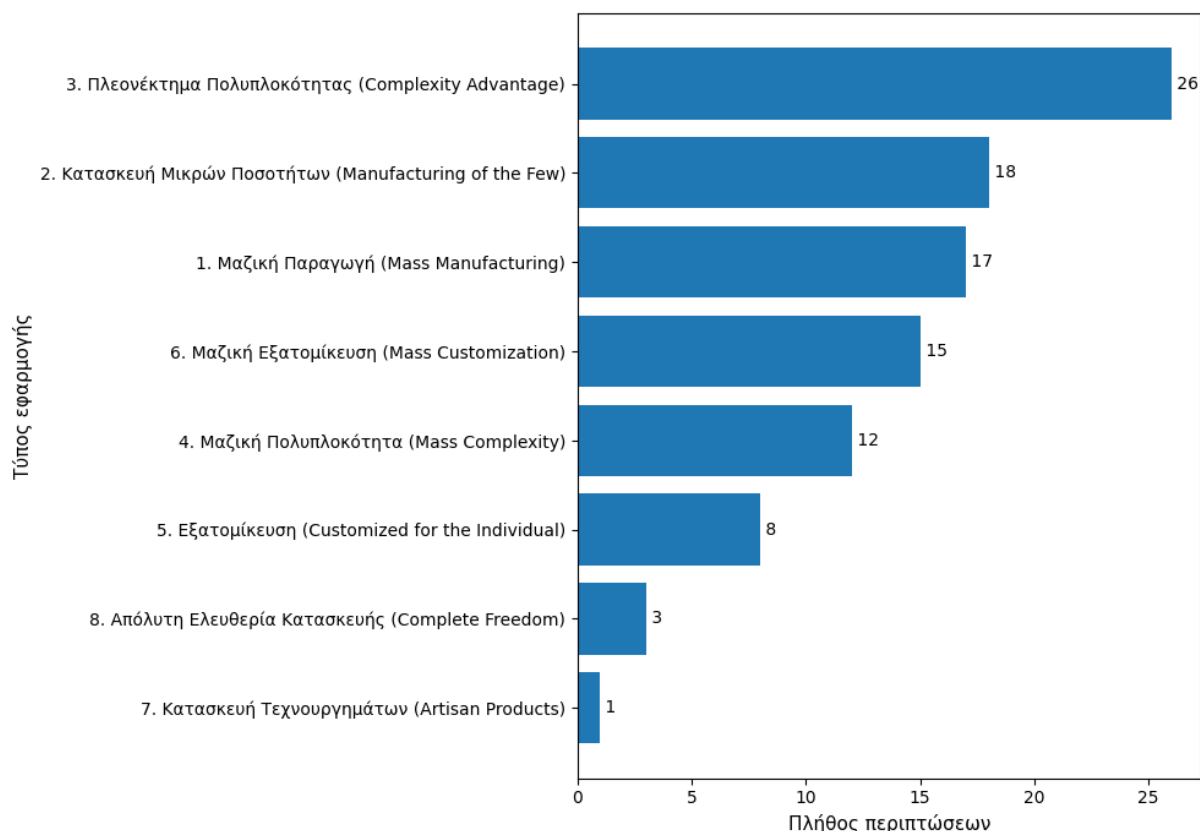
Ακολούθως, στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε παραγωγικές εφαρμογές της εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη. Τα συγκεκριμένα υλικά είναι κράματα τιτανίου (2 εφαρμογές), χάλυβα (1 εφαρμογή) και νικελίου (1 εφαρμογή). Η μελέτη των συγκεκριμένων εφαρμογών υποδεικνύει ότι αφορά κυρίως την κατασκευή/επισκευή μεταλλικών αντικειμένων/προϊόντων μεγάλου μεγέθους για εξειδικευμένη χρήση ή/και εξοπλισμό.



Σχήμα 11: Κατανομή υλικών που αξιοποιούνται σε παραγωγικές εφαρμογές της εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη.

Τέλος, στην τεχνολογία της συγκόλλησης επάλληλων φύλλων, η μοναδική καταγεγραμμένη εφαρμογή της έρευνας αφορά την αξιοποίηση μεταλλικών υλικών. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκε η χρήση χάλυβα και κραμάτων αλουμινίου, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα της μεθόδου να παράγει ανθεκτικά εξαρτήματα και εργαλεία μέσω της διαδοχικής συγκόλλησης και κοπής μεταλλικών φύλλων.

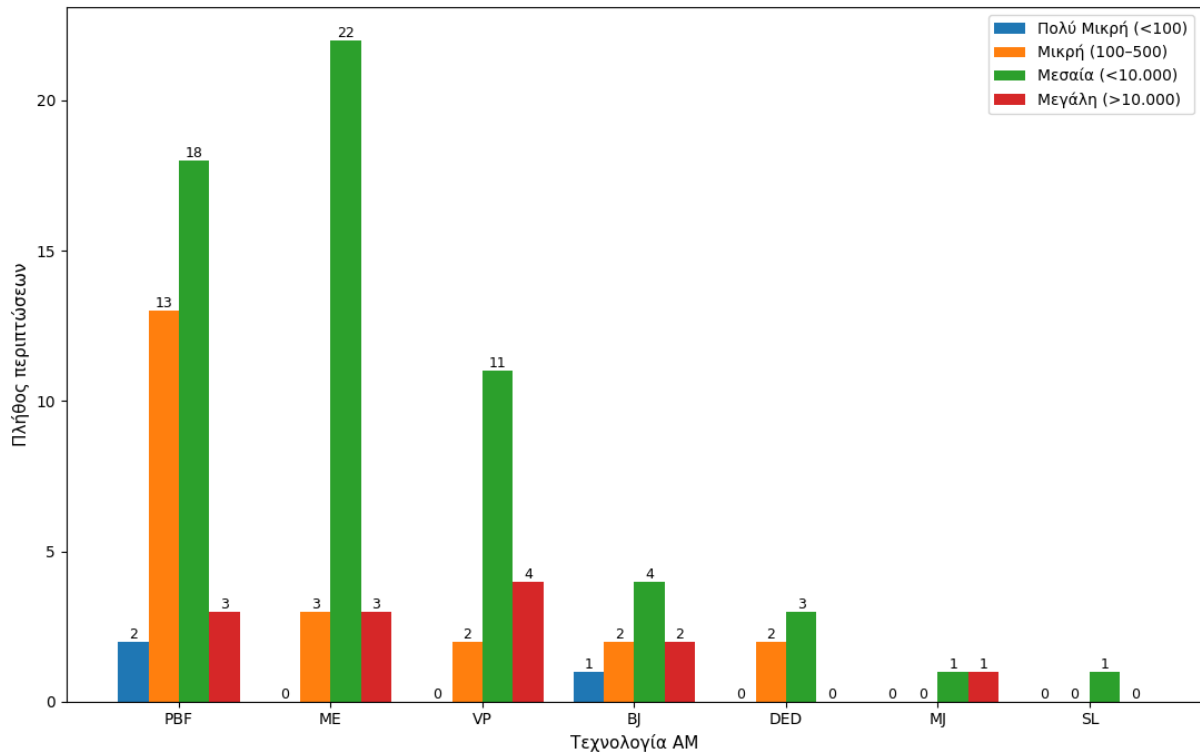
Προχωρώντας στην ανάλυση των αποτελεσμάτων εστιάζουμε στην κατανομή των εφαρμογών ανά πεδίο, όπως αυτά προσδιορίζονται στη μελέτη των Conner et al. (2014). Όπως είναι εμφανές και στο Σχήμα 12, οι περισσότερες καταγεγραμμένες εφαρμογές εμπίπτουν στην κατηγορία «πλεονέκτημα πολυπλοκότητας» (26 εφαρμογές), γεγονός που επιβεβαιώνει την αναμενόμενη υπεροχή της ΠΚ στην παραγωγή μικρών παρτίδων προϊόντων υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι ότι το επόμενο πεδίο από πλευράς αριθμού εφαρμογών είναι αυτό της «κατασκευή μικρών ποσοτήτων» (18), ενώ ακολουθούν η «μαζική παραγωγή» (17) και η «μαζική εξατομίκευση» (16). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι σε αρκετές περιπτώσεις είναι οικονομικά δυνατή η χρήση τεχνολογιών ΠΚ για την παραγωγή μεγάλων παρτίδων, αλλά και για την κάλυψη αναγκών μικρής κλίμακας ή εξατομίκευσης. Σχετικά λιγότερες εφαρμογές ταξινομούνται στο πεδίο «μαζική πολυπλοκότητα» (12) και «εξατομίκευση» (8), ενώ περιορισμένος αριθμός εφαρμογών αφορά την «απόλυτη ελευθερία κατασκευής» (3) και την «κατασκευή τεχνουργημάτων» (1). Συνολικά, η παρατηρούμενη κατανομή αποτυπώνει τη δυναμική, πολυδιάστατη και εξελισσόμενη φύση της Προσθετικής Κατασκευής, η οποία καλύπτει πλέον ένα ευρύ φάσμα παραγωγικών αναγκών, από τη μαζική παραγωγή έως την εξατομίκευση.



Σχήμα 12: Πλήθος εφαρμογών/περιπτώσεων ανά πεδίο εφαρμογής της ΠΚ.

Τέλος, στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η κατανομή εφαρμογών ανά τεχνολογία ΠΚ σε συνάρτηση και με τον όγκο παραγωγής. Όπως είναι εμφανές, στις εφαρμογές μεσαίου όγκου παραγωγής κυριαρχούν η εξώθηση υλικού (22 περιπτώσεις) και η σύντηξη πούδρας σε κλίνη (18 περιπτώσεις). Οι δύο αυτές τεχνολογίες παρουσιάζουν τον πιο ισχυρό συνδυασμό αξιοπιστίας, ευελιξίας και επαναληψιμότητας, κάτι που εξηγεί την εκτεταμένη τους χρήση σε παραγωγικές διαδικασίες μικρομεσαίας κλίμακας, όπως η κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων και εξειδικευμένων τελικών προϊόντων. Η μέθοδος φωτοπολυμερισμού σε κάδο εμφανίζει επίσης σημαντική παρουσία στις μεσαίες ποσότητες (11 περιπτώσεις) αλλά και τα πρωτεία στην υψηλή παραγωγή (4 περιπτώσεις), ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια και καλή ποιότητα επιφάνειας. Η μέθοδος της εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας κατανέμεται πιο ισορροπημένα σε όλα τα επίπεδα παραγωγής (από την πολύ μικρή έως τη μεγάλη κλίμακα), γεγονός που υποδηλώνει στοχευμένη χρήση σε ειδικές περιπτώσεις, όπου η ακρίβεια στη φάση κατεργασίας και η δυνατότητα μεταγενέστερης επεξεργασίας παίζουν καθοριστικό ρόλο. Αντίθετα, η μέθοδος εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη φαίνεται να περιορίζεται κυρίως σε μικρούς προς μεσαίους όγκους παραγωγής, ενώ αυτή της εναπόθεσης υλικού καταγράφεται οριακά σε μεσαίους και μεγάλους όγκους παραγωγής, σε

ελάχιστες όμως συνολικά περιπτώσεις. Τέλος, η τεχνολογία συγκόλλησης επάλληλων φύλλων εμφανίζεται με μία μεμονωμένη εφαρμογή μεσαίου όγκου παραγωγής, γεγονός που υποδηλώνει την περιορισμένη αλλά στοχευμένη χρήση της, κυρίως για την ταχεία και οικονομική κατασκευή πρωτοτύπων.



Σχήμα 13: Κατανομή του όγκου παραγωγής ως προς τις τεχνολογίες.

Κεφάλαιο 4 - Ανάλυση εφαρμογών ΠΚ ανά κλάδο

4.1 Αεροδιαστημική Βιομηχανία

Η αεροδιαστημική και η άμυνα αποτελούν έναν από τους πιο απαιτητικούς κλάδους, καθώς απαιτούν εξαρτήματα με υψηλή ειδική αντοχή, σταθερότητα σε θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, πιστοποίηση ιχνηλασιμότητας και ελάχιστο βάρος. Η ΠΚ ευνοεί τη δημιουργία τοπολογικά βελτιστοποιημένων δομών και δικτυωμάτων/πλεγμάτων (lattices), τα οποία επιτρέπουν τη μείωση βάρους χωρίς απώλεια ακαμψίας. Επιπλέον, προσφέρει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης εσωτερικών καναλιών για ψύξη και ροή ρευστών, χαρακτηριστικό που είναι πρακτικά αδύνατο με τις συμβατικές μεθόδους (Frazier, 2014; Herzog et al., 2016). Παράλληλα, η χρήση τεχνικών επισκευής μέσω εναπόθεσης υλικού επεκτείνει τη διάρκεια ζωής κρίσιμων εξαρτημάτων, μειώνοντας το κόστος συντήρησης.

Οι κυριότερες τεχνολογίες που αξιοποιούνται στον κλάδο είναι η PBF, η οποία επιτρέπει την κατασκευή μεταλλικών τελικών μερών υψηλής ακρίβειας και αντοχής, και η DED, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για επισκευές, προσθήκες υλικού και κατασκευή μεγάλων εξαρτημάτων (DebRoy et al., 2018; King et al., 2015). Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν κράματα τιτανίου όπως το Ti6Al4V για την εξαιρετική αναλογία αντοχής/βάρους, υπερκράματα νικελίου όπως τα Inconel 625/718 για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και διάβρωση, καθώς και ελαφρά κράματα αλουμινίου όπως το AlSi10Mg. Για δευτερεύουσες εφαρμογές αξιοποιούνται πολυμερή υψηλής απόδοσης όπως το PEEK και το ULTEM (Gibson et al., 2021).

