



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία με Τίτλο:

«Τεχνολογικές Δυνατότητες και Χρήση της Προσθετικής
Κατασκευής για την Υποστήριξη Νέων Παραγωγικών Μοντέλων
που Βασίζονται στις Αρχές της Κυκλικής Οικονομίας»

Κωνσταντίνα Δημογιώργη

Επιβλέπων Καθηγητής: Σταύρος Πόνης

Αθήνα, Ιούνιος 2020

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Κωνσταντίνα Δημογιώργη

Ευχαριστίες

Τα πέντε χρόνια των σπουδών μου πλησιάζουν στο τέλος τους, και με αφορμή την συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας δράττομαι της ευκαιρίας να ευχαριστήσω όσους με στήριξαν και με βοήθησαν για να πετύχω τους στόχους μου.

Πρωτίστως, οφείλω να αναγνωρίσω την βοήθεια του υπεύθυνου καθηγητή μου, κ. Σταύρο Πόνη, ο οποίος μου ενέπνευσε εμπιστοσύνη από τα πρώτα έτη της φοίτησης μου, με ώθησε να ακολουθήσω την κατεύθυνση της Παραγωγής και Διοίκησης και με εμπιστεύθηκε για τη διεκπεραίωση του θέματος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την διαρκή στήριξη και καθοδήγησή του, η παρούσα έρευνα δεν θα μπορούσε να έχει περατωθεί σε κανένα επίπεδο. Επιπροσθέτως, ευχαριστώ όλα τα μέλη του Τομέα της Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την υποστήριξη, και ιδιαίτερα τους διδακτορικούς ερευνητές Αγαλιανό Κωνσταντίνο και Πλάκα Γιώργο για την υπομονή τους στις συνεχείς απορίες μου και τη βοήθεια τους στο σχεδιασμό της εργασίας. Επίσης, εκτιμώ βαθύτατα τους διδάσκοντες όλων των μαθημάτων μου αυτά τα πέντε έτη για τις εξαιρετικά ενδιαφέρουσες διαλέξεις τους και την πληθώρα γνώσεων που μου παρείχαν.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς το οικογενειακό και το φιλικό μου περιβάλλον, τους ανθρώπους που ήταν η κινητήριος μου δύναμη αυτά τα χρόνια. Χωρίς την αγάπη και την ατέρμονη υποστήριξη τους σε κάθε πτυχή των σπουδών μου θα ήταν αδύνατο να ολοκληρώσω με επιτυχία τη σχολή και να διεκπεραιώσω την διπλωματική μου εργασία.

Περίληψη

Η εποχή που διανύουμε χαρακτηρίζεται από αλματώδεις τεχνολογικές εξελίξεις στο πλαίσιο της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0) που με τη σειρά τους δημιουργούν νέες ευκαιρίες, δυνατότητες και επιχειρηματικά μοντέλα που ο βιομηχανικός τομέας καλείται να εκμεταλλευτεί. Μία από αυτές τις τεχνολογίες είναι η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) ή αλλιώς τρισδιάστατη εκτύπωση, κατά την οποία αντικείμενα δημιουργούνται με στοχευμένη εναπόθεση υλικού επίπεδο ανά επίπεδο, σε αντίθεση με τις συμβατικές κατεργασίες όπου ένα αρχικό κομμάτι υλικού λαξεύεται κατάλληλα για την επίτευξη του προσδοκώμενου σχήματος. Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει μόλις τα τελευταία χρόνια γνωρίσει ραγδαία αύξηση των εφαρμογών της στη βιομηχανία προσφέροντας εξαιρετικές δυνατότητες, προοπτικές και ευκαιρίες σε πλήθος πεδίων που σχετίζονται με την παραγωγή η οποία στις μέρες μας πλέζεται αφόρητα να καλύψει μια ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ως αποτέλεσμα της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού και του υπερκαταναλωτισμού.

Η αυξημένη αυτή πίεση στα παραγωγικά συστήματα οδηγεί αναπόφευκτα στην ανάλωση των πεπερασμένων φυσικών πόρων του περιβάλλοντος με αυξανόμενους ρυθμούς και ταυτόχρονα στη δημιουργία δυσβάσταχτα μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων, με δισεκατομμύρια τόνους απορριμμάτων να κατακλύζουν το έδαφος και τους ωκεανούς, μολύνοντας τα οικοσυστήματα, τους έμβιους οργανισμούς που τα κατοικούν, την ατμόσφαιρα, και φυσικά και τον ίδιο τον άνθρωπο. Είναι φανερό πως η κατάσταση αυτή δεν μπορεί να συνεχιστεί και θα πρέπει επειγόντως να βρεθεί ένα άλλο μοντέλο οικονομίας που θα μπορέσει να ισορροπήσει τις αντίθετες δυνάμεις της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησης και της υπερεκμετάλλευσης των περιορισμένων, μη-ανεξάντητων φυσικών πόρων, θα περιορίζει τα απόβλητα, αλλά και θα μειώνει την ανάγκη για νέους πόρους που πρέπει να αντληθούν με μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος.

Τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί σαφές πως το κλειδί στην αντιμετώπιση του πιο πάνω προβλήματος, είναι η εκ θεμελίων αναθεώρηση του κλασσικού μοντέλου της γραμμικής οικονομίας (προμήθεια, παρασκευή, απόρριψη) στο οποίο βασίστηκε μέχρι τώρα η οικονομία μας και κατά το οποίο κάθε προϊόν όταν αναπόφευκτα φτάνει στο "τέλος της ωφέλιμης ζωής" του, δεν είναι πλέον βιώσιμο. Στο πλαίσιο αυτό, οι κοινωνίες σε παγκόσμιο επίπεδο μοιάζει να έχουν αποδεχθεί την χρησιμότητα και την επιτακτική ανάγκη εφαρμογής του αναδυόμενου οικονομικού μοντέλου της κυκλικής οικονομίας με βάση το οποίο η αξία των προϊόντων, των υλικών και των πόρων, παραμένει στην οικονομία όσο το δυνατόν περισσότερο και η παραγωγή αποβλήτων περιορίζεται στο ελάχιστο. Πράγματι, πολλά κράτη έχουν θέσει την κυκλική οικονομία στο επίκεντρο της αναπτυξιακής στρατηγικής τους, καθώς συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και φυσικών πόρων, στον περιορισμό της ρύπανσης των οικοσυστημάτων και συμβάλλει στη μείωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Ταυτόχρονα, η κυκλική οικονομία μέσα από την αναδιαμόρφωση του μοντέλου παραγωγής μπορεί να συμβάλει στην κοινωνική και οικονομική ευημερία, δημιουργώντας θέσεις απασχόλησης και να αποτελέσει πηγή ανάπτυξης και καινοτομίας.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη μελέτη των δυνατοτήτων που δίνονται από τη συνδυαστική εφαρμογή του αναδυόμενου τεχνολογικού μοντέλου της Προσθετικής Κατασκευής και του νέου παραγωγικού μοντέλου που βασίζεται στις αρχές της Κυκλικής Οικονομίας και επιχειρεί μέσα από την επισταμένη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας να αναδείξει την προοπτική για την υιοθέτηση αυτού του καινοτόμου συνδυαστικού μοντέλου από τη Βιομηχανία. Πράγματι, κεντρικές πρακτικές

του μοντέλου της Κυκλικής Οικονομίας, όπως ο επανασχεδιασμός προϊόντων, η ανακύκλωση αποβλήτων και η επαναχρησιμοποίηση τους δύνανται να υποστηριχτούν αποτελεσματικά από την τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής, ενώ επιπρόσθετα η χρησιμότητάς της μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις διαδικασίες ανακατασκευής και επιδιόρθωσης. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει λεπτομερώς το σύνολο αυτών των δυνατοτήτων όπως προκύπτουν από την ενδελεχή μελέτη και ανάλυση της βιβλιογραφία, εντοπίζει και παραθέτει παραδείγματα σχετικών εφαρμογών και καταλήγει σε συμπεράσματα σχετικά με τις προοπτικές του συνδυαστικού επιχειρηματικού μοντέλου που προτείνει, τους περιορισμούς που υπάρχουν για την επικράτηση του και τις περιοχές εκείνες της έρευνας που πρέπει να απασχολήσουν τους ερευνητές στο μέλλον.

Abstract

What characterizes our century the most, is the rapid development in terms of technology, in the context of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) which in turn create new opportunities, potentials and business models that the industrial sector is called to take advantage of. One of these technologies is Additive Manufacturing, or three-dimensional printing, in which objects are created by targeted material placement level by level, as opposed to conventional treatments where an original piece of material is carved appropriately to achieve the desired shape. Three-dimensional printing has recently experienced a rapid increase in its applications in the industry, offering exceptional capabilities, prospects and opportunities in a number of fields related to production, which nowadays is unbearably under pressure to meet a growing demand as a result of rapid population growth and overconsumption.

This increased pressure on production systems inevitably leads to the depletion of finite natural resources of the environment at an increasing rate and simultaneously to the creation of unbearably large amounts of waste, with billions of tons of waste flooding the ground and oceans, polluting the ecosystems, the atmosphere, and of course man himself. It is clear that this situation needs to be altered and another economic model must be urgently found, to balance the opposing forces of increasing demand and over-exploitation of limited, non-exhaustive natural resources, and reduce waste as well as the need for new resources to be extracted posing a great economic and environmental threat.

In recent years it has become clear that the key to tackling the above problem is a fundamental revision of the conventional model of linear economics (supply, production, disposal) on which our economy has so far relied, and by which when a product inevitably reaches the "end of its' useful life", it is no longer viable. In this context, societies around the world seem to have accepted the usefulness and urgency of implementing the emerging economic model of the circular economy on the basis of which the value of products, materials and resources remains in the economy as much as possible, and waste production is kept to a minimum. Indeed, many countries have put the circular economy at the center of their development strategy, as it saves energy and natural resources, reduces pollution in ecosystems along with the phenomenon of climate change. At the same time, the circular economy through the reformation of the production models can contribute to social and economic prosperity, creating job positions and being a source of growth and innovation.

This paper aims to study the possibilities provided by implementing a combination of the emerging technological model of Additive Manufacturing and the new production model based on the principles of the Circular Economy, as through careful study of the relevant literature, it attempts to highlight the prospect of adoption of this innovative combination model from the Industry. Indeed, main practices in the Circular Economy model, such as product redesign, waste recycling and reuse, can be effectively supported by Additive Manufacturing technology, and its usefulness can be significantly important for repairing and remanufacturing processes. This paper presents in detail all these possibilities as they emerge from a thorough study and analysis of the literature, identifies and cites examples of relevant applications and finally presents the most important deductions about the prospects of the combined business model it proposes, the limitations that

exist for its predominance, and the areas of research that should be concerned by researchers in the future.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	16
2. Τρέχουσα Αριστεία στην Περιοχή της Προσθετικής Κατασκευής	22
2.1. Μέθοδος Έρευνας.....	22
2.1.1. Επιλογή Βιβλιογραφικών Πηγών & Καθορισμός Πεδίων Έρευνας.....	22
2.1.2. Επιλογή Λέξεων Κλειδιών.....	23
2.1.3. Καθορισμός Χρονικού Εύρους Μελέτης	24
2.1.4. Επιλογή Πεδίων Αναζήτησης.....	24
2.1.5. Επιλογή Κατηγοριών Δημοσιεύσεων.....	25
2.2. Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης.....	26
2.2.1. Ερευνητικοί Στόχοι Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης	26
2.2.2. Στατιστικά Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης	26
3. Μελέτη των τρεχόντων βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων	30
3.1. Μέθοδος.....	30
3.2. Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων.....	34
3.2.1 Ομαδοποίηση κατά περιεχόμενο.....	35
3.2.2. Ομαδοποίηση κατά τύπο ανασκόπησης.....	36
3.3. Συζήτηση	38
4. Εισαγωγή στην Προσθετική Κατασκευή	42
4.1. Μεθοδολογίες.....	42
4.2. Υλικά.....	54
4.2.1. Γενικά – Μορφές Υλικού.....	48
4.2.2. Πλαστικό	56
4.2.3. Μέταλλο	58
4.2.4. Βιοϋλικά.....	59
5. Κυκλική Οικονομία και Προσθετική Κατασκευή	65
5.1. Εισαγωγή	65
5.2. Ανακύκλωση.....	72
5.2.1. Γενικά	72
5.2.2. Κατανεμημένη Κατασκευή.....	74
5.2.2.1. Κατανεμημένη Ανακύκλωση	74
5.2.2.2. Κλειστοί Βρόγχοι Παραγωγής.....	83

5.2.3. Ανακύκλωση αποβλήτων και αντικειμένων στο τέλος της ζωής τους.....	88
5.2.3.1. Πλαστικό.....	88
5.2.3.2. Ηλεκτρονικά απόβλητα και μαγνήτες.....	95
5.2.3.3. Γυαλί, άμμος και σκυρόδεμα.....	98
5.2.3.4. Χαρτί.....	101
5.2.3.5. Ελαστικά.....	101
5.3. Επαναχρησιμοποίηση	103
5.3.1. Ανάκτηση χρησιμοποιημένης πρώτης ύλης.....	103
5.3.1.1. Μέταλλο.	107
5.3.1.2. Ελαστικό	111
5.3.1.3. Άμμος και σκυρόδεμα.....	113
5.3.2. Επαναχρησιμοποίηση χωρίς το στάδιο της ανακύκλωσης.....	117
5.4. Ανακατασκευή και επιδιόρθωση.....	119
5.4.1. Ανακατασκευή	119
5.4.2. Επιδιόρθωση.....	125
6. Μελέτη Περίπτωσης: Έργο Trackplast.....	132
6.1. Τι είναι το έργο Trackplast ;	132
6.2. Η σύζευξη με τις δυνατότητες της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	134
6.2.1. Επιλεγόμενος Εξοπλισμός και Υλικό.....	134
6.2.2. Σχεδιασμός για την ικανοποίηση των προδιαγραφών.....	137
Συμπεράσματα.....	147
Πηγές.....	150
Παράρτημα.....	166

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Η οθόνη αναζήτησης στην Βιβλιογραφική Βάση Δεδομένων SCOPUS.....	22
Σχήμα 2-2: Η οθόνη αναζήτησης στην Βιβλιογραφική Βάση Δεδομένων Google Scholar.....	23
Σχήμα 2-3: Μεθοδολογία Βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	25
Σχήμα 2-4: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αριθμό των καταχωρήσεων ανά επιστημονικό περιοδικό, για όσα είχαν άνω των 5 καταχωρήσεων.....	27
Σχήμα 2-5: Η μεθοδολογία για την τελική συγκέντρωση των απαραίτητων καταχωρήσεων για την διάρθρωση της έρευνας.....	28
Σχήμα 2- 6 : Η κατηγοριοποίηση των 206 καταχωρήσεων στους 6 θεματικούς άξονες.....	29
Σχήμα 3-1: Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των βιβλιογραφικών ανασκοπίσεων.....	34
Σχήμα 4- 1: Απλοποιημένο σκαρίφημα της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, υιοθετημένη από τους Ujeniya and Rachchh (2019).....	42
Σχήμα 4-2: Οι 7 κατηγορίες της Προσθετικής Κατασκευής ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, κατά ISO/ASTM52900-15, υιοθετημένη από τους Damanhuri et al. (2019).....	43
Σχήμα 4- 3: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Fused Deposition Modeling, υιοθετημένη από τους Kyziol et al. (2019).....	44
Σχήμα 4- 4: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Material Jetting, υιοθετημένη από τους Sireesha et al. (2018).....	45
Σχήμα 4- 1: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Direct Energy Deposition, υιοθετημένη από τους Le et al. (2018).....	46
Σχήμα 4- 6: Αντικείμενα μετά από τη μέθοδο LENS. (α): ζευγάρι από «μήτρες» (β) πτερύγιο στροβίλου (γ) συντήρηση στροβίλου, υιοθετημένο από Wilkinson & Cope (2015).....	47
Σχήμα 4- 7: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου Laser Powder Bed Fusion (L-PBF ή SLM) υιοθετημένη από (α) Le et al. (2018) (β) Santecchia et al. (2020).....	48
Σχήμα 4- 8: Η Electron Beam Melting υιοθετημένη από τους Chandrasekar et al. (2020), (α) Σχηματική αναπαράσταση (β) Εσωτερική όψη του συστήματος Arcam EBM.....	48
Σχήμα 4- 9: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Selective Laser Sintering, από (α) Gu et al. (2019) (β) Rahito et al. (2019).....	49
Σχήμα 4- 10: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου Sheet Lamination, υιοθετημένη από την ερευνητική ομάδα του Loughborough University.....	50
Σχήμα 4- 11: Η διαδικασία Stereolithography (SLA) υιοθετημένη από τους (α) Rahito et al. (2020) (β) Kyziol et al. (2019).....	51
Σχήμα 4- 12: Η μέθοδος Binder Jetting, υιοθετημένη από την ερευνητική ομάδα του Loughborough university.....	52
Σχήμα 4- 13: Το ποσοστό προτίμησης για διάφορες μεθόδους προσθετικής κατασκευής, για το 2017 και 2018, υιοθετημένο από Wu (2019).....	54

Σχήμα 4- 14: Οι κατηγορίες Προσθετικής Κατασκευής με βάση το μέταλλο και τη μορφή του, υιοθετημένη από τους Tan et al. (2017).....	59
Σχήμα 4- 15: (α) Η εξώθηση του υλικού (αλεσμένα κοχύλια με ζαχαρόνερο) ως βιοδιασπώμενο, οικολογικό υλικό για την ΠΚ, και προϊόντα εκτυπωμένα από βιοδιασπώμενο υλικό (β) καθαρή πρώτη ύλη (γ) ανακυκλωμένη πρώτη ύλη, υιοθετημένο από τους Sauerwein & Doubrovski (2018).....	62
Σχήμα 4- 16: Η εξώθηση νήματος από PET και Biochar, και η χρήση του στην τρισδιάστατη εκτύπωση, υιοθετημένο από τους Idrees et al. (2018).....	63
Σχήμα 4- 17: Παραγωγή νήματος PLA από φυσικές ίνες και υπολείμματα καφέ, υιοθετημένο από τους Cisneros-López et al. (2020), (α) φύρα PLA μετά τη βιομηχανική χρήση (β) διαδικασία εξώθησης (γ) παραγωγή νήματος σε δεξαμενή νερού (δ) ανακυκλωμένα κομμάτια PLA.....	64
Σχήμα 5-1- 1: Οι ροές των υλικών σε τοπικό, εθνικό, και παγκόσμιο επίπεδο, υιοθετημένο από τους Garmulewicz et al. (2018).....	65
Σχήμα 5-1- 2: Παράδειγμα της Αξιολόγησης του κύκλου ζωής στην Προσθετική Κατασκευή, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019).....	66
Σχήμα 5-1- 3: Η Σύγκριση Γραμμικής (α), Επαναχρησιμοποιητικής (β) και Κυκλικής (γ) οικονομίας, υιοθετημένη από τους Wu & Wu (2019).....	67
Σχήμα 5-1- 4: Το μοντέλο της Κυκλικής Οικονομίας σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη εκτύπωση, από την εταιρεία HP, υιοθετημένο από τους McIntyre & Ortiz (2015).....	68
Σχήμα 5-1- 5: Ο κύκλος ζωής ενός νήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, βάσει των αρχών της Κυκλικής Οικονομίας, υιοθετημένο από τους Tian et al. (2017).....	69
Σχήμα 5-1- 6: Το προτεινόμενο μοντέλο Κυκλικής Οικονομίας μέσω της Βιομηχανίας 4.0 και της προσθετικής κατασκευής, υιοθετημένο από τους Nascimento et al. (2019).....	71
Σχήμα 5-1- 7: Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης των Sauerwein & Doubrovski (2018) για την Κυκλική Οικονομία.....	72
Σχήμα 5-2- 1: Προωθητική «κάρτα» για την αξία της ανακύκλωσης στο πλαίσιο της στρατηγικής για την Κυκλική Οικονομία, υιοθετημένη από τους Sauerwein et al. (2019).....	72
Σχήμα 5-2- 2: Τρισδιάστατοι εκτυπωτές Ανοιχτής Πηγής. (α) ZMorph SX (Charles et al., 2019) (β) FoldaRap (Cruz Sanchez et al., 2017) (γ) Mondrian (Cruz Sanchez et al., 2017).....	76
Σχήμα 5-2- 1: Αναπαράσταση της συμβατικής (λευκή) και κατανεμημένης (γκρι) ανακύκλωσης, υιοθετημένη από Zander (2019).....	77
Σχήμα 5-2- 4: Το Recyclebot τύπου RepRap πλήρως λειτουργικό σε παραγωγική διαδικασία, υιοθετημένο από τους Woern et al. (2018).....	78
Σχήμα 5-2- 5: Σχηματική αναπαράσταση υιοθετημένη από τους Feeley et al. (2014) (α) η συμβατική διαδικασία παραγωγής νήματος (β) το προτεινόμενο μοντέλο για μια «ηθική» παραγωγή νήματος μέσω κατανεμημένης κατασκευής και ανακύκλωσης.....	79
Σχήμα 5-2- 6: Παράδειγμα κατανεμημένης ανακύκλωσης, σύμφωνα με την έρευνα των Hart et al. (2018) (α) Τοπικό απόρριμμα προϊόντος (β) Ψιλοκομμένα απόβλητα (γ) Τροφοδοτικό νήμα (δ) Μέθοδος FDM (ε) τελικό εκτυπωμένο δείγμα.....	80