Τα πλεονεκτήματα που έχουν καταγραφεί περιλαμβάνουν μείωση βάρους εξαρτημάτων σε ποσοστά που συχνά κυμαίνονται από 30 έως 50%, συντόμευση του κύκλου ανάπτυξης προϊόντων, μικρότερο lead time για την παραγωγή ανταλλακτικών, ενοποίηση μερών σε ενιαία εξαρτήματα και επέκταση της διάρκειας ζωής με χρήση DED για επισκευές (Gupta & Wong, 2015). Οι βασικές προκλήσεις επικεντρώνονται στη διαδικασία πιστοποίησης που απαιτείται από τις αεροναυπηγικές και αμυντικές αρχές, στη μεταβλητότητα της μικροδομής λόγω πορώδους και θερμικών ιστορικών, καθώς και στο υψηλό κόστος εξοπλισμού και υλικών (Thompson et al., 2016).

Στον Πίν. 1 παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Η Airbus αξιοποιεί την PBF με υλικά όπως Ti6Al4V και AlSi10Mg για την παραγωγή βραχιόνων και άλλων εξαρτημάτων, επιτυγχάνοντας μείωση βάρους έως και 45%, με άμεσο όφελος στη βελτίωση της απόδοσης καυσίμου και τη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης καλωδιώσεων και υδραυλικών συστημάτων (Airbus, 2020). Η Rolls-Royce εφαρμόζει PBF για νέα μέρη με ενσωματωμένα κανάλια ψύξης, επιτυγχάνοντας μείωση κόστους συντήρησης κατά περίπου 30% και συντόμευση χρόνου παραγωγής. Επιπλέον, η δυνατότητα «repair-instead-of-replace» αυξάνει τη διαθεσιμότητα στόλου (Rolls-Royce, 2019). Η Lockheed Martin αξιοποιεί την PBF για την παραγωγή ελαφριών δομών, όπως υποσυστήματα αεροδιαστημικών πλατφορμών, και εφαρμόζει την DED σε περιπτώσεις επισκευών. Η χρήση lattices οδηγεί σε μείωση βάρους έως 35% και σε ταχύτερους κύκλους επανασχεδιασμού, ιδιαίτερα κρίσιμους για προγράμματα με αυστηρούς στόχους χρόνου και πιστοποίησης (Lockheed Martin, 2021).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Ενδεικτικές εφαρμογές	Κύρια οφέλη
Airbus	PBF (SLM)	Ti6Al4V, AlSi10Mg	υποστηρίγματα/βραχίονες, εσωτερικά κανάλια	Μείωση βάρους, καλύτερη ενεργειακή απόδοση
Rolls-Royce	DED	Inconel, Ti6Al4V	Επισκευές πτερυγίων, νέα μέρη με κανάλια ψύξης	Μείωση κόστους συντήρησης ~30%, αύξηση διαθεσιμότητας στόλου
Lockheed Martin	PBF (+ DED επιλεκτικά)	Ti6Al4V, superalloys	Ελαφριές δομές, θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα	Μείωση βάρους ~35%, ταχύτερος κύκλος R&D

Εν κατακλείδι, στον κλάδο της αεροδιαστημικής η ΠΚ έχει προχωρήσει από την πρωτοτυποποίηση στην παραγωγή και στη στρατηγική υποστήριξη στόλων. Τα κύρια οφέλη αφορούν τη μείωση βάρους, την ενοποίηση μερών και τη δυνατότητα επισκευής, ενώ οι μεγαλύτερες προκλήσεις εντοπίζονται στην πιστοποίηση, στον έλεγχο μικροδομής και στις απαιτήσεις μετα-επεξεργασίας. Η υιοθέτηση αναμένεται να ενταθεί περαιτέρω, με έμφαση σε

υβριδικές ροές παραγωγής (DED + PBF) και στη χρήση ψηφιακών διδύμων για την εξασφάλιση κλειστού βρόχου ποιότητας (Gibson et al., 2021; Ford & Despeisse, 2016).

4.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί έναν από τους πλέον δυναμικούς τομείς υιοθέτησης της ΠΚ, καθώς η αυξανόμενη ανάγκη για ελαφρύτερα, ανθεκτικότερα και πιο αποδοτικά εξαρτήματα συνδυάζεται με την πίεση για μείωση του χρόνου ανάπτυξης νέων προϊόντων και του συνολικού κόστους παραγωγής. Οι τεχνολογίες ΠΚ ενσωματώνονται σε πολλαπλά στάδια της αλυσίδας αξίας, από τον σχεδιασμό και την πρωτοτυποποίηση έως την παραγωγή τελικών εξαρτημάτων σε μεγάλη κλίμακα (Ford & Despeisse, 2016; Gao et al., 2015).

Η χρήση ΠΚ στην αυτοκινητοβιομηχανία έχει στρατηγική σημασία καθώς επιτρέπει τον ταχύτερο κύκλο ανάπτυξης νέων μοντέλων μέσω της γρήγορης δημιουργίας φυσικών πρωτοτύπων, μειώνοντας τον χρόνο έρευνας και ανάπτυξης. Παράλληλα, υποστηρίζει τον σχεδιασμό ελαφρύτερων οχημάτων, κάτι που οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης (Thompson et al., 2016). Εξίσου σημαντική είναι η δυνατότητα μαζικής εξατομίκευσης, με εφαρμογές σε εσωτερικά πλαίσια και εργονομικά εξαρτήματα, ενώ πλέον οι μεγάλες εταιρείες έχουν προχωρήσει πέρα από το στάδιο της πρωτοτυποποίησης και εφαρμόζουν ΠΚ για την παραγωγή τελικών εξαρτημάτων σε χιλιάδες μονάδες, σηματοδοτώντας τη μετάβαση προς την εκβιομηχάνιση του κλάδου (Gibson et al., 2021).

Από την έρευνα προκύπτει ότι η Volkswagen αξιοποιεί την τεχνολογία BJ για την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων σε οχήματα της σειράς ID.3, χρησιμοποιώντας κράματα αλουμινίου και χάλυβα υψηλής αντοχής (Πίν. 2). Η χρήση αυτής της μεθόδου επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων εξαρτημάτων με χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τις παραδοσιακές διεργασίες (Volkswagen, 2020). Αντίστοιχα, η BMW χρησιμοποιεί την τεχνολογία PBF για την παραγωγή ελαφρών αλλά ανθεκτικών εξαρτημάτων, αξιοποιώντας υλικά όπως το AlSi10Mg και κράματα τιτανίου. Στο BMW i8 Roadster, η ΠΚ χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων ασφαλείας που χρησιμοποιούνται πλέον σε σειρές παραγωγής (BMW Group, 2019).

Η ευρεία υιοθέτηση της ΠΚ δεν περιορίζεται πλέον σε πειραματικά έργα αλλά επεκτείνεται στην ενσωμάτωσή της στις γραμμές μαζικής παραγωγής. Οι τεχνικές και οικονομικές

επιπτώσεις είναι πολλαπλές. Ο χρόνος λανσαρίσματος νέων μοντέλων μειώνεται λόγω της κατάργησης πολύπλοκων καλουπιών. Η απόδοση των οχημάτων βελτιστοποιείται μέσω τοπολογικής βελτιστοποίησης, καθώς τα εξαρτήματα έχουν μικρότερο βάρος χωρίς να χάνουν μηχανική αντοχή (Pradel et al., 2018). Η βιωσιμότητα ενισχύεται με καλύτερη εκμετάλλευση των υλικών (μείωση αποβλήτων) και δυνατότητα χρήσης ανακυκλώσιμων πολυμερών. Ωστόσο, παραμένουν σημαντικές προκλήσεις. Η κλιμάκωση παραγωγής, δηλαδή η μετάβαση από χιλιάδες σε εκατομμύρια εξαρτήματα, απαιτεί βελτίωση της ταχύτητας και μείωση του κόστους παραγωγής. Ταυτόχρονα, η χρήση ΠΚ σε κρίσιμα εξαρτήματα ασφάλειας προϋποθέτει αυστηρά πρότυπα πιστοποίησης (Murr, 2016). Επίσης, η ενσωμάτωση με τις υπάρχουσες αλυσίδες εφοδιασμού απαιτεί ψηφιοποίηση και ανασχεδιασμό διαδικασιών.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
Volkswagen	Binder Jetting	Κράματα Al & χάλυβα	Εξαρτήματα ID.3, tooling γραμμής	Χαμηλότερο κόστος, υψηλός όγκος παραγωγής
BMW Group	Powder Bed Fusion	AlSi10Mg, Ti alloys	υποστηρίγματα, εξαρτήματα υψηλής αντοχής	Μείωση βάρους, καινοτόμος μορφολογικός σχεδιασμός

Στο μέλλον αναμένεται περαιτέρω ενσωμάτωση της ΠΚ στα ηλεκτρικά οχήματα, ιδιαίτερα για την κατασκευή ελαφρών εξαρτημάτων μπαταριών και συστημάτων ψύξης. Παράλληλα, εκτιμάται ότι οι τεχνολογίες BJ και PBF θα αξιοποιηθούν στην τοπική παραγωγή ανταλλακτικών, μειώνοντας το κόστος αποθήκευσης και διανομής και ενισχύοντας την ευελιξία της εφοδιαστικής αλυσίδας (Ford & Despeisse, 2016; Gibson et al., 2021).

4.3 Ιατρικά προϊόντα & Υγεία

Η ιατρική βιομηχανία αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς εφαρμογής της ΠΚ, καθώς οι τεχνολογίες της ανταποκρίνονται σε δύο βασικές ανάγκες: την υψηλή εξατομίκευση και τη μορφολογική πολυπλοκότητα, οι οποίες είναι δύσκολο ή αδύνατο να

ικανοποιηθούν με παραδοσιακές μεθόδους (Ventola, 2014; Javaid & Haleem, 2018). Από εξατομικευμένα εμφυτεύματα και εργαλεία χειρουργικής έως οδοντιατρικές λύσεις και βιοϊατρικά μοντέλα εκπαίδευσης, η ΠΚ ανοίγει νέες δυνατότητες θεραπείας, διάγνωσης και εκπαίδευσης.

Τα παραγόμενα εξαρτήματα στην ιατρική πρέπει να πληρούν αυστηρές προδιαγραφές, όπως βιοσυμβατότητα (συμβατά με ISO 10993, εγκεκριμένα από τον FDA), ακριβή εφαρμογή στα ανατομικά χαρακτηριστικά του ασθενούς, υψηλή μηχανική αντοχή και σταθερότητα, καθώς και δυνατότητα αποστείρωσης, ενώ η ταχύτητα παράδοσης είναι κρίσιμη σε χειρουργικές εφαρμογές (Morrison et al., 2015). Οι καταλληλότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι η PBF για την παραγωγή μεταλλικών εμφυτευμάτων από τιτάνιο και κοβάλτιο-χρώμιο, η MJ για οδοντιατρικά καλούπια και ιατρικά μοντέλα με πολλαπλά υλικά, η VP για χειρουργικά μοντέλα υψηλής ακρίβειας και η ME για προπλάσματα και βοηθητικά εργαλεία (Gibson et al., 2021). Αντίστοιχα, τα υλικά περιλαμβάνουν Ti6Al4V για ορθοπεδικά και κρανιακά εμφυτεύματα, κράματα Co-Cr για οδοντιατρικές εφαρμογές, βιοσυμβατά πολυμερή όπως PEEK, MED610 και PMMA, καθώς και υλικά με πορώδη μικροδομή που βελτιώνουν την οστεοενσωμάτωση.

Στον Πίν. 3 παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στον ιατρικό τομέα, όπως η Stryker που αξιοποιεί την PBF για την παραγωγή ορθοπεδικών εμφυτευμάτων από Ti6Al4V, με εσωτερική δομή δικτυώματος (lattice structures) που ενισχύει τη βιοσυμβατότητα και την οστεοενσωμάτωση (Stryker, 2020). Η Straumann εφαρμόζει PBF για την παραγωγή οδοντιατρικών εμφυτευμάτων από κράματα Co-Cr, προσφέροντας ακρίβεια και δυνατότητα μαζικής εξατομίκευσης (Straumann, 2019). Παράλληλα, η Zimmer Biomet χρησιμοποιεί PBF για την κατασκευή ορθοπεδικών εμφυτευμάτων με πορώδη δικτυωτή δομή, επιτυγχάνοντας υψηλή αντοχή και βελτιωμένη ενσωμάτωση (Zimmer Biomet, 2020).

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στον κλάδο της παραγωγής ιατρικών προϊόντων.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
Stryker	PBF (SLM)	Ti6Al4V	Ορθοπεδικά εμφυτεύματα	Εξατομίκευση, οστεοενσωμάτωση

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
Straumann	PBF (SLM)	Co-Cr alloys	Οδοντιατρικά εμφυτεύματα	Ακρίβεια, μαζική εξατομίκευση
Zimmer Biomet	PBF (SLM)	Ti6Al4V	Εμφυτεύματα ισχίου/σπονδυλικά	Μείωση βάρους, οστεοενσωμάτωση

Η ΠΚ έχει μετασηματίσει τη λογική παραγωγής στην υγεία, επιτρέποντας την απόλυτη προσαρμογή των εμφυτευμάτων στο ανατομικό προφίλ κάθε ασθενούς, τη μαζική εξατομίκευση σε εκατομμύρια μοναδικά προϊόντα και τη βελτιστοποίηση των θεραπευτικών αποτελεσμάτων μέσω πορωδών δομών που οδηγούν σε καλύτερη βιολογική αποδοχή (Murr et al., 2012). Ωστόσο, παραμένουν προκλήσεις που αφορούν το κανονιστικό πλαίσιο (FDA, EMA, ISO), την ανάγκη ιχνηλασιμότητας και ποιοτικού ελέγχου, καθώς και το υψηλό κόστος παραγωγής σε ορισμένες εφαρμογές (Javaid & Haleem, 2020).

4.4 Καταναλωτικά Προϊόντα

Ο τομέας των καταναλωτικών προϊόντων αποτελεί έναν από τους πιο δημιουργικούς και δυναμικούς χώρους ενσωμάτωσης της ΠΚ. Η αυξανόμενη ζήτηση για εξατομικευμένα προϊόντα, η ταχύτερη ανάπτυξη νέων σχεδίων και η ευελιξία στη μικρής κλίμακας παραγωγή καθιστούν την ΠΚ μια ιδανική επιλογή για βιομηχανίες όπως η αθλητική ένδυση, τα παιχνίδια, η μόδα και τα κοσμήματα (Petrovic et al., 2011; Gao et al., 2015). Η δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων γεωμετριών, η συνδυαστική χρήση διαφορετικών υλικών και η ταχεία μετάβαση από τον ψηφιακό σχεδιασμό στο τελικό προϊόν προσφέρουν σημαντικά ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα. Επιπλέον, η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών μέσω της μείωσης αποβλήτων ευθυγραμμίζεται με τις σύγχρονες περιβαλλοντικές απαιτήσεις της αγοράς (Ford & Despeisse, 2016).

Οι βασικές τεχνολογίες που αξιοποιούνται περιλαμβάνουν την ME για πλαστικά καταναλωτικά προϊόντα, την VP για φορητά προϊόντα (wearables) και μικρά εξαρτήματα με υψηλή λεπτομέρεια, την MJ για προϊόντα πολλαπλών χρωμάτων και υφών, καθώς και την BJ και PBF για μεταλλικά κοσμήματα και εξαρτήματα πολυτελείας (Gibson et al., 2021). Στη βιβλιογραφία συναντάμε χαρακτηριστικά παραδείγματα εταιρειών που έχουν αξιοποιήσει την ΠΚ σε αυτόν τον κλάδο (Πίν. 4). Η Adidas εφαρμόζει VP για την ανάπτυξη πρωτοτύπων

επιτυγχάνοντας μείωση του χρόνου ανάπτυξης νέων συλλογών και βελτιστοποίηση της απόδοσης με χρήση ελαστομερών πολυμερών υψηλής αντοχής (Adidas, 2019). Η New Balance αξιοποιεί την τεχνολογία φωτοπολυμερισμού σε κάδο (VP) για την παραγωγή εξατομικευμένων ενδιάμεσων σολών (midsoles), όπως στα μοντέλα Zante Generate και 990 Sport (Fabbaloo, 2016). Η χρήση φωτοπολυμεριζόμενων ελαστομερών επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων δομών που προσφέρουν βέλτιστη απορρόφηση κραδασμών και άνεση, προσαρμοσμένη στα δεδομένα του δρομέα. Παράλληλα, η Swarovski χρησιμοποιεί τη μέθοδο φωτοπολυμερισμού σε κάδο (VP) για την παραγωγή πρωτοτύπων και εξαρτημάτων κοσμημάτων, αξιοποιώντας την υψηλή ακρίβεια της τεχνολογίας για τη δημιουργία κρυσταλλικών δομών και σχεδίων με μεγάλη λεπτομέρεια (Swarovski, n.d.)

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στον κλάδο της παραγωγής καταναλωτικών προϊόντων.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
Adidas	Vat Photopolymerization (DLS)	EPU polymer	Futurecraft 4D shoes	Μαζική εξατομίκευση, άνεση
New Balance	Vat Photopolymerization (SLA/DLS)	Ελαστομερή Φωτοπολυμερή	Running shoes	Εξατομίκευση, ταχύτητα
Swarovski	Vat Photopolymerization	Μέταλλα, ρητίνες	Κοσμήματα, luxury goods	Σχεδιαστική ελευθερία, βιωσιμότητα

Η ενσωμάτωση της ΠΚ στα καταναλωτικά προϊόντα επιταχύνει την καινοτομία, επιτρέπει διαφοροποίηση και ενισχύει τη βιωσιμότητα μέσω μείωσης αποβλήτων και χρήσης λιγότερων υλικών (Berman, 2012). Παράλληλα, προσφέρει τη δυνατότητα μαζικής εξατομίκευσης σε προϊόντα υψηλής αισθητικής και λειτουργικότητας. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όπως το υψηλό κόστος υλικών, η ανάγκη για πιστοποιημένα και ανθεκτικά υλικά, καθώς και η περιορισμένη κλιμάκωση σε βιομηχανικά επίπεδα παραγωγής (Rayna & Striukova, 2016). Στο μέλλον, αναμένεται μεγαλύτερη αξιοποίηση βιοδιασπώμενων πολυμερών, συνδυασμός με τεχνητή νοημοσύνη για βελτιστοποίηση σχεδιασμού και στενότερη συνεργασία

με σχεδιαστές για την παραγωγή προϊόντων που συνδυάζουν μοναδικό design με υψηλή απόδοση.

4.5 Βιομηχανική Παραγωγή & Εργαλεία

Η κατασκευή παραγωγικών εργαλείων και ιδιοσυσκευών (tooling) για τη Βιομηχανία αποτελούν έναν από τους πρώτους και πιο στρατηγικούς τομείς εφαρμογής της ΠΚ. Αρχικά περιορισμένη στην πρωτοτυποποίηση, σήμερα η χρήση της έχει επεκταθεί σε λειτουργικά εργαλεία παραγωγής, καλούπια, διατάξεις συγκράτησης και εξειδικευμένα εργαλεία για εργασίες συναρμολόγησης. Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών ΠΚ μειώνει δραστικά τον χρόνο κατασκευής των εργαλείων/βοηθημάτων από εβδομάδες σε ημέρες, επιφέρει εξοικονόμηση κόστους που μπορεί να φτάσει το 30–70% και δίνει τη δυνατότητα παραγωγής ελαφρύτερων, εργονομικών και ανθεκτικών εργαλείων μέσω τοπολογικής βελτιστοποίησης. Επιπλέον, καθιστά εφικτή την πλήρη ελευθερία σχεδιασμού, με την ενσωμάτωση σύνθετων καναλιών ψύξης και θέρμανσης σε καλούπια χύτευσης ακριβείας, κάτι που δεν είναι δυνατό με τις παραδοσιακές μεθόδους (Hopkinson et al., 2006; Gao et al., 2015).

Οι τεχνολογίες που αξιοποιούνται περιλαμβάνουν την ME για χαμηλού κόστους εργαλεία και ιδιοσυσκευές, την VP για καλούπια υψηλής ακρίβειας μικρών σειρών, την PBF για μεταλλικά εργαλεία υψηλής αντοχής με εσωτερικά κανάλια ψύξης και την BJ για μεταλλικά τμήματα μέρους ή ολόκληρων καλουπιών με μειωμένο κόστος (Gibson et al., 2021). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν πολυμερή όπως ABS, Nylon 12 και ULTEM, μέταλλα όπως χάλυβας, Inconel και AlSi10Mg, φωτοπολυμερή υψηλής αντοχής και σύνθετα πολυμερή με ενισχυτικές ίνες (Gebhardt, 2012).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών εντοπίζονται σε μεγάλες βιομηχανικές εταιρείες. Η BMW αξιοποιεί την τεχνολογία εξώθησης υλικού (ME) για την παραγωγή βοηθητικών εργαλείων, όπως ρομποτικές αρπάγες και εξαρτήματα συγκράτησης (jigs & fixtures), χρησιμοποιώντας θερμοπλαστικά πολυμερή (BMW Group, 2024). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνει μείωση βάρους στα εργαλεία χειρός και ταχύτερη αντικατάσταση στη γραμμή παραγωγής. Παράλληλα, η Danfoss εφαρμόζει την τεχνολογία εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting) για την παραγωγή εργαλείων παραγωγής από πολυαμίδιο (nylon), εκμεταλλευόμενη την ταχύτητα της μεθόδου για τη δημιουργία εξαρτημάτων χαμηλού κόστους

(Formnext, 2022). Οι περιπτώσεις αυτές αναδεικνύουν την ικανότητα της ΠΚ να υποστηρίζει την παραδοσιακή παραγωγή μέσω της ταχείας κατασκευής βοηθητικού εξοπλισμού.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στον κλάδο της κατασκευής εργαλείων παραγωγής.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
BMW	ME (PBF)	Θερμοπλαστικά	Ιδιοσκευές	Μείωση βάρους, εργονομία, ταχύτητα
Danfoss	BJ	PA(νάιλον)	Εργαλεία παραγωγής, εξαρτήματα	Οικονομία κλίμακας

Η τεχνική και οικονομική σημασία της ΠΚ στη βιομηχανική παραγωγή είναι σαφής. Προσφέρει μείωση του κόστους κατασκευής εργαλείων έως και 90%, επιτρέπει την ταχύτερη παράδοση αυτών (ακόμα και εντός 1–2 ημερών) και βελτιώνει την εργονομία των εργαζομένων μέσω σχεδιασμού εργαλείων προσαρμοσμένων στις ανθρώπινες ανάγκες (Bergman, 2012). Επιπλέον, ενθαρρύνει την καινοτομία με την ανάπτυξη καλουπιών που περιλαμβάνουν εσωτερικά κανάλια ψύξης και θέρμανσης. Ωστόσο, οι προκλήσεις παραμένουν, καθώς η ΠΚ είναι σήμερα καταλληλότερη κυρίως για μικρούς και μεσαίους όγκους παραγωγής και όχι τόσο για μαζική παραγωγή. Ζητήματα αντοχής και διάρκειας ζωής εξακολουθούν να αποτελούν εμπόδιο, ιδιαίτερα στην περίπτωση της χύτευσης ακριβείας όπου η φθορά των καλουπιών είναι υψηλή. Τέλος, η πλήρης ενσωμάτωση απαιτεί εκπαίδευση του προσωπικού και ανασχεδιασμό των διαδικασιών, ώστε να αξιοποιηθεί στο μέγιστο το δυναμικό της τεχνολογίας.

4.6 Ενέργεια

Ο τομέας της ενέργειας, που περιλαμβάνει την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, την παραγωγή προϊόντων πετρελαίου και φυσικού αερίου καθώς και τις ανανεώσιμες πηγές, συνιστά έναν από τους πιο δυναμικούς χώρους εφαρμογής της ΠΚ. Οι απαιτήσεις για υψηλή αξιοπιστία, αντοχή σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας και μείωση του κόστους καθιστούν την τεχνολογία αυτή ιδανικό εργαλείο για την ανάπτυξη κρίσιμων εξαρτημάτων (Murr, 2016; Frazier, 2014). Η ΠΚ

παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής δομών με ενσωματωμένα κανάλια ψύξης, υψηλή αντοχή σε θερμοκρασίες και πιέσεις, επισκευή και ανακατασκευή φθαρμένων εξαρτημάτων αντί πλήρους αντικατάστασης, μείωση του χρόνου ακινητοποίησης μέσω παραγωγής κατ' απαίτηση (on-demand) κοντά στο σημείο χρήσης, αλλά και συμβολή στη βιωσιμότητα με λιγότερη κατανάλωση υλικών και περιορισμό των εκπομπών CO₂ (Gibson et al., 2021).

Οι τεχνολογίες που αξιοποιούνται περιλαμβάνουν την DED για επισκευή και ανακατασκευή μεγάλων εξαρτημάτων, την PBF για την παραγωγή υψηλής αξίας εξαρτημάτων για τουρμπίνες και αντλίες, την BJ για χαμηλότερου κόστους μεταλλικά εξαρτήματα σε μεσαία και μεγάλη παραγωγή, καθώς και τις ME και VP για πρωτότυπα και βοηθητικά εργαλεία (DebRoy et al., 2018). Τα υλικά που κυριαρχούν είναι τα υπερ-κράματα Inconel 625/718, κράματα Hastelloy, ανοξείδωτος χάλυβας, τιτάνιο, αλλά και πολυμερή υψηλής θερμικής αντοχής όπως PEEK και ULTEM (Herzog et al., 2016).

Η Siemens Energy χρησιμοποιεί τη μέθοδο PBF για την κατασκευή τουρμπινών αερίου με ενσωματωμένα κανάλια ψύξης, χρησιμοποιώντας κράματα Inconel, επιτυγχάνοντας αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση του χρόνου ψύξης κατά περίπου 40%, γεγονός που συνδέεται άμεσα με μειωμένη κατανάλωση καυσίμου (Siemens, 2020). Παράλληλα, η Siemens Energy αξιοποιεί την DED για την επισκευή και παραγωγή εξαρτημάτων μεγάλων τουρμπινών, όπως πτερύγια αεροστροβίλων. Μέσω της χρήσης υπερκράματων νικελίου και ανοξείδωτου χάλυβα, αυξάνεται η διάρκεια ζωής κρίσιμων εξαρτημάτων και μειώνεται το κόστος αντικατάστασης έως και 40% (Siemens, 2020).