Σχήμα 5-2-7: Τεχνικές οδοί για την υιοθέτηση της κατανεμημένης ανακύκλωσης πολυμερών και τη χρήση τους στην κατανεμημένη παραγωγή, υιοθετημένη από τους Dertinger et al. (2020).....	81
Σχήμα 5-2-8: Προτεινόμενο μοντέλο παραγωγής κλειστού βρόγχου από τους Pavlo et al. (2018)...	85
Σχήμα 5-2- 9: Κλειστοί βρόγχοι αλληλεπίδρασης καταναλωτών - κατασκευαστών, σύμφωνα με τους Wu & Wu (2019).....	85
Σχήμα 5-2- 10: Βήματα διαδικασίας παραγωγής κλειστού βρόγχου μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, υιοθετημένο από τους Juraschek et al. (2017).....	86
Σχήμα 5-2-11: Αναπαράσταση ανακύκλωσης PLA κλειστού βρόγχου για την τρισδιάστατη εκτύπωση, από τους Zhao et al. (2018).....	86
Σχήμα 5-2-12: Ανακύκλωση ABS σε διαδικασία παραγωγής κλειστού βρόγχου, από τους Mohammed et al. (2019), (α) Ανάκτηση και κοκκοποίηση του ABS (β) Εξώθηση του σε νήμα (γ) Διαδικασία εκτύπωσης (δ) Τελικά εκτυπωμένα αντικείμενα. Μετά την χρήση τους, τα αντικείμενα μπορούν να εισέλθουν πάλι στον κύκλο από το βήμα (α) για ανακύκλωση και κοκκοποίηση.....	87
Σχήμα 5-2- 13: Η διαδικασία ανάκτησης πλαστικού και προετοιμασίας του για κοκκοποίηση, από το πείραμα των Mohammed et al. (2019), (α) Συλλογή πλαστικών (β) αποσυναρμολόγηση τους στα επιμέρους κομμάτια (γ) σύνθλιψη (δ) αφυδάτωση και ξήρανση τους.....	89
Σχήμα 5-2- 14: Το σύστημα ανακύκλωσης, εξώθησης νήματος και τρισδιάστατης εκτύπωσης, από τους Romero-Alva et al. (2018).....	90
Σχήμα 5-2- 15: Η διάταξη μηχανής σύνθλιψης – εξώθησης – ελέγχου για την παραγωγή νήματος, από τους Romero-Alva et al. (2018).....	90
Σχήμα 5-2- 16: Η έρευνα των Lee et al. (2019). (α) Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανακύκλωση πλαστικού (β) Η σύγκριση των τεμαχίων εκτυπωμένων από γνήσιο υλικό (αριστερά) και από ανακυκλωμένο (δεξιά).....	91
Σχήμα 5-2- 17: Σύμφωνα με τους Singh et al. (2016) (α) Απόβλητα Nylon-6 (β) Εξώθηση νήματος (γ) Ενισχυμένο νήμα για αυξημένη απόδοση.....	93
Σχήμα 5-2- 18: Απόβλητο PLA κατά τους Paciorek-Sadowska et al. (2019) (α) μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση (β) αφότου περάσει από την μηχανή σύνθλιψης.....	94
Σχήμα 5-2-19: Ανακύκλωση ηλεκτρονικών αποβλήτων (α) απορρίμματα οθονών υπολογιστών (β) μέτρηση της διαμέτρου του νήματος (γ) το τελικό νήμα ABS.....	96
Σχήμα 5-2- 20: Σχηματική αναπαράσταση μετατροπής ηλεκτρονικών αποβλήτων σε πλαστικό νήμα για ΠΚ, από τους Gaikwad et al. (2018).....	96
Σχήμα 5-2- 21: Τα στάδια επεξεργασίας των ηλεκτρονικών αποβλήτων για την παραγωγή νήματος ΠΚ, υιοθετημένο από τους Czyzewski et al. (2018).....	97
Σχήμα 5-2- 22: Διαδικασία για την ανακύκλωση μαγνητών μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, υιοθετημένο από τους Gandha et al. (2019).....	98
Σχήμα 5-2- 23: Μαγνήτες κατασκευασμένοι μέσω Προσθετικής Κατασκευής (α) Αρχικός μαγνήτης (β) Πούδρα έπειτα από κρυογονική κονιοποίηση (γ) ανακυκλωμένος μαγνήτης , υιοθετημένο από Gandha et al. (2019).....	98

Σχήμα 5-2- 24: Αξιοποίηση απόβλητης άμμου, κατά τους Altamura & Baiani (2019) (α) Αρχικά απόβλητα (β) Έλεγχος υλικού (γ) Σχεδιασμός και τρισδιάστατη μοντελοποίηση (δ) Τρισδιάστατη εκτύπωση (ε) Πρωτότυπο αντικείμενο από 100% ανακυκλωμένη άμμο.....	99
Σχήμα 5-2- 25: Προτεινόμενη μεθοδολογία για την ανακύκλωση πτερυγίων από στροβίλους, κατά τους Rahimizadeh et al. (2019)	100
Σχήμα 5-2- 26: Η διαδικασία διπλής εξώθησης για την κατασκευή νήματος για ΠΚ, από τους Rahimizadeh et al. (2019) (α) Το ανακυκλώσιμο υλικό (β) Νιφάδες PLA (γ) Τεμαχισμός (δ) Οπτικές ίνες σε μορφή κομματιών (ε) Εξωθητής νήματος (ζ) Το τελικό νήμα από ανακυκλωμένες ίνες γυαλιού και τα δοκίμια για τους ελέγχους κόπωσης.....	101
Σχήμα 5-2- 27: Η διαδικασία ανακύκλωσης χαρτιού για την αξιοποίηση τους ως υλικό στην ΠΚ, από τους Stolz & Mülhaupt (2020).....	101
Σχήμα 5-3- 1: Σχηματισμός φουσκαλών στο υλικό εκτύπωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες, υιοθετημένο από τους Fateri et al. (2018).....	104
Σχήμα 5-3- 2: Προτεινόμενη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της διαδικασίας ανακύκλωσης στην ΠΚ, από τους Cruz Sanchez et al. (2017).....	104
Σχήμα 5-3- 3: Προτεινόμενη μεθοδολογία χαρακτηρισμού της πούδρας για την ΠΚ, υιοθετημένο από τους Cordova et al. (2019).....	105
Σχήμα 5-3- 4: Η διαδικασία ανάκτησης πούδρας, φάση 1η, 2η, και 3η αντίστοιχα, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019).....	106
Σχήμα 5-3- 5: Οι φάσεις και τα αποτελέσματα της ανάκτησης πούδρας μετάλλου από κράμα CoCr, υιοθετημένο από Daraban et al. (2019).....	106
Σχήμα 5-3- 6 : Οι δύο στρατηγικές επαναχρησιμοποίησης πούδρας, σύμφωνα με τους Lutter-Günther et al. (2018).....	107
Σχήμα 5-3- 7: (α) Φύρα μετάλλου (β) Μεταλλικοί κόκκοι παραγόμενοι από το απόβλητο (γ) Εικόνα από ηλεκτρικό μικροσκόπιο της μεταλλικής φύρας (δ) Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο των μεταλλικών κόκκων , υιοθετημένο από τους Fullenwider et al. (2019).....	108
Σχήμα 5-3- 8: Απλοποιημένη μέθοδος για την αξιολόγηση των αλλαγών στην μορφοποίηση, την χημική σύσταση και την ρευστότητα της πούδρας για την SLM, ώστε να κρίνει ο χρήστης την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της, υιοθετημένο από τους Cordova et al. (2019).....	110
Σχήμα 5-3- 9: Μεθοδολογία για την επαναχρησιμοποίηση υπολείμματος πούδρας από την διαδικασία SLS, υιοθετημένη από την έρευνα των Kumar & Czekanski (2018).....	112
Σχήμα 5-3- 10: (α) Δείγμα εκτυπωμένο από καθαρή πολυμερές PA12 (β) Δείγμα εκτυπωμένο από ανακυκλωμένο πολυμερές PA12, υιοθετημένο από τους Feng et al. (2019).....	113
Σχήμα 5-3- 11: (α) Εκτυπωμένο αντικείμενο από σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο γυαλί (β) Διατομή αντικειμένου από καθαρή άμμο (γ) Διατομή αντικειμένου από ανακυκλωμένο γυαλί, υιοθετημένο από τους Ting et al. (2019).....	114
Σχήμα 5-3- 12: Προετοιμασία του πετρώματος “Leece” στην αρχιτεκτονική, (α) Φύρα πετρώματος (β) Σύνθλιψη του (γ) Κοσκίνισμα της πούδρας, από τους Esposito Corcione et al. (2018).....	114

Σχήμα 5-3- 13: (α) Εξώθηση νήματος (β) Καθαρό νήμα PLA (γ) Ενισχυμένο νήμα PLA με φύρα πετρώματος Leece, υιοθετημένο από τους Esposito Corcione et al. (2018).....	115
Σχήμα 5-3- 14: Διάγραμμα για τα μονοπάτια γνήσιας και ανακυκλωμένης πρώτης ύλης στην Προσθετική κατασκευή, υιοθετημένο από τους Clemon & Zohdi (2018).....	116
Σχήμα 5-3- 15: Διάγραμμα αναπαράστασης της διαδικασίας επαναχρησιμοποίησης πούδρας στην Προσθετική Κατασκευή, υιοθετημένο από τους Chandrasekat et. (2020).....	116
Σχήμα 5-3- 16: Προτεινόμενη μεθοδολογία για επαναχρησιμοποίηση αντικειμένων στο τέλος της ζωής τους χωρίς να μεσολαβήσει η διαδικασία ανακύκλωσης, από τους Le et al. (2018).....	117
Σχήμα 5-3- 17: «Πρότζεκτ Re_», προτεινόμενο για επαναχρησιμοποίηση αντικειμένων σε νέους κύκλους ζωής από τον Samuel Bernier, υιοθετημένο από τους Sauerwein et al. (2019).....	118
Σχήμα 5-4- 1: Η ροή της διαδικασίας για την ανακατασκευή.....	120
Σχήμα 5-4- 2: Επιδιορθωμένα καλούπια με κορυφές, με ειδικούς αγωγούς ψύξης, κατασκευασμένα μέσω ΠΚ, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019).....	121
Σχήμα 5-4-3: Προτεινόμενη μεθοδολογία ανακατασκευής, από τους Le et al. (2017;2018).....	122
Σχήμα 5-4- 4: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων για την Προσθετική Ανακατασκευή.....	123
Σχήμα 5-4- 4: Από τους τους Liu et al. (2019), (α) i. Το αρχικό υλικό ii. Συμβατικό σχήμα iii. Τελικό σχήμα (συμπεριλαμβανομένης προσθετικής και αφαιρετικής κατασκευής) , (β)-(γ) Συνδυασμός υβριδικής προσθετικής-αφαιρετικής κατασκευής για την ανακατασκευή αντικειμένου	124
Σχήμα 5-4- 5: Διαδικασία ανακύκλωσης και ανακατασκευής	124
Σχήμα 5-4- 6: Η πορεία των εφαρμογών χρήσης Προσθετικής Κατασκευής.....	125
Σχήμα 5-4-7: Υιοθετημένο από τους Rahito et al. (2019), (α) Ποια μέθοδος ΠΚ χρησιμοποιείται για την επιδιόρθωση και (β) Ποια εξαρτήματα συνήθως επιδιορθώνονται μέσω ΠΚ.....	125
Σχήμα 5-4- 8: Επιδιόρθωση καλουπιού χρησιμοποιώντας Powder Laser Deposition, (α) πριν και (β) μετά, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019).....	126
Σχήμα 5-4-9: (α) Σπασμένο άκρο (β) Επιδιορθωμένο άκρο αντικειμένου.....	127
Σχήμα 5-4- 10: Πρότζεκτ «Επιδιόρθωση προστιθέμενης αξίας» από τους Marcel den Hollander και Conny Bakker, υιοθετημένο από τους Sauerwein et al. (2019).....	128
Σχήμα 5-4- 11: Διαδικασία επιδιόρθωσης σπασμένου αντικειμένου	129
Σχήμα 5-4-12: (α) Προσθετική Κατασκευή και η μέθοδος Powder Bed Fusion για την αντικατάσταση άνω άκρου καυστήρα (β) Βιομηχανικό επίπεδο Προσθετικής Παραγωγής (γ) Το εσωτερικό ενός εκτυπωτή Powder Bed Fusion προσαρμοσμένο για την επιδιόρθωση μέσω ΠΚ.....	130
Σχήμα 5-4- 14: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας επιδιόρθωσης με την βοήθεια πάστας ανακυκλωμένου υλικού, υιοθετημένο από τους Cunico et al. (2019).....	131
Σχήμα 5-4-15: (α) Παράδειγμα μετατόπισης επιπέδων εκτύπωσης, (β) Επιδιόρθωση αντικειμένου με την προτεινόμενη μέθοδο, από τους Cunico et al. (2019).....	131