Η Baker Hughes αξιοποιεί DED για την επισκευή εξαρτημάτων στον εξοπλισμό πετρελαίου και φυσικού αερίου (Πίν. 6), όπως εξαρτήματα τρυπανιών και συμπιεστών, χρησιμοποιώντας χάλυβα και Inconel, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής και μείωση του κόστους συντήρησης (Baker Hughes, 2019). Η Vestas στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών εφαρμόζει ME για την παραγωγή εξαρτημάτων ανεμογεννητριών και εργαλείων συναρμολόγησης, αξιοποιώντας πολυμερή και μεταλλικά κράματα για on-site παραγωγή και συντήρηση (Vestas, 2021). Αντίστοιχα, η Ørsted αξιοποιεί τις τεχνολογίες VP και ME για πρωτότυπα και εξειδικευμένα εξαρτήματα σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις, χρησιμοποιώντας πολυμερή και ανοξείδωτο χάλυβα, μειώνοντας σημαντικά τα κόστη διακίνησης και τον χρόνο ανάπτυξης (Ørsted, 2020).

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στον κλάδο της παραγωγής ενέργειας.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
Siemens Energy	PBF (SLM)	Inconel	Τουρμπίνες	Απόδοση +40%, εξοικονόμηση καυσίμων
Baker Hughes	DED	Χάλυβας, Inconel	Εξαρτήματα τρυπανιών και συμπιεστών	Επισκευή, διάρκεια ζωής
Vestas	FDM,	Πολυμερή, κράματα μετάλλων	Εξαρτήματα ανεμογεννητριών	Επιτόπια παραγωγή
Ørsted	VP ,ME	Πολυμερή, Ανοξειδωτος χάλυβας	Εξειδικευμένα εξαρτήματα σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις	Μείωση κόστους διακίνησης και χρόνου ανάπτυξης

Η τεχνική και οικονομική σημασία της ΠΚ στον τομέα της ενέργειας είναι καθοριστική. Η δυνατότητα επισκευής αντί αντικατάστασης μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος, ενώ εξαρτήματα όπως τα πτερύγια και οι καυστήρες επιτυγχάνουν αισθητά καλύτερη ενεργειακή απόδοση (Wohlers & Caffrey, 2015). Η παραγωγή κοντά στο σημείο χρήσης μειώνει την εξάρτηση από περίπλοκα διαδικασίες μεταφοράς και διακίνησης, ενώ η μείωση των αποβλήτων κατά την παραγωγή ενισχύει τη βιωσιμότητα. Ωστόσο, προκλήσεις παραμένουν, κυρίως σε ζητήματα πιστοποίησης και τυποποίησης για χρήση σε κρίσιμα ενεργειακά συστήματα, στο υψηλό κόστος υλικών και στην ανάγκη ανάπτυξης παραγωγής μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, η εκπαίδευση του προσωπικού και η ενσωμάτωση νέων διαδικασιών είναι αναγκαία για την πλήρη αξιοποίηση της τεχνολογίας (Ngo et al., 2018).

4.7 Παραγωγή αγροτικών προϊόντων

Η γεωργική παραγωγή και ειδικά η βιολογική γεωργία αποτελεί έναν αναδυόμενο τομέα όπου η ΠΚ αρχίζει να βρίσκει ουσιαστικές εφαρμογές. Η ανάγκη για βιώσιμη παραγωγή, μείωση κόστους εξοπλισμού και δυνατότητα προσαρμογής εργαλείων και συστημάτων στις ιδιαίτερες

απαιτήσεις καλλιεργειών καθιστά την τεχνολογία αυτή ιδανική (Gao et al., 2015; Gebler et al., 2014). Μέσω της παραγωγής εξειδικευμένων εξαρτημάτων, εργαλείων και λύσεων για συστήματα καλλιέργειας ή υδροπονίας, τα βιολογικά αγροκτήματα μπορούν να λειτουργούν με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η εταιρεία Lettuce Abound, που δραστηριοποιείται στον τομέα της βιολογικής και υδροπονικής καλλιέργειας, αξιοποιεί την τεχνολογία εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting) για την παραγωγή εξειδικευμένων εξαρτημάτων (Additive Manufacturing Media, 2019). Χρησιμοποιώντας ως υλικό το πολυαμίδιο (PA), η εταιρεία κατασκευάζει καλάθια ανάπτυξης και εξαρτήματα για αεροπονικά συστήματα, επιτυγχάνοντας προσαρμοστικότητα στις ανάγκες των καλλιεργειών και μείωση του κόστους εξοπλισμού.

Πίνακας 7. Εφαρμογή ΠΚ στη γεωργική παραγωγή.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
Lettuce Abound	Binder Jetting	PA (νάιλον)	Υδροπονικά συστήματα,	Προσαρμοστικότητα , μείωση κόστους παραγωγής

Η χρήση της ΠΚ στον τομέα της βιολογικής γεωργίας έχει σημαντικές τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Η αξιοποίηση βιοδιασπώμενων υλικών, όπως το PLA, ενισχύει την περιβαλλοντική υπευθυνότητα, ενώ η δυνατότητα σχεδίασης εξαρτημάτων κατά παραγγελία μειώνει την ανάγκη για δαπανηρά εργαλεία και βοηθήματα παραγωγής (Ngo et al., 2018). Επιπλέον, τα αγροκτήματα μπορούν να παράγουν εξαρτήματα εσωτερικά, αποκτώντας μεγαλύτερη αυτονομία και μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικούς προμηθευτές.

Ωστόσο, οι προκλήσεις παραμένουν. Τα βιοδιασπώμενα πολυμερή χρειάζονται βελτίωση για χρήση σε απαιτητικές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας, ενώ η κλίμακα παραγωγής παραμένει περιορισμένη κυρίως σε μικρές σειρές και εξειδικευμένα εξαρτήματα. Στο μέλλον, αναμένεται η δημιουργία ευέλικτων μονάδων ΠΚ (farm-based AM hubs), όπου κάθε αγρόκτημα θα ενσωματώνει εξοπλισμό ΠΚ για την επιτόπια παραγωγή όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων (Attaran, 2017).

4.8 Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός

Ο τομέας της παραγωγής βαρέων οχημάτων, μηχανημάτων και εξοπλισμού περιλαμβάνει κλάδους με ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις σε αντοχή, αξιοπιστία και μεγάλες κλίμακες παραγωγής. Η ΠΚ εισάγεται προοδευτικά στον χώρο αυτό, κυρίως για την παραγωγή ανθεκτικών μεταλλικών εξαρτημάτων, την επισκευή κρίσιμων συστημάτων και τη μείωση των αποθεμάτων ανταλλακτικών (Frazier, 2014; Murr, 2016). Το βασικό πλεονέκτημα έγκειται στη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων γεωμετριών που είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους, καθώς και στην ευελιξία της κατ' απαίτηση παραγωγής που μειώνει το χρόνο αναμονής και το κεφαλαιακό κόστος (Herzog et al., 2016; Gibson et al., 2021).

Caterpillar, κορυφαία εταιρεία παραγωγής βαρέων μηχανημάτων, αξιοποιεί την τεχνολογία εξώθησης υλικού (ME) για την παραγωγή ανταλλακτικών και εξαρτημάτων κατά παραγγελία, όπως λαβές και καλύμματα (Stratasys, 2019). Η χρήση θερμοπλαστικών πολυμερών επιτρέπει την ταχεία αντικατάσταση μερών χωρίς την ανάγκη διατήρησης μεγάλων αποθεμάτων.

Ο κλάδος των σιδηροδρομικών μεταφορών και γενικότερα των μέσων μαζικής μεταφοράς υιοθετεί όλο και περισσότερο τις τεχνολογίες ΠΚ, προκειμένου να βελτιώσει την ανθεκτικότητα των εξαρτημάτων, να μειώσει το κόστος αποθήκευσης ανταλλακτικών και να επιταχύνει τις διαδικασίες συντήρησης. Η ανάγκη για εξοπλισμό μεγάλης διάρκειας ζωής, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα των ανταλλακτικών που συχνά απαιτούνται σε μικρές ποσότητες, καθιστά την ΠΚ στρατηγικό εργαλείο στον κλάδο αυτό (Wohlert, 2020; Berman, 2012). Η εφαρμογή της μειώνει τον χρόνο παράδοσης ανταλλακτικών, καθώς τα εξαρτήματα εκτυπώνονται κατά παραγγελία, περιορίζοντας τα αποθέματα. Παράλληλα, υποστηρίζει τη βιωσιμότητα μέσω τοπικής παραγωγής που μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Attaran, 2017) και δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων σχεδιαστικών λύσεων με βελτιωμένη εργονομία και ενεργειακή αποδοτικότητα, ενώ ενισχύει τη διαθεσιμότητα του στόλου μέσω ταχύτερων επισκευών και ανακατασκευών (Tino et al., 2016).

Στον κλάδο των σιδηροδρομικών μεταφορών, η Alstom χρησιμοποιεί τη μέθοδο φωτοπολυμερισμού σε κάρδο (VP) για την κατασκευή ανταλλακτικών συντήρησης και εξαρτημάτων για τα οχήματά της (Nexa3D, 2023). Μέσω της χρήσης φωτοπολυμερών

ρητινών, η εταιρεία επιτυγχάνει την παραγωγή εξαρτημάτων με υψηλή ακρίβεια και φινίρισμα, μειώνοντας τους χρόνους παράδοσης για κρίσιμα ανταλλακτικά του στόλου της.

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ΠΚ στον κλάδο της παραγωγής ενέργειας.

Εταιρεία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Εφαρμογή	Οφέλη
Caterpillar	ME	Θερμοπλαστικά	Ανταλλακτικά (λαβές καλύμματα)	Ταχεία αντικατάσταση, μείωση αποθεμάτων
Alstom	VP	Φωτοπολυμερείς Ρητίνες	Εσωτερικά εξαρτήματα συρμών, ανταλλακτικά συντήρησης	Υψηλή ακρίβεια , Μείωση χρόνου παράδοσης

Ωστόσο, η υιοθέτηση της ΠΚ στον κλάδο συνοδεύεται και από προκλήσεις. Η κλιμάκωση παραγωγής εξακολουθεί να αποτελεί ζήτημα, καθώς η κατασκευή πολύ μεγάλων εξαρτημάτων παραμένει χρονοβόρα και δαπανηρή (Ford & Despeisse, 2016). Επιπλέον, η πιστοποίηση των εξαρτημάτων αλλά και των υλικών απαιτεί αυστηρή συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα όπως το ISO/ASTM 52900, ώστε να διασφαλίζεται η καταλληλότητα και η ασφάλεια σε βιομηχανικά περιβάλλοντα (ASTM, 2019).

Στο μέλλον, αναμένεται η ανάπτυξη υβριδικών διαδικασιών που θα συνδυάζουν PBF και DED, με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας και την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων διαφορετικών τεχνολογιών (Ngo et al., 2018). Στο πεδίο των σιδηροδρομικών μεταφορών αναμένεται να υπάρξει εστίαση στην εξατομίκευση των εσωτερικών χώρων συρμών, στη δημιουργία ψηφιακών αποθετηρίων ανταλλακτικών με δυνατότητα τοπικής εκτύπωσης και στη συνδυασμένη χρήση της τεχνολογίας με μεθόδους προβλεπτικής συντήρησης για δυναμική παραγωγή εξαρτημάτων όταν ανιχνεύονται βλάβες.

4.9 Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός και κατασκευές

Ο κατασκευαστικός κλάδος αποτελεί έναν από τους τομείς όπου η ΠΚ έχει αρχίσει να μετασχηματίζει ριζικά τις μεθόδους δημιουργίας και παραγωγής. Η δυνατότητα κατασκευής εξαιρετικά πολύπλοκων δομών μεγάλης κλίμακας, με ακρίβεια και υψηλό βαθμό εξατομίκευσης, καθιστά την τεχνολογία αυτή ιδανικό εργαλείο για έργα που απαιτούν

μοναδικότητα, βιωσιμότητα και καινοτόμο σχεδιασμό (Gosselin et al., 2016; Lim et al., 2012). Η χρήση της στον χώρο της αρχιτεκτονικής εκτείνεται από την παραγωγή εξειδικευμένων πάνελ και διακοσμητικών στοιχείων έως τη δημιουργία επίπλων και δομικών μονάδων, μειώνοντας παράλληλα τα απόβλητα και το κόστος ανάπτυξης πρωτοτύπων (Buswell et al., 2018).

Η στρατηγική σημασία της ΠΚ για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό εντοπίζεται στην ελευθερία που προσφέρει στον σχεδιασμό, επιτρέποντας την παραγωγή οργανικών γεωμετριών και πλήρως εξατομικευμένων δομών (Tay et al., 2017). Επιπλέον, η τεχνολογία υποστηρίζει τη βιωσιμότητα μειώνοντας το υλικό που απορρίπτεται κατά τη διαδικασία, ενώ αυξάνει και το βαθμό εξατομίκευσης, προσαρμόζοντας κάθε έργο ή εφαρμογή στις ανάγκες του εκάστοτε πελάτη (Ngo et al., 2018). Ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα είναι η επιτάχυνση της διαδικασίας πρωτοτυποποίησης, καθώς ο ψηφιακός σχεδιασμός μεταφέρεται απευθείας σε φυσικά αντικείμενα χωρίς τη μεσολάβηση καλουπιών (Pradel et al., 2018).