Σχήμα 6- 1: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του έργου Trackplast, συγκεκριμένα η εκπομπή σημάτων από τους ηλεκτρονικούς πομπούς προς τους δέκτες, και η συλλογή και ανάλυση των πληροφοριών στις πλατφόρμες.....	133
Σχήμα 6- 2: Ο ηλεκτρονικός πομπός του έργου Trackplast, για τον οποίο χρειάζεται να σχεδιαστεί η προστατευτική θήκη.....	134
Σχήμα 6- 3: Η βάση της θήκης, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη.....	139
Σχήμα 6- 4: Η βάση της θήκης, σε τομή κατά το κάθετο προς την βάση επίπεδο.	139
Σχήμα 6- 5: Το καπάκι της θήκης, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη.	140
Σχήμα 6- 6: Το καπάκι της όψης σε τομή κατά το κατακόρυφο επίπεδο, για έμφαση στο εσωτερικό σπείρωμα.....	140
Σχήμα 6- 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση της βάσης και του καπακιού, πριν γίνει η συναρμογή, ισομετρική όψη.....	141
Σχήμα 6- 8: Η συναρμογή των δύο επιμέρους τεμαχίων, σε τομή κατά τον κατακόρυφο άξονα, ισομετρική όψη.....	141
Σχήμα 6- 9: Η συναρμογή των δύο επιμέρους τεμαχίων, σε τομή κατά τον κατακόρυφο άξονα, σε πρόσοψη.....	142
Σχήμα 6- 10: Κάτοψη πώματος θήκης (αριστερά) και βάσης (δεξιά).....	145
Σχήμα 6- 11: Πλάγια όψη της βάσης (αριστερά) και της συναρμογής των δύο επιμέρους τεμαχίων (δεξιά).....	145
Σχήμα 6- 12: Ο ηλεκτρονικός πομπός, εντός και εκτός θήκης.....	145
Σχήμα 6- 13: Ο ηλεκτρονικός πομπός στη θήκη του, τοποθετημένος ανάμεσα σε δύο πάτους μπουκαλιού 1,5 λίτρου.....	146

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Ο αριθμός των δημοσιεύσεων ανά επιστημονικό περιοδικό, για όσα καταχωρήθηκαν άνω των πέντε.....	26
Πίνακας 3- 1 : Σύνοψη των βασικών πληροφοριών των βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων της βάσης δεδομένων ELSEVIER SCOPUS, την χρονική περίοδο 01/01/2014 – 31/03/2020.....	31
Πίνακας 3- 2: Σύνοψη των βασικών πληροφοριών των βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων από την μηχανή αναζήτησης Google Scholar, την χρονική περίοδο 01/01/2014 – 31/03/2020.....	33
Πίνακας 3- 3: Ομαδοποίηση των αποδεκτών βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων σε πέντε θεματικούς άξονες.....	35
Πίνακας 3- 4: Η ομαδοποίηση των αποδεκτών ανασκοπήσεων ανάλογα με το είδος της ανασκόπησης, σύμφωνα με τη θεωρία των Grant and Booth, 2009.....	37
Πίνακας 4- 1: Συγκεντρωτικός πίνακας περί των μεθοδολογιών της Προσθετικής Κατασκευής και των υποκατηγοριών κάθε μεθόδου, το υλικό και την μορφή που χρησιμοποιείται.....	53
Πίνακας 4- 2: Τα βασικότερα θερμοπλαστικά για την τρισδιάστατη εκτύπωση και τα κύρια χαρακτηριστικά τους, υιοθετημένο από τους Chong et al. (2015).....	58
Πίνακας 4- 3: Σύγκριση ιδιοτήτων γνήσιου με ανακυκλωμένο υλικό, συγκεκριμένα μία πάστα αλεσμένων κοχυλιών με ζαχαρόνερο, υιοθετημένο από τους Sauerwein & Doubrovski (2018).....	62
Πίνακας 5-2- 1: Συστήματα ανακύκλωσης για την τρισδιάστατη εκτύπωσης για την εξώθηση υλικού, υιοθετημένο από Zander (2019).....	82
Πίνακας 5-2- 2: Ποιοτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων τριών διαφορετικών νημάτων ανακυκλωμένου πλαστικού, κατά την έρευνα των Chong et al. (2017).....	91
Πίνακας 5-2- 3: Τα αποτελέσματα της μελέτης των (Lanzotti et al., 2018) για τη σύγκριση της αντοχής νήματος PLA, γνήσιο και έως τέσσερις φορές ανακυκλωμένο.....	92
Πίνακας 5-3-1: Ποσοτική ανάλυση της σύστασης της πούδρας έως και 69 κύκλους επαναχρησιμοποίησης, και σύγκριση της σύστασης αντικειμένων που εκτυπώθηκαν με καθαρή πούδρα και με 69 φορές επαναχρησιμοποιημένη, υιοθετημένο τους Poron et al. (2018).....	111
Πίνακας 6- 1: Οι διαθέσιμοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και τα χαρακτηριστικά τους.....	135
Πίνακας 6- 2: Τα διαθέσιμα υλικά για την μέθοδο FDM στο εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων, και η ποιοτική σύγκριση μεταξύ τους.....	136
Πίνακας Παραρτήματος Α: Η κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφικής αναζήτησης σε έξι κατηγορίες ενδιαφέροντος.....	166

1. Εισαγωγή

Η Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως στη σημερινή εποχή (Lecký et al., 2019), και χαρακτηρίζεται ως μία μεγάλη καινοτομία μόλις τριάντα ετών (Cholleti & Gibson, 2018). Είναι επίσης γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση, ή πιο επίσημα, ως Ταχεία Προτυποποίηση - Rapid Prototyping (Cholleti & Gibson, 2018). Ο όρος τρισδιάστατη εκτύπωση είναι συνώνυμος της Προσθετικής Κατασκευής, ωστόσο ο πρώτος χρησιμοποιείται με πιο ευρεία έννοια ενώ ο δεύτερος είναι πιο επίσημος για τον βιομηχανικό τομέα (Wu, 2019). Η προσθετική κατασκευή εφευρέθηκε περί το 1980 από τον Ιάπωνα Hideo Kodama (Wu, 2019) και λειτουργούσε ως τεχνολογία για ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων, ενώ πλέον οδεύει στην υιοθέτηση της ακόμα και για την παραγωγή τελικών, λειτουργικών εξαρτημάτων (Giurco et al., 2014 ; Lecký et al., 2019), με εξαιρετικά πολυσύνθετες γεωμετρίες (Chacón et al., 2019).

Η εξέλιξη της ΠΚ τα τελευταία τριάντα χρόνια είναι εξωπραγματική (Domingues et al., 2017 ; Lanzotti et al., 2018). Ξεκινώντας από ένα σύνολο μη εμπορικών τεχνολογιών, εξελίχθηκε σε μία αγορά αξίας άνω των τεσσάρων δισεκατομμυρίων δολαρίων το 2014, με αναμενόμενη αύξηση στα εικοσιένα δις μέχρι το 2020 (Domingues et al., 2017), ενώ υπεραισιόδοξες προβλέψεις αναφέρουν αύξηση έως και 230-550 εκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2025 (Kumar & Czekanski, 2017). Από το 1980, η ΠΚ έχει αναδειχθεί ως μία υψηλού επιπέδου ευπροσάρμοστη τεχνολογία ψηφιακής επεξεργασίας, στην οποία τα ψηφιακά αντικείμενα που έχουν σχεδιαστεί από υπολογιστή μετατρέπονται σε αντικείμενα «χτισμένα» επίπεδο ανά επίπεδο (Stolz & Mülhaupt, 2020). Ουσιαστικά δηλαδή, η προσθετική κατασκευή είναι η εναπόθεση υλικού ανά επίπεδα για την δημιουργία ενός αντικειμένου, με την βοήθεια ενός μηχανήματος ελεγχόμενου από υπολογιστή και ένα ψηφιακό αρχείο που οριοθετεί την απαιτούμενη γεωμετρία του (Behm et al., 2018), ή όπως πιο απλά έθεσαν οι Domingues et al. (2017), πρόκειται για μια διαδικασία παραγωγής φυσικών αντικειμένων από μία ψηφιακή πληροφορία επίπεδο ανά επίπεδο. Από την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών, η προσθετική κατασκευή ορίζεται ως «η διαδικασία ένωσης υλικών για την δημιουργία αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατου μοντέλου, συνήθως επίπεδο ανά επίπεδο, σε αντίθεση με τις μεθοδολογίες αφαιρετικής κατασκευής και της κατεργασίες διαμόρφωσης» (Cholleti & Gibson, 2018 ; Pavlo et al., 2018).