Η Aectual, εταιρεία αρχιτεκτονικού σχεδιασμού με έδρα την Ολλανδία, έχει αναδειχθεί σε πρωτοπόρο στην αξιοποίηση της ΠΚ (Πίν. 9). Χρησιμοποιεί μεθόδους εξώθησης υλικού μεγάλης κλίμακας για την κατά παραγγελία παραγωγή αρχιτεκτονικών στοιχείων και εσωτερικών διακοσμήσεων, ενώ δίνει έμφαση στη βιωσιμότητα μέσω της χρήσης ανακυκλωμένων πολυμερών όπως το PLA (Aectual, 2020). Οι εφαρμογές της περιλαμβάνουν εξατομικευμένα δάπεδα, τοίχους, πάνελ και αρχιτεκτονικά έπιπλα. Τα οφέλη που προκύπτουν σχετίζονται με τη μείωση κόστους σε σχέση με συμβατικές μεθόδους, την προώθηση της κυκλικής οικονομίας μέσω οικολογικών υλικών και τη δυνατότητα μαζικής εξατομίκευσης σε έργα μεγάλης κλίμακας (Perkins & Skitmore, 2015).

Η εφαρμογή της ΠΚ στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό έχει σημαντικές τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Συμβάλλει στη μείωση κόστους πρωτοτύπων, αφού τα δομικά στοιχεία εκτυπώνονται άμεσα χωρίς ανάγκη για κατασκευή καλουπιών, προωθεί την κυκλική οικονομία με τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών και απελευθερώνει τις δυνατότητες σχεδιασμού μέσα από τη δημιουργία περίπλοκων γεωμετριών που δεν είναι εφικτές με παραδοσιακές μεθόδους (Khoshnevis, 2004). Ωστόσο, παραμένουν προκλήσεις που σχετίζονται με την κλίμακα παραγωγής, καθώς ενώ η τεχνολογία είναι ιδανική για εξατομικευμένα έργα, η εφαρμογή της σε βιομηχανική κλίμακα απαιτεί σημαντική βελτίωση της ταχύτητας. Παράλληλα, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τυποποίησης και κανονιστικών πλαισίων για τη χρήση δομικών στοιχείων που προορίζονται για αρχιτεκτονικές εφαρμογές

(Perkins & Skitmore, 2015). Στο μέλλον, αναμένεται η δημιουργία κτηρίων αρθρωτής (modular) δομής, τα οποία θα κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου μέσω ΠΚ, αξιοποιώντας βιώσιμα υλικά και ρομποτικούς εκτυπωτές μεγάλης κλίμακας (Tay et al., 2017).

4.10 Παραγωγή Τροφίμων και Εστίαση

Ο κλάδος της εστίασης και των τροφίμων αποτελεί ένα από τα πιο καινοτόμα πεδία εφαρμογής της ΠΚ. Η δυνατότητα εκτύπωσης τροφίμων, και ειδικότερα εναλλακτικών πρωτεϊνών ή καλλιεργημένων κρεάτων, ανοίγει νέες προοπτικές για μαζική εξατομίκευση, βιώσιμη παραγωγή και διαφοροποιημένες εμπειρίες καταναλωτή (Sun et al., 2015; Dankar et al., 2018). Η στρατηγική σημασία της τεχνολογίας στον χώρο αυτό έγκειται στην ικανότητά της να προσαρμόζει γεύσεις, σχήματα και υφές ανάλογα με τις ανάγκες του πελάτη, να μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μέσω της αξιοποίησης φυτικών ή κυτταρικών πρωτεϊνών, να δημιουργεί νέα προϊόντα που δεν μπορούν να παραχθούν με συμβατικές μεθόδους και να επιτρέπει την τοπική παραγωγή σε εστιατόρια και ξενοδοχειακές μονάδες (Godoi et al., 2016).

Η Aleph Farms αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα επιχειρηματικής καινοτομίας στον χώρο. Η εταιρεία ειδικεύεται στην καλλιέργεια κυτταρικού κρέατος και αξιοποιεί τεχνολογίες βιοεκτύπωσης (bioprinting) για τη δημιουργία υφής παρόμοιας με αυτή του παραδοσιακού κρέατος. Η μέθοδός της βασίζεται στη χρήση ικριωμάτων (scaffolds) πρωτεϊνικής βάσης πάνω στα οποία αναπτύσσονται ζωικά κύτταρα, οδηγώντας στην παραγωγή τρισδιάστατων τεμαχίων κρέατος (Post, 2012; Stephens et al., 2018). Οι εφαρμογές της αφορούν καλλιεργημένα κομμάτια κρέατος που απευθύνονται σε γαστρονομικές εμπειρίες υψηλής αξίας, ενώ τα βασικά οφέλη περιλαμβάνουν τη μείωση του περιβαλλοντικού κόστους παραγωγής, τη δημιουργία νέων αγορών εναλλακτικών πρωτεϊνών και τη συμβολή στη βιωσιμότητα του διατροφικού συστήματος (Tuomisto, 2019).

Οι τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις της χρήσης της ΠΚ στον τομέα των τροφίμων είναι πολυδιάστατες. Αφενός, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας καινοτόμων προϊόντων που διευρύνουν την αγορά πολυτελούς εστίασης και την υψηλή γαστρονομία, ενώ αφετέρου υποστηρίζεται η μελλοντική ανάπτυξη σε μαζικές αγορές μέσω τοπικής παραγωγής, μειώνοντας σημαντικά το κόστος αποθήκευσης και διανομής (Severini & Derossi, 2016). Παράλληλα, η χρήση αυτών των τεχνολογιών συνδέεται με τη δυνατότητα εξατομίκευσης των γευμάτων, προσφέροντας μοναδικές εμπειρίες στους καταναλωτές.

Ωστόσο, η αξιοποίηση της ΠΚ στον κλάδο των τροφίμων αντιμετωπίζει προκλήσεις. Η μετάβαση από πιλοτικά έργα σε βιομηχανική κλίμακα απαιτεί βελτίωση των παραγωγικών δυνατοτήτων, ενώ τα ρυθμιστικά ζητήματα που σχετίζονται με την έγκριση από διεθνείς οργανισμούς τροφίμων, όπως FDA και EFSA, παραμένουν καθοριστικά (Bodiu et al., 2020). Εξίσου σημαντική είναι και η αποδοχή του καταναλωτή, καθώς αν και τα προϊόντα χαρακτηρίζονται από υψηλή βιωσιμότητα, απαιτείται ενημέρωση και αλλαγή νοοτροπίας (Slade, 2018). Στο μέλλον, οι τεχνολογίες ΠΚ στον κλάδο των τροφίμων αναμένεται να εστιάσουν στην οικονομική βιωσιμότητα, στη διεύρυνση της ποικιλίας προϊόντων και στη δυνατότητα μαζικής εξατομίκευσης γευμάτων τόσο στην εστίαση όσο και σε οικιακές εφαρμογές.

4.11 Βιομηχανικά Υδραυλικά Συστήματα

Ο κλάδος των βιομηχανικών υδραυλικών συστημάτων αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους τομείς για την αυτοματοποίηση και τη βελτίωση της αποδοτικότητας στη βιομηχανική παραγωγή. Οι υδραυλικές μονάδες αξιοποιούνται στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, και στην παραγωγή ενέργειας, αποτελώντας θεμέλιο για τη λειτουργία πολύπλοκων μηχανημάτων και υποδομών. Η ΠΚ δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης βελτιστοποιημένων υδραυλικών εξαρτημάτων με μικρότερο βάρος, υψηλότερη αξιοπιστία και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας (Wits et al., 2016; Ford & Despeisse, 2016).

Η στρατηγική σημασία της ΠΚ στον τομέα αυτό έγκειται στην ικανότητα δημιουργίας τοπολογικά βελτιστοποιημένων καναλιών ροής που μειώνουν τις απώλειες πίεσης (Yuan et al., 2018), στην παραγωγή ελαφρύτερων εξαρτημάτων που περιορίζουν το ενεργειακό κόστος λειτουργίας και στην ευελιξία κατασκευής εξειδικευμένων λύσεων, ανάλογα με τις ανάγκες του πελάτη. Παράλληλα, η δυνατότητα εκτύπωσης ανταλλακτικών κατ' απαίτηση συμβάλλει στη μείωση του κόστους συντήρησης και στη βελτίωση της επιχειρησιακής διαθεσιμότητας (Gibson et al., 2021).

Η βρετανική εταιρεία Domin αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα καινοτομίας στον κλάδο. Μέσω τεχνικών PBF κατασκευάζει υδραυλικές σερβοβαλβίδες και εξαρτήματα υψηλής απόδοσης με πολύπλοκα εσωτερικά κανάλια που δεν θα μπορούσαν να παραχθούν με συμβατικές μεθόδους. Οι εφαρμογές της εκτείνονται από συστήματα ελέγχου ροής στη βιομηχανία έως υδραυλικές μονάδες για την αεροναυπηγική, αξιοποιώντας κράματα τιτανίου

και ατσάλι υψηλής αντοχής. Τα οφέλη περιλαμβάνουν μείωση βάρους έως 25%, βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας, αυξημένη διάρκεια ζωής εξαρτημάτων και δυνατότητα ταχείας ανάπτυξης εξατομικευμένων λύσεων (Domin, 2020).

Οι τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις της αξιοποίησης της ΠΚ στα βιομηχανικά υδραυλικά συστήματα είναι πολλαπλές. Η μείωση του βάρους και η βελτιστοποίηση των καναλιών ροής οδηγούν σε αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα (Yuan et al., 2018), ενώ περιορίζονται οι ανάγκες για δαπανηρές και χρονοβόρες διεργασίες κατεργασίας. Παράλληλα, η αξιοπιστία των εξαρτημάτων ενισχύεται, εξασφαλίζοντας καλύτερη απόδοση σε κρίσιμες βιομηχανικές εφαρμογές.

Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν. Η πιστοποίηση των υδραυλικών εξαρτημάτων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση, καθώς απαιτούνται αυστηρές δοκιμές για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία τους (ISO/ASTM 52900, 2021). Η κλιμάκωση της παραγωγής αποτελεί επίσης εμπόδιο, αφού η υψηλή ταχύτητα κατασκευής είναι αναγκαία για την εκτεταμένη βιομηχανική εφαρμογή. Στο μέλλον, αναμένεται η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων ΠΚ για τον κλάδο των υδραυλικών, τα οποία θα μειώσουν περαιτέρω το κόστος, θα αυξήσουν την αποδοτικότητα και θα διευρύνουν τις δυνατότητες εφαρμογής σε βιομηχανία και αεροναυπηγική (Ford & Despeisse, 2016).

4.12 Ναυπηγική Βιομηχανία και Ναυτιλία

Η ναυπηγική βιομηχανία και ο κλάδος της ναυτιλίας αντιμετωπίζουν μεγάλες προκλήσεις που σχετίζονται με το υψηλό κόστος συντήρησης, την ανάγκη για εξειδικευμένα εξαρτήματα και την αυξανόμενη απαίτηση για βιώσιμες τεχνολογίες. Η ΠΚ προσφέρει καινοτόμες λύσεις σε αυτούς τους τομείς, επιτρέποντας την παραγωγή ανταλλακτικών κατά παραγγελία, την επιδιόρθωση κρίσιμων συστημάτων και την ανάπτυξη νέων ναυτικών εξαρτημάτων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (Laverne et al., 2015; Towsyfyfan et al., 2022).

Η στρατηγική σημασία της ΠΚ στη ναυτιλία συνδέεται με τη δυνατότητα παραγωγής ανταλλακτικών κατ' απαίτηση σε λιμάνια ή ακόμη και εν πλω, περιορίζοντας σημαντικά τον χρόνο ακινησίας πλοίων (Knapp et al., 2020). Η μείωση του κόστους αποθήκευσης και διακίνησης μέσω περιορισμού της ανάγκης για μεγάλες αποθήκες ανταλλακτικών, ενισχύει την οικονομική αποδοτικότητα, ενώ η κατασκευή ελαφρύτερων και αποδοτικότερων εξαρτημάτων οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων (García et al., 2018). Επιπλέον, η χρήση

ανακυκλώσιμων και προηγμένων υλικών συμβάλλει στη βιωσιμότητα του κλάδου (Muirhead et al., 2019).

Η εταιρεία Innotech Marine αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αξιοποίησης ΠΚ στη ναυτιλία. Εφαρμόζοντας την τεχνολογία φωτοπολυμερισμού σε κάδο (VP), κατασκευάζει εξαρτήματα μέσω της διαδικασίας ελεύθερης μορφοποίησης έγχυσης (Freeform Injection Molding) (Nexa3D, 2021). Ως υλικό χρησιμοποιείται η ειδική ρητίνη xMOLD, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία εξειδικευμένων ναυτιλιακών εξαρτημάτων με χαμηλό κόστος και υψηλή ταχύτητα, αποφεύγοντας τις χρονοβόρες παραδοσιακές μεθόδους καλουπώματος.

Οι τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις της χρήσης ΠΚ στη ναυπηγική περιλαμβάνουν την αύξηση επιχειρησιακής διαθεσιμότητας μέσω περιορισμού του χρόνου εκτός λειτουργίας των πλοίων, τη βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμων μέσω ελαφρύτερων εξαρτημάτων και τη μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους μέσω χαμηλότερων εξόδων συντήρησης και ανταλλακτικών (Pecharsky et al., 2020). Παρά τα σημαντικά οφέλη, υπάρχουν προκλήσεις που αφορούν την πιστοποίηση των εξαρτημάτων, όπως επιβάλλουν οι διεθνείς ναυτιλιακοί κανονισμοί (DNV, 2020). Επιπλέον, οι περιορισμοί στην κλιμάκωση της παραγωγής και το μέγεθος των εξαρτημάτων εξακολουθούν να αποτελούν εμπόδιο για τη βιομηχανία. Μελλοντικά, αναμένεται περαιτέρω ενσωμάτωση της ΠΚ στα ναυπηγεία, αλλά και ανάπτυξη κινητών μονάδων ΠΚ που θα μπορούν να λειτουργούν σε λιμάνια ή ακόμα και πάνω σε πλοία (Khajavi et al., 2018).

Κεφάλαιο 5 – Σύνοψη μελέτης και συμπεράσματα

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία οι τεχνολογίες ΠΚ υπερέχουν ως μέθοδοι παραγωγής προϊόντων, έναντι των συμβατικών τεχνολογιών, στις περιπτώσεις που η γεωμετρική πολυπλοκότητα των προς κατασκευή αντικειμένων είναι υψηλή, ο όγκος παραγωγής είναι σχετικά μικρός (π.χ. απαιτείται κάποιου είδους εξατομίκευση) καθώς και όταν τα προϊόντα παράγονται κατά παραγγελία ή τοπικά. Παράλληλα, τα οφέλη από την εφαρμογή της τεχνολογίας σε πεδία όπως η παραγωγή εργαλείων παραγωγής, πρωτοτύπων και μοντέλων σχεδιασμού, η επισκευή/ανακατασκευή κρίσιμων εξαρτημάτων και εξοπλισμού και η κατά απαίτηση παραγωγή.

Η εμπειρική εικόνα που προκύπτει από τις εντοπισθείσες περιπτώσεις εφαρμογής επιβεβαιώνει σε μεγάλο βαθμό τα θεωρητικό πλαίσιο, αλλά αναδεικνύει και αποκλίσεις που οφείλονται σε διάφορους παράγοντες, όπως το κανονιστικό πλαίσιο, , τεχνικούς περιορισμούς, τα κόστη υλικών, η υπάρχουσα δομή των εφοδιαστικών αλυσίδων και η οργανωσιακή ετοιμότητα. Στην αεροδιαστημική, όπου η θεωρία προβλέπει τη μέγιστη καταλληλότητα λόγω των ειδικών απαιτήσεων αντοχής και χαμηλού βάρους, η πρακτική υιοθέτηση από οργανισμούς όπως οι Airbus, Rolls-Royce και Lockheed Martin επιβεβαιώνει το πλεονέκτημα συγκεκριμένων μεθόδων ΠΚ όπως η σύντηξη πούδρας σε κλίνη (PBF) για την απευθείας κατασκευή εξαρτημάτων και η εναπόθεση με δέσμες ενέργειας (DED) για την επισκευή κρίσιμων εξαρτημάτων. Η μετάβαση στην ΠΚ, ωστόσο, δεν είναι χωρίς προκλήσεις καθώς οι απαιτήσεις πιστοποίησης, ιχνηλασιμότητας και ελέγχου της μικροδομής των σχετικών προϊόντων επιβάλλουν τη σταδιακή εφαρμογή σε εξαρτήματα όπου τα αναμενόμενα λειτουργικά οφέλη, π.χ. από τη μείωση του βάρους ή τη καλύτερη διαχείριση του θερμικού φορτίου είναι σαφώς μετρήσιμα. Η θεωρία, δηλαδή, επαληθεύεται ως προς τις εφαρμογές δημιουργείται αξία, αλλά η ταχύτητα και το εύρος υιοθέτησης των τεχνολογιών καθορίζονται από κανονιστικούς και ποιοτικούς περιορισμούς.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία η θεωρητική ανάλυση υποδεικνύει ότι η ΠΚ έχει ισχυρό ρόλο στον σχεδιασμό και στην κατασκευή εργαλείων και βοηθημάτων παραγωγής, αλλά και πιο επιλεκτικό ρόλο στην τελική παραγωγή. Η πρακτική αυτοκινητοβιομηχανιών όπως οι Volkswagen και BMW ευθυγραμμίζεται με αυτό το πλαίσιο, καθώς παρατηρείται ευρεία αξιοποίηση για εργαλεία και ιδιοσυσκευές παραγωγής, αλλά και κλιμακούμενη παραγωγή τελικών εξαρτημάτων όταν το όφελος από τοπολογική βελτιστοποίηση και ενοποίηση

εξαρτημάτων αντισταθμίζει το κόστος παραγωγής. Η θεωρία προβλέπει, επίσης, μεγαλύτερη οφέλη στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που μένει να αποδειχθεί. Τα εντοπισθέντα παραδείγματα δείχνουν την αρχή αυτής της μετάβασης, με τον ρυθμό όμως να εξαρτάται από το κόστος υλικών, το ρυθμό πιστοποίησης και τις λειτουργικές απαιτήσεις.

Στον κλάδο των ιατρικών προϊόντων και των υπηρεσιών υγείας, το θεωρητικό πλαίσιο της «πλήρους εξατομίκευσης» επαληθεύεται σχεδόν απόλυτα στην πράξη. Επιχειρήσεις όπως οι Stryker, Straumann και Zimmer Biomet χρησιμοποιούν μεθόδους PBF για την παραγωγή εμφυτευμάτων με βελτιστοποιημένη εσωτερική δομή και ιδιότητες επιφάνειας, επιτυγχάνοντας καλύτερη εφαρμογή και βελτιωμένη οστεοενσωμάτωση. Η θεωρία, ωστόσο, υποτιμά συχνά την επίδραση των απαιτήσεων κανονιστικής συμμόρφωσης στο χρόνο ανάπτυξης και στο κόστος, καθώς και την ανάγκη για αυστηρά συστήματα ποιότητας που διασφαλίζουν επαναληπτικότητα και συνέπεια μεταξύ παρτίδων παραγωγής. Έτσι, ενώ η αξία από την εξατομίκευση επαληθεύεται πλήρως, η κλιμάκωση της παραγωγής υπόκειται σε φραγμούς τεχνικού αλλά και κανονιστικού χαρακτήρα.

Στους κλάδους παραγωγής ενέργειας και βαρέως εξοπλισμού, η θεωρία αναδεικνύει την υπεροχή της ΠΚ σε περιβάλλοντα υψηλής θερμομηχανικής καταπόνησης, ιδίως όταν η ανακατασκευή (repair/remanufacturing) μειώνει το συνολικό κόστος κύκλου ζωής. Οι Siemens Energy και Baker Hughes επιβεβαιώνουν ότι η εκμετάλλευση των τεχνικών DED και PBF επιφέρει ουσιαστικές βελτιώσεις σε διαθεσιμότητα εξοπλισμού, χρόνο επισκευής και απόδοση καυσίμου. Η απόκλιση από τη θεωρία εντοπίζεται κυρίως στο ότι μεγάλο μέρος της αξίας προέρχεται από υπηρεσίες επισκευής και τη μείωση του σχετικού κόστους αποθέματος, και λιγότερο από την μαζική παραγωγή νέων κομματιών, υπογραμμίζοντας πως η ΠΚ λειτουργεί περισσότερο ως ένα εξελιγμένο εργαλείο υποστήριξης των υπηρεσιών συντήρησης παρά ως μια εναλλακτική μέθοδος παραγωγής εξαρτημάτων.

Σε κλάδους με έντονο αισθητικό ή εργονομικό χαρακτήρα, όπως τα καταναλωτικά προϊόντα, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός και τα κοσμήματα, τα θεωρητικά μοντέλα για «μαζική πολυπλοκότητα» και «μαζική εξατομίκευση» βρίσκουν άμεση αντανάκλαση. Επιχειρήσεις όπως οι Adidas, New Balance και Swarovski αξιοποιούν τεχνολογίες φωτοπολυμερισμού, εξώθησης υλικού και σύντηξης πούδρας σε κλίνη για τη γρήγορη ανάπτυξη νέων σχεδίων και στοχευμένες σειρές προϊόντων, εκμεταλλευόμενες τις δυνατότητες εξατομίκευσης και ελευθερίας ως προς τη μορφή. Η κύρια απόκλιση εδώ είναι ότι το θεωρητικό όφελος από την εφαρμογή ενός μοντέλου παραγωγής μεγάλης κλίμακας με μορφολογική ποικιλία συχνά

περιορίζεται από τα κόστη υλικών/κύκλου ζωής, καθώς και από τις απαιτήσεις ποιότητας επιφανειών που επιβάλλουν μετεπεξεργασία.

Σε αναδύμενα πεδία, όπως η εκτύπωση τροφίμων και η γεωργική παραγωγή, η θεωρία προβλέπει ριζικό επαναπροσδιορισμό αλυσίδων αξίας μέσω τοπικής, προσαρμοσμένης παραγωγής και νέων υλικών. Οι εφαρμογές της Aleph Farms στη δημιουργία τρισδιάστατης υφής προϊόντων πρωτεΐνης και οι πρακτικές in-house παραγωγής εργαλείων/ιδιοσυσκευών από επιχειρήσεις όπως η Lettuce Abound δείχνουν ότι τα θεωρητικά οφέλη υλοποιούνται πιλοτικά, αλλά η κλιμάκωση απαιτεί την ωρίμανση των σχετικών υλικών και διαδικασιών, την ικανοποίηση των κανονιστικών περιορισμών και τη διεύρυνση του βαθμού αποδοχής των προϊόντων από τους καταναλωτές.

Στις σιδηροδρομικές μεταφορές, την παραγωγή υδραυλικών συστημάτων και στη ναυτιλία, τα μοντέλα «ψηφιακών ανταλλακτικών» και «κατ' απαίτηση εφοδιασμού» φαίνεται να επιβεβαιώνονται στην πράξη. Η Alstom μειώνει χρόνους και αποθέματα χρησιμοποιώντας μεθόδους PBF/ME για ανταλλακτικά, η Domin αξιοποιεί τεχνικές PBF για βελτιστοποιημένες υδραυλικές διαδρομές ροής και η Innotech Marine αξιοποιεί VP για παραγωγή/επισκευή κρίσιμων εξαρτημάτων. Η θεωρία ίσως υπερεκτιμά την ταχύτητα μετάβασης προς αποκεντρωμένα, πλήρως τοπικά δίκτυα παραγωγής καθώς στην πράξη, υιοθετούνται μικτά μοντέλα με κεντρικούς κόμβους ΠΚ, αυστηρά πρωτόκολλα υλικών και επιλεγμένες τοπικές δυνατότητες.

Συνολικά, η μελέτη των επιχειρήσεων του δείγματος δείχνει ότι τα θεωρητικά μοντέλα αποτυπώνουν με ακρίβεια τους μηχανισμούς δημιουργίας αξίας της ΠΚ: μείωση κόστους μορφολογικής πολυπλοκότητας, εξατομίκευση χωρίς ειδικά εργαλεία παραγωγής, μείωση βάρους και λειτουργική ολοκλήρωση, και αναδιάταξη της εφοδιαστικής μέσω ψηφιακών αποθεμάτων. Εκεί όπου η πράξη αποκλίνει είναι η ταχύτητα και το εύρος κλιμάκωσης, κυρίως λόγω των απαιτήσεων συμμόρφωσης στα κανονιστικά πλαίσια, της υψηλής μεταβλητότητας στις διαδικασίες παραγωγής, αλλά και των απαιτήσεων για δευτερεύουσα επεξεργασία που αυξάνουν το κόστος παραγωγής. Οι πιο ώριμες εφαρμογές εστιάζουν σε «υψηλή αξία ανά τεμάχιο» (αεροδιαστημική, υγεία, ενέργεια) και σε «υψηλή αξία από ποικιλία/brand» (καταναλωτικά/πολυτελή προϊόντα, αρχιτεκτονική), ενώ η μαζική παραγωγή παραμένει περιορισμένη σε επιλεγμένες περιπτώσεις όπου ο σχεδιασμός και η εφοδιαστική λογική ευθυγραμμίζονται με τα πλεονεκτήματα της ΠΚ.

Η πρακτική συνέπεια για στρατηγική και επενδύσεις είναι ότι η Προσθετική Κατασκευή αποδίδει βέλτιστα όταν εντάσσεται σε υβριδικά οικοσυστήματα, όπου ένα εύρος τεχνολογιών ΠΚ χρησιμοποιείται για την συμπληρώνοντας : συνδυασμοί PBF/DED για νέα μέρη και επισκευές, αξιοποίηση VP/MJ/ME για πρωτοτυποποίηση και κατασκευή εργαλείων/βοηθημάτων, και ανάπτυξη ψηφιακών καταλόγων ανταλλακτικών που ενεργοποιούν κατά παραγγελία παραγωγή κοντά στο σημείο ζήτησης. Έτσι, η πραγματικότητα δεν αναιρεί τη θεωρία: την εξειδικεύει, θέτοντας ρεαλιστικούς φραγμούς και προϋποθέσεις για να μετουσιωθεί η «πλήρης ελευθερία κατασκευής» σε βιώσιμη, επαναλαμβανόμενη επιχειρησιακή αξία.

Η συγκριτική αξιολόγηση των εμπειρικών δεδομένων με το θεωρητικό πλαίσιο των οκτώ πεδίων εφαρμογής αναδεικνύει μια σαφή διχοτόμηση στον τρόπο βιομηχανικής ενσωμάτωσης της Προσθετικής Κατασκευής. Ειδικότερα, η Μαζική Εξατομίκευση δεν αποτελεί πλέον μια θεωρητική δυνατότητα αλλά μια εδραιωμένη πρακτική, κυρίως μέσω της τεχνολογίας Φωτοπολυμερισμού σε Κάδο . Η συγκεκριμένη τεχνολογία κυριαρχεί στον κλάδο των ιατρικών και οδοντιατρικών εφαρμογών, καθώς η υψηλή ακρίβεια και η χρήση βιοσυμβατών ρητινών επιτρέπουν την παραγωγή χιλιάδων μοναδικών προϊόντων (π.χ. οδοντιατρικοί νάρθηκες) με οικονομική αποδοτικότητα. Αντιθέτως, στο πεδίο της Μαζικής Παραγωγής, η βιομηχανία φαίνεται να στρέφεται πραγματιστικά κυρίως προς την Εξώθηση Υλικού (ME) και δευτερευόντως προς τη Σύντηξη Πούδρας (PBF) για την παραγωγή σειρών μεσαίου όγκου σε καταναλωτικά αγαθά. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση του χαμηλού λειτουργικού κόστους, ειδικά στην περίπτωση της ME όπου η χρήση οικονομικών θερμοπλαστικών (όπως PLA και PETG) καθιστά την ΠΚ ανταγωνιστική για προϊόντα καθημερινής χρήσης, ενώ η PBF αξιοποιείται συμπληρωματικά για ανθεκτικότερα εξαρτήματα από πολυαμίδια.