Η ανάπτυξη της προσθετικής κατασκευής ενδέχεται να είναι ένα καθοριστικό στοιχείο στην ανεπτυγμένη παραγωγή για τον 21^ο αιώνα (Giurco et al., 2014). Πολλές βιομηχανίες έχουν στραφεί προς την Προσθετική Κατασκευή (Quetzeri-Santiago et al., 2019 ; Cholleti & Gibson, 2018), για παράδειγμα η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, οι κατασκευαστικές εταιρείες, η ιατρική (Lecký et al., 2019 ; Alkadi et al., 2019), η οδοντιατρική (Giurco et al., 2014) η αεροδιαστημική (Singh et al., 2018), ενώ επίσης βρίσκει εφαρμογή στην παραγωγή ενός τεράστιου φάσματος αντικειμένων, από πρόσθετα μέλη μέχρι πυραύλους (Giurco et al., 2014). Έχει χρησιμοποιηθεί ακόμα και στην αρχαιολογία για την διατήρηση και ανάκτηση πολιτιστικής κληρονομιάς (Wu & Wu, 2019). Η ΠΚ επίσης, μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά χρήσιμη για την κατασκευή μοντέλων μεγάλης ακρίβειας, για τον πειραματικό έλεγχο υποθέσεων. Υπάρχει πληθώρα παραδειγμάτων στη βιβλιογραφία που αποδεικνύει αυτήν ακριβώς την χρησιμότητα του σχεδιασμού προσαρμοσμένων αντικειμένων στο πλαίσιο μιας συγκεκριμένης μελέτης (Behm et al., 2018). Για παράδειγμα, στην έρευνα των Alkadi et al. (2019), έγιναν πειραματικά τεστ κόπωσης σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο δείγματος διατομής I, σχεδιασμένο στο πρόγραμμα τρισδιάστατης

μοντελοποίησης SolidWorks. Ερευνητές στο πανεπιστήμιο Cornell, ανέπτυξαν το «Hydrocolloid Printing» για την αξιοποίηση της ΠΚ στην food industry (Wu, 2019). Επομένως, οτιδήποτε κάποιος επιθυμεί μπορεί να το κατασκευάσει μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Wu, 2019).

Η προσθετική κατασκευή φαίνεται να είναι το κλειδί για μια προηγμένη βιομηχανοποίηση, καθώς αφορά μια εξελιγμένη μέθοδο κατασκευής αντικειμένων, με πληθώρα πλεονεκτημάτων (Giurco et al., 2014). Η ΠΚ ανοίγει το δρόμο για μία ταχεία, αυτοματοποιημένη και πλήρως ευέλικτη παραγωγή προϊόντων, χωρίς απαραίτητο εξειδικευμένο εξοπλισμό, με πλήρη ελευθερία για τον σχεδιασμό πολύπλοκων σχημάτων (Domingues et al., 2017). Είναι μία καλή λύση σε αρκετές περιπτώσεις, λόγω της αποδοτικότητας της και της εξοικονόμησης χρημάτων που αποφέρει (Lecký et al., 2019 ; Chacón et al., 2019), λόγω της μειωμένης απαίτησης της σε υλικά, ενέργεια και εξοπλισμό, συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής αφαιρετικής φύσης (Giurco et al., 2014). Έχει την ικανότητα να παράγει σύνθετα λειτουργικά εξαρτήματα, με μικρούς χρόνους παράδοσης, ιδιαίτερα σε μικρή κλίμακα και όχι σε μαζική παραγωγή (Alkadi et al., 2019), που οικονομικά είναι πλήρως ασύμφορη για την συμβατική παραγωγή (Singh et al., 2018). Η Προσθετική Κατασκευή επιτρέπει την κατασκευή σύνθετων δομών με το βέλτιστο βάρος, σχήμα και δύναμη, που δεν θα γινόταν να δημιουργηθούν με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής (Cholleti & Gibson, 2018), σημαντικό πλεονέκτημα για εφαρμογές στην αεροδιαστημική, την ιατρική, και την αυτοκινητοβιομηχανία, όπως προαναφέρθηκε (Pavlo et al., 2018). Ουσιαστικά δηλαδή, η μέθοδος αποτελεί έναν γρήγορο και οικονομικό τρόπο παραγωγής αντικειμένων χωρίς την εμπλοκή μηχανικής κατεργασίας (Lanzotti et al., 2018), με πλήρη εμπιστοσύνη στην τεχνολογία της πληροφορίας (Giurco et al., 2014).

Ακριβώς επειδή η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, έχει αναπτυχθεί με ταχείς ρυθμούς, προσέλυσε το ενδιαφέρον σε εφαρμογές όχι μόνο βιομηχανικές αλλά και οικιακές (Turku et al., 2018). Αν και την προηγούμενη δεκαετία αποτελούσε μια τεχνολογία πολύ ακριβή και περιορισμένης διαθεσιμότητας, πλέον είναι αρκετά προσιτή (Behm et al., 2018 ; Wilkinson & Core, 2015). Η κλιμάκωση (scalability) και αυτοματοποίηση της παραγωγής, αποτελεί μία ευκαιρία για μετασχηματισμό των θεμελίων της κατασκευής παγκόσμια, τόσο αναθεωρώντας τα γεωγραφικά σύνορα της παραγωγής όσο θολώνοντας την διαχωριστική γραμμή μεταξύ αγοραστών και κατασκευαστών (Giurco et al., 2014). Αυτή η άμεση κατασκευή προϊόντων μέσω ενός λογισμικού σχεδίασης στον υπολογιστή, επιτρέπει την παραγωγή ακόμα και στα σπίτια των απλών καταναλωτών (Turku et al., 2018), δίνοντας την ευκαιρία σε κάθε άνθρωπο να γίνει ο σχεδιαστής και κατασκευαστής των δικών του προϊόντων (Wilkinson & Core, 2015). Η υιοθέτηση της ΠΚ για την καταναλωμένη ή οικιακή κατασκευή προμηνύει μια μεγάλη καινοτομία στο επιχειρηματικό μοντέλο, (Rayna and Striukova, 2016), πράγμα που θα οδηγήσει στη μετάβαση από το παραδοσιακό κατασκευαστο-κεντρικό μοντέλο σε πελατό-κεντρικό μοντέλο βιομηχανίας (Wu & Wu, 2019).

Αυτή η δυνατότητα που παρέχεται από την προσθετική κατασκευή ώστε να μοιράζονται καινοτόμες και πρωτοποριακές ιδέες για νέα προϊόντα σε παγκόσμια κλίμακα, με την βοήθεια των κοινωνικών δικτύων και μέσων ενημέρωσης, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας. Ήδη μεγάλες πολυεθνικές εταιρείες, ανάμεσα τους οι Electrolux, Lego, και Philips, έχουν εκμεταλλευτεί αυτή την δυνατότητα και παράγουν νέα σχέδια προϊόντων με τη συμμετοχή των καταναλωτών, δηλαδή με μεγαλύτερη ακρίβεια στο τι θέλουν εκείνοι. Επίσης, νέες διαδικτυακές εταιρείες, όπως η Fabjectory, η Figure-Prints, η Ponoko, και η Shapeways, χρησιμοποιούν τις δυνατότητες του διαδικτύου δίνοντας την ευκαιρία σε σχεδιαστές να κατασκευάσουν προϊόντα με

μία ποικιλία υλικών, να στήσουν τα δικά τους διαδικτυακά καταστήματα με προϊόντα που κατασκευάζονται κατά παραγγελία, και να δημιουργήσουν αντικείμενα με παραμετροποίηση, που ο εκάστοτε πελάτης θα μπορεί να προσαρμόσει στις ανάγκες του και εν τέλει να εκτυπώσει. (Wilkinson & Core, 2015)

Αυτό θα συμβεί διότι ο καθένας, ανεξάρτητα της τοποθεσίας του, θα μπορεί να είναι ένας κατασκευαστής χωρίς κόστος, ρίσκο ή εξοπλισμό, παρά μόνο με ένα λογισμικό σχεδίασης, δημιουργικότητα και διαδίκτυο (Giurco et al., 2014 ; Heyer et al., 2014). Υπάρχουν διαδικτυακές βιβλιοθήκες με ψηφιακά τρισδιάστατα αρχεία που έχουν ήδη δημιουργηθεί και δίνουν ελεύθερη πρόσβαση στο κοινό για λήψη και εκτύπωση τους (Behm et al., 2018). Έτσι, αυτή ακριβώς η δυνατότητα προσωπικής ψηφιακής δημιουργίας αντικειμένων, συμβάλλει στο να συναντήσουν οι καταναλωτές μόνοι τους τις ανάγκες τους (Peeters et al., 2019) Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθεί πως μόλις το 2015, οι πωλήσεις των προσωπικών και οικιακών τρισδιάστατων εκτυπωτών παγκοσμίως ανήλθαν στα 2.800.000 τεμάχια, οδηγώντας σε μία αγορά αξίας 5 δισεκατομμυρίων δολαρίων. (Cunico et al., 2019).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση και η προηγμένη τεχνολογία όπως η ρομποτική, είναι «game changer» του μέλλοντος (Wilkinson & Core, 2015). Μια ευχάριστη απόρροια αυτής της αλματώδους εξέλιξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η ενίσχυση της περιβαλλοντικής ενσυναίσθησης (Wilkinson & Core, 2015). Η ΠΚ έχει προοπτικές για να εδραιώσει τη βιωσιμότητα στη βιομηχανία (Peeters et al., 2019). Η τρισδιάστατη εκτύπωση, οδηγεί στην μείωση εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, και συμβάλλει γενικά σε μια πιο βιώσιμη κατασκευαστική και καταναλωτική βιομηχανία (Behm et al., 2018). Αυτό διότι μεταβαίνουμε σε μια παραγωγική διαδικασία, που θα παράγει μοναδικά προσαρμοσμένα αντικείμενα, με λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια απ' ότι χρειάζεται η μαζική παραγωγή (Wilkinson & Core, 2015). Η ΠΚ είναι μία καλή λύση για αποδοτική αξιοποίηση των πρώτων υλών, ελαχιστοποιώντας την παραγωγή αποβλήτων και εξοικονομώντας ενέργεια και πόρους (Turku et al., 2018). Για παράδειγμα, στην metal 3DP industry, το 95% της παραγωγής συνήθως φιλτράρεται και επαναχρησιμοποιείται για την παραγωγή καινούριων αντικειμένων (Peeters et al., 2019).