Ιδιαίτερη βαρύτητα φέρει η δημογραφική ανάλυση των επιχειρήσεων, όπου οι Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις αναδεικνύονται σε κινητήριο μοχλό της τεχνολογικής διάχυσης, αντιπροσωπεύοντας την πλειοψηφία των καταγεγραμμένων εφαρμογών. Η προτίμησή τους στην Εξώθηση Υλικού δεν είναι τυχαία, αλλά αποτελεί στρατηγική επιλογή για την υπέρβαση των υψηλών φραγμών εισόδου της παραδοσιακής μεταποίησης. Μέσω αυτής της τεχνολογίας, οι Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις επιτυγχάνουν ταχεία είσοδο σε εξειδικευμένες αγορές και προσφέρουν καινοτόμα προϊόντα χωρίς την ανάγκη μεγάλων κεφαλαιουχικών επενδύσεων σε μήτρες και εργαλεία. Στον αντίποδα, οι μεγάλες επιχειρήσεις διατηρούν την πρωτοκαθεδρία

στις τεχνολογίες υψηλής έντασης κεφαλαίου, όπως η Σύντηξη Πούδρας σε Κλίνη. Η επιλογή αυτή υπαγορεύεται από τις αυστηρές απαιτήσεις πιστοποίησης και μηχανικής αντοχής σε κλάδους όπως η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η δυνατότητα παραγωγής λειτουργικών μεταλλικών εξαρτημάτων υψηλής απόδοσης δικαιολογεί το αυξημένο κόστος επένδυσης και μετεπεξεργασίας. Συνεπώς, διαμορφώνεται ένα οικοσύστημα δύο ταχυτήτων: οι μικρότερες εταιρείες αξιοποιούν την ΠΚ ως εργαλείο ευελιξίας και επιχειρηματικής καινοτομίας, ενώ οι βιομηχανικοί κολοσσοί την ενσωματώνουν ως στρατηγικό μέσο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης και την αναδιαμόρφωση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Βιβλιογραφία

- Achillas, C., Aidonis, D., Iakovou, E., Thymianidis, M. and 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, pp.328–339.
- Additive Manufacturing Media (2019). Pic of the Week: Aeroponics Grow Baskets. Available at: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/pic-of-the-week-aeroponics-grow-baskets>
- Adidas (2020) Futurecraft 4D: 3D printed midsoles. Adidas Group. Available at: <https://www.adidas-group.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Aectual (2021) Sustainable architecture with 3D printing. Aectual. Available at: <https://www.aectual.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Ahn, S.H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. & Wright, P.K. (2002). “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS.” *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), pp.248–257.
- Airbus (2021) Airbus and additive manufacturing: Lighter, faster, greener. Airbus Official Website. Available at: <https://www.airbus.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Aleph Farms (2022) Cultivated steaks through 3D bioprinting. Aleph Farms. Available at: <https://www.aleph-farms.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Alstom (2020) 3D printing in railway maintenance. Alstom. Available at: <https://www.alstom.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Baker Hughes (2021) Additive manufacturing in oil and gas equipment. Baker Hughes. Available at: <https://www.bakerhughes.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Bandyopadhyay, A. & Heer, B. (2018). Additive Manufacturing of Biomaterials. *Progress in Materials Science*, 93, pp.45–111.
- Bártolo, P.J. (2011) *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*. Springer.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), pp.155–162.
- BMW Group (2019) Additive manufacturing in automotive applications. BMW Press. Available at: <https://www.bmwgroup.com> (Accessed: 12 September 2025).
- BMW Group (2024). Production with 3D Printing. Available at: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2024/production-with-3d-printing.html>
- Bogers, M., Hadar, R. and Bilberg, A., 2016. Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, pp.225–239.
- Caterpillar (2020) 3D printing for heavy equipment parts. Caterpillar Inc. Available at: <https://www.caterpillar.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof, A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C. and Limperos, J. W. (2014) ‘Making sense of 3D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services’, *Additive Manufacturing*, 1–4, pp. 64–76.
- Crump, S.S. (1992). “Apparatus and method for creating three-dimensional objects.” US Patent 5121329A.
- D’Aveni, R.A., 2015. The 3-D printing revolution. *Harvard Business Review*, 93(5), pp.40–48.
- Danfoss (2020) Binder jetting applications in tooling. Danfoss Group. Available at: <https://www.danfoss.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Deckard, C. (1989) ‘Method and apparatus for producing parts by selective sintering’, US Patent 4863538.

- Despeisse, M. and Ford, S., 2015. The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. *Proceedings of the 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, pp.109–114.
- DNV (2020). Additive manufacturing — Guideline for certification in maritime applications. Oslo: Det Norske Veritas.
- Domin (2021) Hydraulic systems redefined with AM. Domin Official Website. Available at: <https://www.domin.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Fabbaloo (2016). From Sneakers to Sea Turtles: How New Balance's 3D Printing is Making an Impact. Available at: <https://www.fabbaloo.com/news/from-sneakers-to-sea-turtles-how-new-balances-3d-printing-is-making-an-impact>
- Fessler, J., Nickel, A., Link, G., Prinz, F. and Weiss, L. (1996). Functionalized laminated object manufacturing: Rapid prototyping for the next stage of design. *Mechanical Engineering*, 118(9), pp.68–73.
- Ford (2020). Additive Manufacturing at Ford: Driving Innovation in Automotive Industry. Ford Motor Company Report.
- Ford Motor Company (2020) 3D printing in automotive tooling and fixtures. Ford Media. Available at: <https://media.ford.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Ford, S. and Despeisse, M., 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, pp.1573–1587.
- Formnext (2022). Danfoss Industry Insights. Available at: https://formnext.mesago.com/frankfurt/en/industryinsights/fonmag/fonmag_articles/articles/danfoss.html
- Frazier, W. E. (2014) ‘Metal additive manufacturing: A review’, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), pp. 1917–1928.
- Gebler, M., Uiterkamp, A.J.S. and Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, pp.158–167.
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2015) *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd edn. New York: Springer.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. 3rd ed. Springer.
- Griffith, M., Schlienger, E., Harwell, L., Oliver, M., Baldwin, M., Ensz, M., Essien, M., Brooks, J., Robino, C. & Smugeresky, J. (1996). Free Form Fabrication of Metallic Components Using Laser Engineered Net Shaping (LENS). Sandia National Labs Report.
- Guo, N. and Leu, M. C. (2013) ‘Additive manufacturing: Technology, applications and research needs’, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), pp. 215–243.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C. (2016). “Additive manufacturing of metals.” *Acta Materialia*, 117, pp.371–392.
- Holmström, J. and Partanen, J., 2014. Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products. *Supply Chain Management: An International Journal*, 19(4), pp.421–430.
- Hull, C.W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. U.S. Patent 4575330.
- Innotech Marine (2021) Additive manufacturing for marine propulsion and repair. Innotech Marine. Available at: <https://www.innotechmarine.com> (Accessed: 12 September 2025).
- ISO/ASTM International (2015). ISO/ASTM 52900:2015 — Additive Manufacturing — General principles — Terminology. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- ISO/ASTM (2020). ISO/ASTM 52900:2020 - Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kellens, K., Mertens, R., Paraskevas, D., Dewulf, W. and Duflou, J.R., 2017. Environmental impact of additive manufacturing processes: does AM enable a more sustainable value chain?. *Procedia CIRP*, 61, pp.582–587.
- Khajavi, S.H., Partanen, J. and Holmström, J., 2014. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 65(1), pp.50–63.
- Khajavi, S.H., Holmström, J. & Partanen, J. (2018). Additive manufacturing in the maritime industry: A supply chain perspective. *Computers in Industry*, 97, pp. 1–10.
- Kruth, J.P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M. & Lauwers, B. (2004) ‘Selective laser melting of iron-based powder’, *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1–3), pp.616–622.
- Koslow, T. (2016) *Honda Produces Carbon Fiber Parts with Mcor Paper 3D Printing*. All3DP. Available at: <https://all3dp.com/honda-mcor-paper-3d-printing/> (Accessed: 15 September 2025)
- Laplume, A.O., Petersen, B. and Pearce, J.M., 2016. Global value chains from a 3D printing perspective. *Journal of International Business Studies*, 47(5), pp.595–609.
- Lettuce Abound (2021) 3D printing in hydroponic farming. Lettuce Abound. Available at: <https://www.lettuceabound.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Lockheed Martin (2020) Additive manufacturing for aerospace components. Lockheed Martin. Available at: <https://www.lockheedmartin.com> (Accessed: 12 September 2025).
- LVMH 2025, (<https://www.lvmh.com>)
- Matsuzaki, R. and Ueda, M. (2000). Laminated Object Manufacturing of Short-Fiber Reinforced Thermoplastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 100(1–3), pp.261–265.
- Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J. & Hetzner, D. (1997). “The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components.” *Journal of Metals*, 49(5), pp.55–60.
- New Balance (2020) 3D printing for customized footwear. New Balance. Available at: <https://www.newbalance.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. and Hui, D. (2018) ‘Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges’, *Composites Part B: Engineering*, 143, pp. 172–196.
- Nexa3D (2021). Innotech Marine Case Study. Available at: <https://nexa3d.com/case-studies/innotech-case-study/>
- Nexa3D (2023). Alstom: Keeping Trains on Track with 3D Printing. Available at: <https://nexa3d.com/case-studies/alstom/>
- Ørsted (2021) Additive manufacturing in offshore wind. Ørsted. Available at: <https://orsted.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Pecharsky, V., Singh, P., Yoon, H.-S. & Moon, S.K. (2020). Additive manufacturing of maritime and offshore components: Opportunities and challenges. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(2), pp. 1–19.
- Rayna, T. and Striukova, L., 2016. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, pp.214–224.

- Rayna, T. and Striukova, L., 2018. 3D printing, intellectual property rights and business models. *Technological Forecasting and Social Change*, 133, pp.207–217.
- Rolls-Royce (2020) Hybrid additive manufacturing in aerospace. Rolls-Royce. Available at: <https://www.rolls-royce.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Sachs, E., Cima, M., Williams, P., Brancazio, D. & Cornie, J. (1993). “Three-dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model.” *Journal of Engineering for Industry*, 114(4), pp.481–488.
- Siemens (2020) 3D printing for tooling and industrial production. Siemens AG. Available at: <https://www.siemens.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Siemens Energy (2020) Additive manufacturing for gas turbines. Siemens Energy. Available at: <https://www.siemens-energy.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Siemens Energy (2021). Additive Manufacturing in Gas Turbine Maintenance. Siemens Energy Report.
- Stratasys (2022) PolyJet Technology Overview. Available at: <https://www.stratasys.com/>
- Stratasys (2019). Caterpillar Drill Collet Case Study. Available at: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/caterpillar-drill-collet/>
- Straumann (2019) Dental implants with 3D printing. Straumann Group. Available at: <https://www.straumann.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Stryker (2019) Orthopaedic implants via additive manufacturing. Stryker. Available at: <https://www.stryker.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Swarovski (2020) Luxury goods and 3D printing applications. Swarovski. Available at: <https://www.swarovski.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Tuck, C., Hague, R., Burns, N. and Ransley, M., 2007. Rapid manufacturing: Impact on supply chain methodologies and practice. *International Journal of Services and Operations Management*, 3(1), pp.1–22.
- Turner, B.N. & Gold, S.A. (2015). “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling.” *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), pp.250–261.
- Upadhyay, M., Sivarupan, T. & El Mansori, M. (2021). “3D printing for rapid sand casting—A review.” *Journal of Manufacturing Processes*, 72, pp.1–17.
- Vestas (2020) 3D printing in wind turbine manufacturing. Vestas. Available at: <https://www.vestas.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Volkswagen (2019) Binder jetting for automotive components. Volkswagen AG. Available at: <https://www.volkswagenag.com> (Accessed: 12 September 2025).
- Volkswagen (2023). Additive Manufacturing Report. Wolfsburg: Volkswagen AG.
- Weller, C., Kleer, R. and Piller, F.T., 2015. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *International Journal of Production Economics*, 164, pp.43–56.
- White, D., Wu, C. and Dapino, M. (2017). Ultrasonic Additive Manufacturing of Metals: A Review. *Manufacturing Letters*, 13, pp.30–35.
- Wohlers, T. and Caffrey, T. (2022). *Wohlers Report 2022: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates.
- Yap, C.Y., Chua, C.K., Dong, Z.L., Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Loh, L.E. & Sing, S.L. (2015) ‘Review of selective laser melting: materials and applications’, *Applied Physics Reviews*, 2(4), 041101.
- Zhang, Y., Bernard, A. and Gupta, R.K. (2019). Review of Laminated Object Manufacturing. *Procedia CIRP*, 81, pp.600–605.

Zimmer Biomet (2020) Spinal and orthopaedic implants through AM. Zimmer Biomet. Available at: <https://www.zimmerbiomet.com> (Accessed: 12 September 2025).

Παράρτημα Α

Ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο τοποθετήθηκαν οι εταιρείες οι οποίες αξιολογήθηκαν , όπου :

- 1 Mass Manufacturing
- 2 Manufacturing of the few
- 3 Complexity advantage
- 4 Mass Complexity
- 5 Customized for the individual
- 6 Mass Customization
- 7 Artisan Products
- 8 Complete Manufacturing freedom

Επιχείρηση	Κλάδος	Προϊόν	Τεχνολογία	Ποσότητα ανά έτος	Τύπος εφαρμογής
AddUp / HEWAM Consortium	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Μεταλλικοί εναλλάκτες αεροσκαφών 3D εκτύπωσης	PBF	Low	1
Adidas	Καταναλωτικά προϊόντα	Παπούτσια τρεξίματος 4DFWD με ενδιάμεσες σόλες 3D εκτύπωσης	VP	High	2
Adler Ortho	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Εμφυτεύματα ισχίου 3D εκτύπωσης	PBF	Medium	4
Aectual	Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός και κατασκευές	Δάπεδα και προσόψεις 3D εκτύπωσης	ME	Medium	8
AIRBUS	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Εσωτερικό καμπίνας και δομικά μέρη αεροσκαφών	PBF,DED	Low	2
Aleph Farms	Παραγωγή Τροφίμων και Εστίαση	Καλλιεργημένο κρέας	ME	Medium	3
Align Technology	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Διάφανοι νάρθηκες (Invisalign), Οδοντιατρικά μοντέλα	VP	High	6
Alstom	Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός	Ανταλλακτικά για βαγόνια τρένων	VP	Medium	8

Another Room	Καταναλωτικά προϊόντα	Εξάρτημα ασφάλισης (Joint locker)	ME	Medium	1
Apiar	Καταναλωτικά προϊόντα	Πολυτελή ρολόγια	PBF	Low	7
Baker Hughes	Ενέργεια	Εξαρτήματα στροβιλομηχανών, βαλβίδες, εργαλεία γεώτρησης	DED,PBF	Medium	2
BeeHex	Παραγωγή Τροφίμων και Εστίαση	Πίτσες 3D εκτύπωσης	ME	Low	3
Bene	Καταναλωτικά προϊόντα	Bfriends (Αξεσουάρ)	ME	Medium	1
BMW	Αυτοκινητοβιομηχανία	Δομικά εξαρτήματα	PBF	High	3
BOEING	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Μεταλλικά δομικά μέρη αεροσκαφών	DED	Low	2
Boltenstern	Καταναλωτικά προϊόντα	Κοσμήματα υψηλής ποιότητας (fabnora)	PBF	Medium	4
Bosch	Αυτοκινητοβιομηχανία	Μεταλλικά εξαρτήματα AM για εφαρμογές αυτοκινήτου	PBF	Medium	3
Breezm	Καταναλωτικά προϊόντα	Σκελετοί γυαλιών	PBF	Medium	6
Bugatti	Αυτοκινητοβιομηχανία	Δαγκάνες φρένων από τιτάνιο	PBF	Medium	1
Caterpillar Inc.	Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός	Ανταλλακτικά κατά παραγγελία (εξαρτήματα εκσκαφών, φορτηγών)	ME	Medium	2
CentralSound	Καταναλωτικά προϊόντα	Εξαρτήματα για ηχητικό εξοπλισμό	BJ	Low	2
Chin mounts	Καταναλωτικά προϊόντα	Βάσεις κάμερας για κράνη	ME	Medium	6
Cobra	Καταναλωτικά προϊόντα	Μπαστούνια γκολφ 3D εκτύπωσης	PBF	Medium	3
Conflux Technology	Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός	Συμπαγείς μεταλλικοί εναλλάκτες θερμότητας	PBF	Low	2
Czinger Vehicles	Αυτοκινητοβιομηχανία	Σασί 3D εκτύπωσης	PBF	Very low	3
Daimler Buses	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εξαρτήματα λεωφορείων (π.χ. καλύμματα, βάσεις)	PBF	Medium	2
Dandy	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Οδοντοστοιχίες, θήκες, οδοντιατρικά μοντέλα	VP	High	6
Danfoss	Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός	Εργαλεία παραγωγής	BJ	Medium	2
Deentsply Sirona	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Χειρουργικοί οδηγοί	MJ	Medium	6
Designer	Καταναλωτικά προϊόντα	Μπαστούνι γκολφ από τιτάνιο 3D εκτύπωσης	PBF	Low	3
Domin	Βιομηχανικά Υδραυλικά Συστήματα	Υδραυλικές σερβοβαλβίδες	PBF	Low	3
earfab	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Εξατομικευμένα καλούπια ακουστικών	VP	Medium	6
Formlabs Dental	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Εξατομικευμένοι οδοντιατρικοί νάρθηκες	VP	Medium	6

Gantri	Καταναλωτικά προϊόντα	Φωτιστικά design 3D εκτύπωσης	ME	Medium	1
GE Aerospace	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Εξαρτήματα κινητήρα	PBF	Medium	3
General Motors	Αυτοκινητοβιομηχανία	Λειτουργικά εξαρτήματα μέσω κέντρου AM	BJ	High	4
GKN Aerospace	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Δομικά εξαρτήματα αεροσκαφών	PBF	Low	3
Haddington Dynamics Dexter Robot Arm	Βιομηχανική Παραγωγή & Εργαλεία	Εξαρτήματα για ρομποτικό βραχίονα	ME	Medium	1
Hanglun Technology	Αυτοκινητοβιομηχανία	Σκελετοί ποδηλάτων	PBF	Low	3
Hasbro	Καταναλωτικά προϊόντα	Εξατομικευμένες φιγούρες	VP	Medium	6
Honda	Αυτοκινητοβιομηχανία	Διάφορα εξαρτήματα	PBF	Medium	3
Innotech Marine	Ναυπηγική Βιομηχανία και Ναυτιλία	Ελεύθερη χύτευση έγχυσης για ναυτιλιακά εξαρτήματα	VP	Low	3
Jaguar Land Rover	Αυτοκινητοβιομηχανία	Τελικά εξαρτήματα, παλαιά ανταλλακτικά, εργαλεία παραγωγής	PBF	Medium	1, 2, 3
Keystone Industries	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Νάρθηκες βρυγμού, δισκάρια, καλούπια αποτύπωσης	VP	Medium	6
Lettuce Abound	Παραγωγή αγροτικών προϊόντων	Προϊόντα βιολογικής καλλιέργειας	BJ	Low	5
Linear AMS	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Εναλλάκτες θερμότητας 3D εκτύπωσης	PBF	Low	2
Lockheed Martin	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Σύνθετες αεροδιαστημικές κατασκευές (βραχίονες, αεραγωγοί, μέρη κινητήρα)	DED	Low	3
LVMH	Καταναλωτικά προϊόντα	Πρωτότυπα κοσμημάτων, εξαρτήματα ρολογιών, καλούπια αρωμάτων	VP	Medium	5
Lyten Motorsports	Αυτοκινητοβιομηχανία	Ελαφριά εξαρτήματα 3D εκτύπωσης για αγωνιστικά αυτοκίνητα	ME	Medium	1
Maison Bécam	Παραγωγή Τροφίμων και Εστίαση	Βάσεις για τούρτες 3D εκτύπωσης	PBF	Low	3
McLaren	Αυτοκινητοβιομηχανία	Ανταλλακτικά/εξαρτήματα	PBF	Very low	3
Mercedes-Benz	Αυτοκινητοβιομηχανία	Ανταλλακτικά κλασικών αυτοκινήτων (π.χ. βάση καθρέφτη για 300 SL Coupé)	PBF	Medium	1
New Balance	Καταναλωτικά προϊόντα	Ενδιάμεσες σόλες 3D εκτύπωσης (π.χ. Zante Generate, 990 Sport)	VP	Medium	4
Nike	Καταναλωτικά προϊόντα	Εξατομικευμένες ενδιάμεσες σόλες, πάτοι, εξαρτήματα αθλητικού εξοπλισμού	ME	High	5

Ocado	Βιομηχανική Παραγωγή & Εργαλεία	Εξαρτήματα για ρομπότ διαλογής	BJ	Medium	1
Only games	Καταναλωτικά προϊόντα	Φιγούρες	MJ	High	8
Ørsted	Ενέργεια	Εξαρτήματα υπεράκτιων ανεμογεννητριών, ανταλλακτικά, εργαλεία συντήρησης	VP , ME	Medium	4
Overwreck	Καταναλωτικά προϊόντα	Βάση φόρτισης Apple	ME	Medium	1
Oxford Performance Materials	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Χειρουργικές συσκευές	PBF	Low	5
Perry Parts	Αυτοκινητοβιομηχανία	Αναρτήσεις (Bump stops)	ME	Medium	6
Peugeot	Αυτοκινητοβιομηχανία	Αξεσουάρ αυτοκινήτου	BJ	Medium	6
Porsche	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εξαρτήματα ηλεκτροκινητήρων αυτοκινήτων	PBF	Medium	3
Printed Reef	Καταναλωτικά προϊόντα	Βάσεις κοραλλιών, ταΐστρες, διακοσμητικά	ME	Medium	1, 6
PUMA	Καταναλωτικά προϊόντα	Mostro 3.D	VP	Medium	4
PWR	Αυτοκινητοβιομηχανία	Intercooler και ψυγεία 3D εκτύπωσης	PBF	Medium	2
R3D / Stellantis	Αυτοκινητοβιομηχανία	Βραχίονες στήριξης αυτοκινήτων	ME	Medium	3
Renault	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εσωτερικά εξαρτήματα για Renault 5 E-Tech Electric	ME	High	4
Rolls-Royce	Αεροδιαστημική Βιομηχανία	Πτερύγια κινητήρων τζετ & εξαρτήματα κινητήρα υψηλής αξίας	PBF	Medium	3
SavorEat	Παραγωγή Τροφίμων και Εστίαση	Φυτικά μπέργκερ 3D εκτύπωσης	ME	Medium	1
Straumann Dental	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Οδοντικά εμφυτεύματα, προσθετικά, χειρουργικοί οδηγοί	PBF	Medium	5
Stryker	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Εμφυτεύματα σπονδυλικής στήλης και αρθρώσεων από Tritanium	PBF	High	4
Subaru	Αυτοκινητοβιομηχανία	Αεροδυναμικά και δομικά μέρη για το πρωτότυπο BOOSTGEAR	PBF	Medium	1
Swarovski	Καταναλωτικά προϊόντα	Κρυστάλλινα αξεσουάρ, αποκλειστικά σχέδια	VP	High	2
SyBridges Technologies	Καταναλωτικά προϊόντα	Εναλλάκτες θερμότητας κυανικού εστέρα	VP	Low	3
Tangible Solutions	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Εμφυτεύματα σπονδυλικής στήλης	PBF	Low	4
Threedom	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εξατομικευμένα αξεσουάρ αυτοκινήτου	ME	Low	5

Thyssenkrupp Marine Systems	Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός	Εξαρτήματα κύτους υποβρυχίου	DED	Medium	2
Tons	Καταναλωτικά προϊόντα	Εξαρτήματα για βάσεις ποδηλάτων και αξεσουάρ	ME	Medium	5, 6
Triple Eight Race Engineering	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εξαρτήματα αγωνιστικών αυτοκινήτων	BJ	Very low	3
Under Armour	Καταναλωτικά προϊόντα	Εξατομικευμένες ενδιάμεσες σόλες παπουτσιών	VP	Medium	5
Unyq	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Καλύμματα προσθετικών μελών 3D εκτύπωσης	BJ	Medium	4
Vestas	Ενέργεια	Εξαρτήματα ανεμογεννητριών, εργαλεία, πρωτότυπα	ME	Medium	4
Volkswagen	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εξαρτήματα για το όχημα ID.3	BJ	High	3
Wabtec	Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός	Παντογράφος, πάνελ φρένων	PBF	Low	2, 3
Wooz	Καταναλωτικά προϊόντα	Λάμπες design 3D εκτύπωσης	ME	Medium	1
Xenco Medical	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Εργαλεία χειρουργικής σπονδυλικής στήλης μίας χρήσης	ME	Medium	6
Xenacor	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Λαπαροσκόπιο Xenoscope μίας χρήσης	ME	Low	6
Xilloc	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Εξατομικευμένα ιατρικά εμφυτεύματα (π.χ. κρανίου, γνάθου)	PBF	Medium	1
Yamaha Motor Racing	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εξαρτήματα MotoGP (λειτουργικά μέρη)	ME	Medium	1
Zellerfeld	Καταναλωτικά προϊόντα	Εξατομικευμένα παπούτσια 3D εκτύπωσης	ME	Medium	3
Zimmer Biomet	Ιατρικά προϊόντα & υγεία	Πορώδη εμφυτεύματα ισχίου Osseotite	PBF	High	4
Siemens Energy	Ενέργεια	Παραγωγή ενέργειας / Αεριοστρόβιλοι	PBF, DED	Medium	3
Ford	Αυτοκινητοβιομηχανία	Εξαρτήματα, και εργαλεία συναρμολόγησης	ME	High	2
L'Oréal	Καταναλωτικά προϊόντα	Καλούπια για φιάλες αρωμάτων	VP	Medium	2
Deutsche Bahn	Βαρέα μηχανήματα, οχήματα και εξοπλισμός	Ανταλλακτικά (π.χ. προσκέφαλα, χειρολαβές)	ME	Medium	2