Η ΠΚ είναι πλήρως αποδοτική τόσο στην κατανάλωση πόρων όσο και στη χρήση ενέργειας (Kumar & Czekanski, 2017). Είναι πολύ πιο βιώσιμη τεχνολογία συγκριτικά με τις κλασσικές μεθόδους όπως η χύτευση (Fullenwider et al., 2019). Η χύτευση είναι μία βιομηχανική διεργασία με μειωμένο κατασκευαστικό κόστος και ταχύτητα στην παραγωγή, ωστόσο, δεν δίνει το περιθώριο προσαρμοσμένης παραγωγής (Quetzeri-Santiago et al., 2019). Γενικά η συμβατική κατασκευή χαρακτηρίζεται από αρκετά μειονεκτήματα, κυρίως λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων σε σύνθετες και περίπλοκες γεωμετρικές παραγόμενων αντικειμένων, το οποίο ως αποτέλεσμα οδηγεί σε περιορισμένη δημιουργικότητα στην φάση του σχεδιασμού και άρα μικρή διαφοροποίηση και καινοτομία στα νέα προϊόντα της αγοράς (Domingues et al., 2017), καθιστώντας την μοναδιαία παραγωγή ασύμφορη. Σε γενικές γραμμές λιγότερο «εύστροφη» μέθοδος από άλλες όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση (Quetzeri-Santiago et al., 2019). Έτσι πολλές βιομηχανίες όπως προαναφέρθηκε στρέφονται στην ΠΚ (Quetzeri-Santiago et al., 2019), ωστόσο, όταν πρωτοεμφανίστηκε η τεχνολογία αυτή, η ακρίβεια και η ποιότητα συνήθιζε να είναι δευτερευούσης σημασίας, διότι η κύρια χρήση της ήταν για ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων (Lecký et al., 2019). Για να υιοθετηθεί σαν τεχνολογία από ακόμα περισσότερες επιχειρήσεις, πρέπει να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της ακρίβειας στην διαστασιολόγηση των παραγόμενων εξαρτημάτων, καθότι είναι χαμηλότερη συγκριτικά με τις συμβατικές, αφαιρετικές μεθόδους

παραγωγής (φρέζα, τόννος, και λοιπά) (Lecký et al., 2019). Είναι σίγουρο πως η παραγωγή τελικών προϊόντων μέσω ΠΚ θα αυξηθεί, όταν ανέβουν τα επίπεδα της ακρίβειας και της ποιότητας της μεθόδου (Lecký et al., 2019).

Μία από τις λύσεις σε αυτό το πρόβλημα ίσως αποτελεί το μοντέλο της υβριδικής κατασκευής κατά το οποίο συνδυάζονται δύο (ή και περισσότερες) μέθοδοι παραγωγής, για την πλήρη αξιοποίηση των ατομικών πλεονεκτημάτων τους με στόχο την επίτευξη ενός φαινομένου «1+1=3». (Liu et al., 2019). Δηλαδή, ο συνδυασμός προσθετικής με αφαιρετική κατασκευή εκτός του ότι εκμεταλλεύεται τα δυνατά σημεία δύο ανεξάρτητων φαινομενικά μεθοδολογιών, ελαχιστοποιεί τα μειονεκτήματα τους (Wilkinson & Core, 2015 ; Le et al., 2018). Δημιουργώντας αντικείμενα «near-net shape» μέσω ΠΚ και έπειτα επιτυγχάνοντας την βέλτιστη ποιότητα τους μέσω κατεργασίας CNC, έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα με την χρήση των λιγότερων δυνατών πόρων και ενέργειας (Wilkinson & Core, 2015), την ελάχιστη παραγόμενη φύρα προϊόντος (Wilkinson & Core, 2015) και άρα μειωμένο αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον (Le et al., 2018). Πολλές έρευνες έχουν αφοσιωθεί στην σύζευξη προσθετικής με αφαιρετική κατασκευή, καταφέροντας με επιτυχία την παραγωγή σύνθετων τεμαχίων υψηλής ακρίβειας και ποιότητας, ή την επιδιόρθωση και ανακατασκευή σημαντικών εξαρτημάτων. (Le et al., 2018). Γίνεται εμφανής λοιπόν η συμβολή και της υβριδικής παραγωγής στην βιωσιμότητα και ιδιαίτερα στην επιδιόρθωση και ανακατασκευή εξαρτημάτων υψηλής αξίας, με την έρευνα των (Wilkinson & Core, 2015) να εστιάζει στους τρόπους που αυτό επιτυγχάνεται: [1] Μειωμένες απαιτήσεις σε ενέργεια και υλικά διότι δεν απαιτείται η εκ νέου παραγωγή ολόκληρου του τεμαχίου [2] Κατασκευή στο ακριβές σημείο ανάγκης, άρα δεν μεταφέρονται πρώτες ύλες, τεμάχια που έχουν αστοχήσει και λοιπά.

Αναντίρρητα, η ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος σήμερα είναι πιο ζωτική από ποτέ. Η δημόσια ανησυχία σχετικά με την υπερθέρμανση του περιβάλλοντος και την ταχεία εξάντληση των ορυκτών πόρων, είναι ιδιαίτερα αυξημένη (Stolz & Mülhaupt, 2020). Ο όγκος των παραγόμενων αποβλήτων αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς κάθε χρόνο, ενώ μόλις το 2019 είχε αυξηθεί κατά 43,7% συγκριτικά με το 2018. Πλέον, η περιβαλλοντική μόλυνση από την παραγωγή και κατανάλωση είναι από τα πιο σημαντικά ζητήματα που απασχολούν τους ειδικούς (Tur et al., 2019). Η υγειονομική ταφή αποτελεί την κυρίαρχη μορφή διαχείρισης των αποβλήτων, ενώ η καύση τους έχει απαγορευτεί, λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Πλέον, ένα ζήτημα που απασχολεί τους ειδήμονες είναι η ενέργεια που μπορεί να αποδεδεσμευθεί από τα απόβλητα (Giurco et al., 2014), μέσω κυρίως της ανακύκλωσης τους. Για παράδειγμα, στη Ρωσία αυξάνονται οι χρηματοδοτήσεις για προγράμματα και έργα διαχείρισης των αποβλήτων (Tur et al., 2019). Και στην Ευρώπη όμως, έχει σημειωθεί αντίστοιχη κινητοποίηση, καθώς η Ευρωπαϊκή Ένωση στοχεύει στην απαγόρευση της αποθήκευσης «stockpiling» των αποβλήτων έως το 2020. Λόγου χάριν σε χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία και οι Σκανδιναβικές χώρες έχουν ως πρωταρχικό στόχο την επαναχρησιμοποίηση πιθανών πολυμερών μετά από μηχανική ανακύκλωση. (Czyżewski et al., 2018)

Ένα μεγάλο κομμάτι των αποβλήτων είναι τα πλαστικά απορρίμματα, καθώς παρατηρείται ραγδαία αύξηση της βιομηχανίας πλαστικών τα τελευταία χρόνια (Paciorek-Sadowska et al., 2019). Το 2017, η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού ήταν 335 εκατομμύρια τόνοι, μία αύξηση περίπου 4% από την προηγούμενη χρονιά (Paciorek-Sadowska et al., 2019), ενώ προβλέπεται να έχει αυξηθεί μέχρι και στους 850 εκατομμύρια τόνους ετησίως έως το 2050 (Wu, 2019). Αυτή η τάση προμηνύει πως στο κοντινό μέλλον η παγκόσμια οικονομία θα καλείται να αντιμετωπίσει ένα τεράστιο

αυξανόμενο όγκο πλαστικών αποβλήτων (Paciorek-Sadowska et al., 2019). Αυτή η αυξημένη παραγωγή και κατανάλωση πλαστικού, έχει δημιουργήσει μεγάλη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, την κατά κόρον πηγή προέλευσης του πολυμερούς, ενώ παράλληλα έχει οδηγήσει σε αύξηση των πλαστικών αποβλήτων (Turku et al., 2018). Το πλαστικό είναι ένα υλικό που υπερिशύει στην καθημερινή ζωή, ωστόσο ο βαθμός ανακύκλωσης του είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, με την Ευρώπη να ανακυκλώνει μόνο το 14% αυτού το έτος 2016 (Santander et al., 2020). Η χρήση πλαστικών και η διαχείριση τους στο τέλος της ωφέλιμης ζωής είναι ένα μείζον ζήτημα που χρήζει διευθέτησης για την υιοθέτηση της βιωσιμότητας στις ανθρώπινες εργασίες (Pavlo et al., 2018).

Μία ακόμη κύρια πηγή αποβλήτων είναι τα λάστιχα, παρά το ότι οι κυβερνήσεις προωθούν την ανακύκλωση τους (Quetzeri-Santiago et al., 2019). Τα μη χρήσιμα πλέον λάστιχα έχουν γίνει ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα παγκοσμίως, διότι είναι εύφλεκτα, μη βιοδιασπώμενα, και περιέχουν τοξικές ουσίες (Alkadi et al., 2019), ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες, όπου η ευκολία στην ανάφλεξη τους ελλοχεύει τον τεράστιο κίνδυνο πρόκλησης επικίνδυνων πυρκαγιών, προκαλώντας τοξικά καυσαέρια στην ατμόσφαιρα (Domingues et al., 2017). Κάθε χρόνο σε όλο τον κόσμο παράγονται περίπου 1.5 δισεκατομμύριο λάστιχα (Alkadi et al., 2019), ενώ σύμφωνα με στατιστικά, εκτιμάται πως το 25% όλων των λάστιχων στο τέλος της ζωής τους, βρίσκεται ακόμα σε χώρους υγειονομικής ταφής σε όλο τον κόσμο (Quetzeri-Santiago et al., 2019). Αυτή η δραματική αύξηση στα απορριφθέντα λάστιχα αποτελεί συνεπώς ένα μείζον ζήτημα. Λάστιχα στο τέλος της ζωής τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών, με την καλύτερη λύση να βρίσκεται στην ανακύκλωση (Domingues et al., 2017).

Ωστόσο, η ανακύκλωση συνδέεται με αρκετά μειονεκτήματα, όπως η συλλογή των απορριμμάτων και η κοστοβόρα μετακίνηση μεγάλων όγκων και χαμηλού βάρους, παράλληλα με την ανάγκη για διάθεση σημαντικού κεφαλαίου και επενδύσεων. Όλα αυτά καθιστούν τη διαδικασία της ανακύκλωσης τόσο οικονομικά ασύμφορη όσο και περιβαλλοντικά ανεπίτρεπτη (Santander et al., 2020). Το πρόβλημα της ανακύκλωσης είναι δύσκολο να επιλυθεί, για τους εξής λόγους: (1) Δεν υπάρχει μια ολοκληρωμένη κρατική βάση δεδομένων για τα είδη αποβλήτων, πράγμα που λειτουργεί ως εμπόδιο για την σωστή λήψη αποφάσεων διαχείρισης τους, (2) Ανεπαρκής χρηματοδότηση για την συλλογή και ταξινόμηση των αποβλήτων (Tur et al., 2019).

Αποδεικνύεται λοιπόν πως η διαχείριση των αποβλήτων είναι ένα διαρκές άλυτο πρόβλημα. (Pavlo et al., 2018). Ο συνδυασμός του Ιστού 2.0 με τις προηγμένες τεχνολογίες κατασκευής, θα μπορούσε να θέσει νέες βάσεις στον τομέα της κατασκευής και παραγωγής αντικειμένων και να μειώσει την περιβαλλοντική μόλυνση (Wilkinson & Cope, 2015). Η προσθετική κατασκευή θεωρείται μια καλή λύση προς τη βιωσιμότητα (Peeters et al., 2019), και οι ειδικοί προωθούν την Προσθετική Κατασκευή για την ικανότητα της να μειώσει το αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο κατά τη διαδικασία κατασκευής (Wilkinson & Cope, 2015).

Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι να εξετάσει ακριβώς ποιοι είναι οι κοινοί άξονες της Προσθετικής Κατασκευής με την προστασία του περιβάλλοντος στο πλαίσιο του μοντέλου της Κυκλικής Οικονομίας. Δομείται λοιπόν, με τον εξής τρόπο. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τη διάρθρωση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας της ορθότητας των ισχυρισμών που πρόκειται να παρατεθούν. Έπειτα, ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση των βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων που έχουν δημοσιευθεί μέχρι τις 31/3/2020, το περιεχόμενο τους και εν συντομία

τα κύρια συμπεράσματα τους και οι κατευθυντήριες ιδέες τους για μελλοντική μελέτη. Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναπτύσσονται οι βασικοί πυλώνες της Προσθετικής Κατασκευής, ορίζονται με σαφήνεια οι μέθοδοι και ο τρόπος λειτουργίας της, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά όπως τα υλικά με τα οποία έχει συμβατότητα. Το τελευταίο μα εξαιρετικά σημαντικό κεφάλαιο, επιδιώκει να εισάγει τον αναγνώστη στη φιλοσοφία της Κυκλικής Οικονομίας στον κόσμο της βιομηχανίας, καθώς και στο πως μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να προαχθεί ένα κυκλικό μοντέλο προς όφελος της οικολογίας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

2. Τρέχουσα Αριστεία στην Περιοχή της Προσθετικής Κατασκευής

Το παρόν κεφάλαιο, αποτελείται από δύο επιμέρους υποενότητες. Η πρώτη, Ενότητα 2.1, αφορά στην ανάλυση της μεθόδου που επιλέχθηκε για την διεξαγωγή εμπειριστατωμένης βιβλιογραφικής ανάλυσης και έρευνας. Στην δεύτερη, Ενότητα 2.2, περιγράφονται διεξοδικά οι ερευνητικοί στόχοι καθώς και τα στατιστικά στοιχεία της έρευνας.

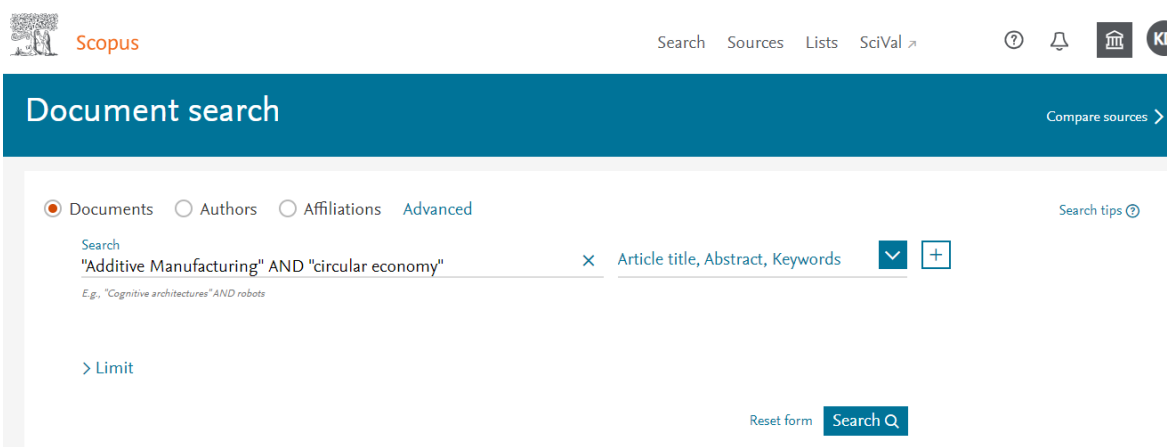
2.1. Μέθοδος Έρευνας

Πρωταρχικό βήμα για την εκπόνηση μιας συστημικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, είναι να έχει προκαθοριστεί με ακρίβεια και σαφήνεια η μέθοδος η οποία θα ακολουθηθεί για την προσέγγιση της. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στοχεύει στον θεματικό άξονα της Προσθετικής Κατασκευής και της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης, με εξειδίκευση στην Κυκλική Οικονομία.

2.1.1. Επιλογή Βιβλιογραφικών Πηγών & Καθορισμός Πεδίων Έρευνας

Για μια επιτυχημένη και ολοκληρωμένη βιβλιογραφική έρευνα, είναι σημαντικό να καθοριστούν εξ αρχής οι βάσεις δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την άντληση ακαδημαϊκών άρθρων και ερευνών. Δεδομένου ότι είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται η άμεση και ελεύθερη πρόσβαση για όσο χρονικό διάστημα κρίνεται απαραίτητο προς την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας, οι επιλογές Βιβλιογραφικών Βάσεων Δεδομένων, συνοψίζονται ακολούθως:

- Elsevier SCOPUS (βλ. **Σχήμα 2-1**): Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων αποτελεί την σημαντικότερη εκ των διαθέσιμων επιλογών για βιβλιογραφική αναζήτηση. Το Scopus πρόκειται για μια πλατφόρμα που φιλοξενεί περισσότερους από 23.000 επιστημονικούς τίτλους, και 5.000



Σχήμα 2- 1: Η οθόνη αναζήτησης στην βιβλιογραφική βάση δεδομένων Elsevier SCOPUS

εκδοτικούς οίκους. Περιλαμβάνει περίπου 1.400.000.000 ετεροαναφορές, ενώ οι δημοσιευμένες καταχωρήσεις είναι κάτι παραπάνω από 73.000.000 επιστημονικά άρθρα. Σύμφωνα με αυτά, είναι ευκόλως αντιληπτό ότι το SCOPUS είναι από τις πιο δημοφιλείς και πλήρεις βιβλιογραφικές βάσεις

επιστημονικών εγγράφων. Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο δίνει την δυνατότητα ελεύθερης πρόσβασης στην συγκεκριμένη πλατφόρμα, μέσω των ακαδημαϊκών στοιχείων ταυτοποίησης και την σύνδεση διαμέσου Heal Link ή VPN του Ε.Μ.Π.

- Google Scholar (βλ. **Σχήμα 2-2**): Εν συνέχεια της μηχανής αναζήτησης Google, το Google Scholar παρέχει τη δυνατότητα ελεύθερης πρόσβασης και αναζήτησης επιστημονικών εγγράφων. Συγκεκριμένα, ιχνηλατεί μέσω της πληκτρολόγησης των εκάστοτε keywords κάθε χρήστη, τα μεταδεδομένα και το πλήρες κείμενο της ακαδημαϊκής βιβλιογραφίας. Με τον τρόπο αυτό δίνει πρόσβαση στις πηγές στις οποίες έχει άδεια σύνδεσης η Βιβλιοθήκη του Ε.Μ.Π. και επιτρέπει τον υπολογισμό των βιβλιομετρικών δεικτών και την πρόσβαση σε βιβλιομετρικές πληροφορίες, χρήσει του λογισμικού Publishor Perish.

The screenshot shows a Google Scholar search interface. The search bar contains the query "additive manufacturing" AND "circular economy". The results are filtered to show articles from 2016 onwards. Three articles are visible:

- Circular economy: questions for responsible minerals, additive manufacturing and recycling of metals** by D. Giurco, A. Littleboy, T. Boyle, J. Fyfe, S. White. Published in *Resources*, 2014. [PDF] mdpi.com
- The role of laser additive manufacturing methods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing—enabling circular economy** by M. Leino, J. Pekkarinen, R. Soukka. Published in *Physics Procedia*, 2016. [PDF] sciencedirect.com
- Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy** by M. Sauerwein, E. Dubrovski, R. Balkenende. Published in *Journal of Cleaner Production*, 2019. Elsevier

Σχήμα 2- 2: Η οθόνη αναζήτησης στην μηχανή αναζήτησης Google Scholar

Μελετώντας εκτενώς τις ευκαιρίες αλλά και τις προκλήσεις που προσφέρει καθεμία από αυτές τις πηγές δεδομένων, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ως βάση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης το Elsevier SCOPUS, λόγω του μεγάλου όγκου πληροφοριών και επιστημονικών άρθρων που προσφέρει.

Φυσικά, για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα παράλειψης σημαντικών και χρήσιμων εγγράφων, αξιοποιήθηκε και η ευρέως γνωστή μηχανή αναζήτησης Google Μελετητής, για την φώτιση των γκρίζων σημείων που ίσως αδυνατεί να καλύψει πλήρως το SCOPUS.

2.1.2. Επιλογή Λέξεων-Κλειδιών

Συνεχίζοντας την μεθοδική προσέγγιση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, καθορίστηκαν οι λέξεις-κλειδιά που αποτελούν την βάση για την αναζήτηση στις Βιβλιογραφικές Πηγές Δεδομένων. Για να επιτευχθεί μια στοχευμένη έρευνα τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά, επιλέχθηκαν ορισμένες λέξεις-κλειδιά και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο συνδυασμός αυτών, μέσω Boolean άλγεβρας. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύχθηκε ένας αχανής όγκος αποτελεσμάτων, και τα δημοσιεύματα που προέκυψαν ήταν ελεγχόμενα από ποσοτική άποψη.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στην πλατφόρμα Elsevier SCOPUS, οι φράσεις-κλειδιά ήταν: 1) "Additive Manufactur*" , 2) "3d print*" , 3) "rapid prototyp*" , 4) "additive production" , 5)

"generative manufactur*", 6) "recycl*", 7) "circular economy". Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκε ο αστερίσκος (*) προκειμένου να συμπεριληφθούν και τα αποτελέσματα που εμπεριέχουν παράγωγα των συγκεκριμένων όρων, αν όχι αυτούσιους (για παράδειγμα 3D printing και 3D printer). Η ενοποίηση των φράσεων πραγματοποιήθηκε με την χρήση των λογικών τελεστών AND και OR, ως εξής:

("Additive manufactur*" OR "3d print*" OR "rapid prototyp*" OR "additive production" OR "generative manufactur*") AND ("recycl*" OR "circular economy")

Έτσι, προκύπτουν 10 πιθανοί συνδυασμοί, και κάθε αποτέλεσμα της εν λόγω αναζήτησης εμπεριέχει τουλάχιστον ένα από τα πέντε συνώνυμα του Additive Manufacturing, και είτε τον όρο recycling είναι τον όρο circular economy.

Όσον αφορά στην μηχανή αναζήτησης του Google Μελετητή, λόγω του μεγαλύτερου εύρους διαθέσιμων ακαδημαϊκών δημοσιεύσεων, οι λέξεις-κλειδιά πρέπει να είναι ακόμα πιο στοχευμένες για να προκύψει ένας ελεγχόμενος και διαχειρίσιμος αριθμός αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι φράσεις-κλειδιά 1) "Additive Manufacturing" και 2) "circular economy" όμως για την ενοποίηση τους έγινε χρήση μόνο του λογικού τελεστή «AND». Αυτό συνέβη για να περιοριστούν τα προκύπτοντα αποτελέσματα της εν λόγω αναζήτησης.

2.1.3. Καθορισμός Χρονικού Εύρους Μελέτης

Επόμενη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, είναι το βάθος χρόνου στο οποίο αναζητούνται οι επιστημονικές δημοσιεύσεις. Λόγω του ότι, το πεδίο του Additive Manufacturing και της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ένα πρόσφατα αναδυόμενο αντικείμενο στην επιστημονική κοινότητα, το 100% των αποτελεσμάτων χρονολογείται μετά το 2000, με το 97,0% να είναι μετά το 2014, και το 84,3% μετά το 2017. Ως αποτέλεσμα, αποφασίσθηκε το χρονικό εύρος της βιβλιογραφικής ανασκόπησης να περιοριστεί στις μελέτες των τελευταίων 7 χρόνων, δηλαδή από το 2014 έως και τις 31/03/2020, για τους λόγους που αναφέρονται στη συνέχεια:

- Η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι ακόμα ένα σχετικά ανεξερεύνητο πεδίο για τις σύγχρονες επιχειρήσεις, είναι σημαντικό λοιπόν να γίνει επικέντρωση στις εξελίξεις του παρόντος και στις προβλέψεις του μέλλοντος. Η έντονη ανοδική τάση του ενδιαφέροντος για την Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) στην υπό εξέταση περίοδο αποτέλεσε μονόδρομο για την επιλογή του συγκεκριμένου χρονικού εύρους μελέτης
- Λόγω των ραγδαίων εξελίξεων σε μικρό χρονικό διάστημα στον συγκεκριμένο τομέα, η πιθανότητα το 3% των αποτελεσμάτων που χρονολογείται από το 2000 έως το 2013 (μόλις 10 δημοσιεύσεις) να εμπεριέχει κάτι ζωτικά χρήσιμο, είναι απειροελάχιστη.

2.1.4. Επιλογή Πεδίων Αναζήτησης

Για την βιβλιογραφική ανασκόπηση, κρίθηκε σκόπιμο οι λέξεις κλειδιά να αναζητούνται στον «Τίτλο», την «Περίληψη» και τις δοθείσες εκ του συγγραφέως «Λέξεις-Κλειδιά» κάθε καταχώρησης στις Βιβλιογραφικές Βάσεις. Αυτό ήταν εφικτό να γίνει στην πλατφόρμα SCOPUS

καθώς παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης αναζήτησης αυτών των τριών πεδίων μέσω της επιλογής «Title, Abstract, Keyword» δίπλα στο πεδίο αναζήτησης.

Δυστυχώς, ο Google Μελετητής δεν προσφέρει την συγκεκριμένη επιλογή, αλλά επιτρέπει την αναζήτηση είτε βάσει α) Τίτλου, είτε β) Πλήρους Κειμένου. Για να αποφευχθεί ο τεράστιος και αχανής όγκος αποτελεσμάτων, όπως θα συνέβαινε μέσω της αναζήτησης στο πλήρες κείμενο κάθε δημοσίευσης, επιλέχθηκε να ληφθεί υπόψιν μόνο ο Τίτλος των ακαδημαϊκών αρχείων.

2.1.5. Επιλογή Κατηγοριών Δημοσιεύσεων

Στην συνέχεια, καθορίστηκε η παράμετρος της κατηγορίας των επιθυμητών αποτελεσμάτων (document type). Ακρογωνιαίος λίθος για μια εμπειριστατωμένη και πλήρη βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι η προηγουμένως μελέτη αξιολογημένων βιβλιογραφικών πηγών, οι οποίες παρουσιάζουν ώριμα ερευνητικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε σε πρώτη φάση να αποκλειστούν οι δημοσιεύσεις και οι κριτικές από συνέδρια (Conference Papers & Conference Reviews) που δημοσιεύθηκαν πριν την 1/4/2018. Δίνεται λοιπόν η ευκαιρία στις δημοσιεύσεις από πρακτικά συνεδρίων των τελευταίων δύο χρόνων για εξέταση και αξιολόγηση, όμως απορρίπτονται οι προηγούμενες καθώς παρουσιάζουν ερευνητικές ιδέες οι οποίες αν ήταν αξιόλογες θα έπρεπε να είχαν δημοσιευθεί και σε επιστημονικά περιοδικά στο βάθος αυτών των δύο ετών. Έτσι, η αναζήτηση επικεντρώθηκε κυρίως στις εξής κατηγορίες δημοσιευμάτων:

- Επιστημονικά και ακαδημαϊκά άρθρα (Articles)
- Ανασκοπήσεις επιστημονικού πεδίου με σύστημα κριτών (Reviews)
- Κεφάλαια βιβλίων (Book Chapters)
- Πρακτικά συνεδρίων από 1/4/2018 και έπειτα

Δυστυχώς, το Google Scholar δεν προσφέρει καμία αντίστοιχη επιλογή για εξειδικευμένη αναζήτηση βάσει την Κατηγορία κάθε δημοσίευσης. Ωστόσο από την εποπτεία των αποτελεσμάτων, ορισμένες δημοσιεύσεις αποτελούν διπλωματικές ή πτυχιακές εργασίες άλλων φοιτητών, επομένως κρίθηκαν μη αξιόπιστη κατηγορία εγγράφων και απορρίφθηκαν.

Εν κατακλείδι, στο **Σχήμα 2-3**, περιγράφονται συνοπτικά τα προαναφερθέντα στάδια για την εκπόνηση της αναζήτησης στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Το τελευταίο και σημαντικότερο βήμα για την βιβλιογραφική μελέτη είναι η ανάγνωση των περιλήψεων των δημοσιευμάτων που έχει ως αποτέλεσμα η κάθε αναζήτηση, τόσο στο SCOPUS όσο και στο Scholar. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται ένα πρώτο βασικό φιλτράρισμα στο ποια δημοσιεύματα είναι τελικά χρήσιμα για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.



Σχήμα 2- 3: Μεθοδολογία για την βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.2. Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Στην συγκεκριμένη ενότητα, αναλύονται τα αποτελέσματα που επέφερε η μελέτη της τρέχουσας βιβλιογραφίας, ενώ στο τέλος, παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα των αναζητήσεων.

2.2.1. Ερευνητικοί Στόχοι Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Η αναζήτηση των πηγών της βιβλιογραφίας έγινε με γνώμονα την μελέτη της Προσθετικής Κατασκευής και την αλληλεπίδραση και συμβολή αυτής στην Κυκλική Οικονομία. Για το λόγο αυτό, τέθηκαν εξ αρχής δύο θεματικοί άξονες, με στόχο τουλάχιστον ένας εξ αυτών να διαπραγματεύεται στην περίληψη της εκάστοτε δημοσίευσης, ούτως ώστε να θεωρηθεί χρήσιμη. Αυτά τα πεδία ενδιαφέροντος ήταν: 1) Γενικές Πληροφορίες περί Προσθετικής Κατασκευής, 2) Η συμβολή της Προσθετικής Κατασκευής στην Κυκλική Οικονομία. Καθότι όμως όπως είναι ευκόλως αντιληπτό πρόκειται για δύο μεγάλα θεματικά κέντρα, αποδομήθηκαν σε μικρότερες υποενότητες ενδιαφέροντος, συγκεκριμένα (1) Μέθοδοι και Πρακτικές της Προσθετικής Κατασκευής, (2) Χρησιμοποιούμενα υλικά στην Προσθετική Κατασκευή, και η Κυκλική Οικονομία στα εξής: (3) Ανακύκλωση (4) Επαναχρησιμοποίηση (5) Ανακατασκευή και Επιδιόρθωση.

2.2.2. Στατιστικά Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

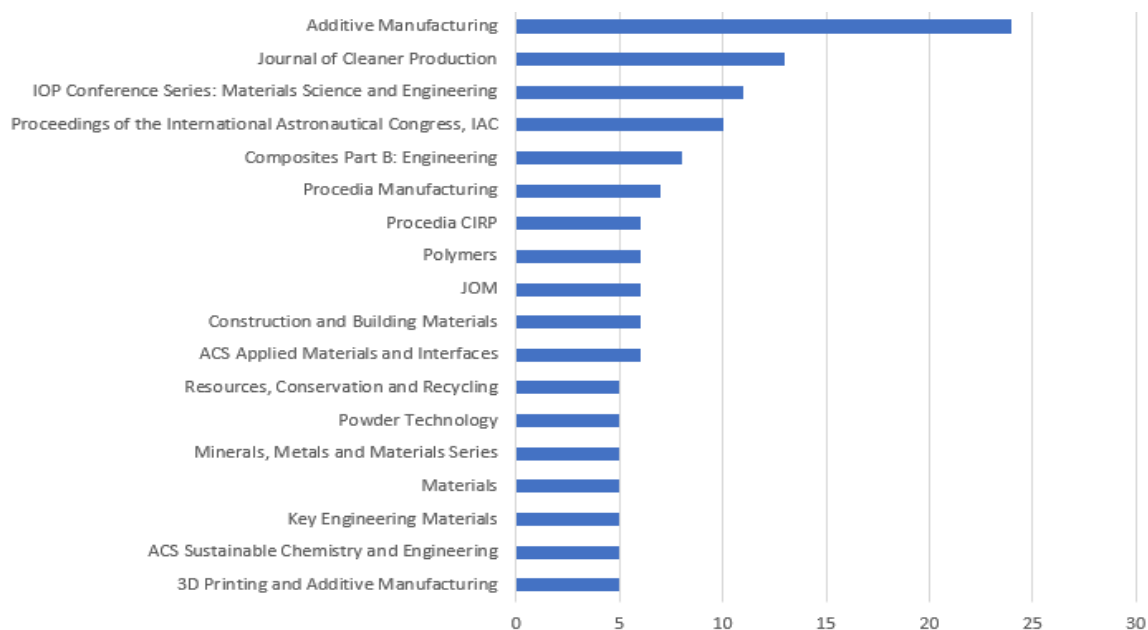
Τα αποτελέσματα της αναζήτησης στο SCOPUS, αφότου καθορίστηκαν οι παράμετροι που αναλύθηκαν προηγουμένως, οδήγησαν σε 446 καταχωρημένες δημοσιεύσεις, ενώ από το Google Scholar 11, ωστόσο τα 6 εξ αυτών είχαν ήδη προκύψει και από την βάση SCOPUS, επομένως οι διαθέσιμες καταχωρήσεις είναι 5. Στον πίνακα 2-1 που ακολουθεί φαίνεται το πλήθος των δημοσιεύσεων ανά επιστημονικό περιοδικό, για όσα περιοδικά καταχώρησαν τουλάχιστον πέντε από τις έρευνες.

Πίνακας 2-1: Ο αριθμός των δημοσιεύσεων ανά επιστημονικό περιοδικό, για όσα καταχωρήθηκαν άνω των πέντε

Επιστημονικό Περιοδικό	# Δημοσιεύσεων
Additive Manufacturing	24
Journal of Cleaner Production	13
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	11
Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC	10
Composites Part B: Engineering	8
Procedia Manufacturing	7

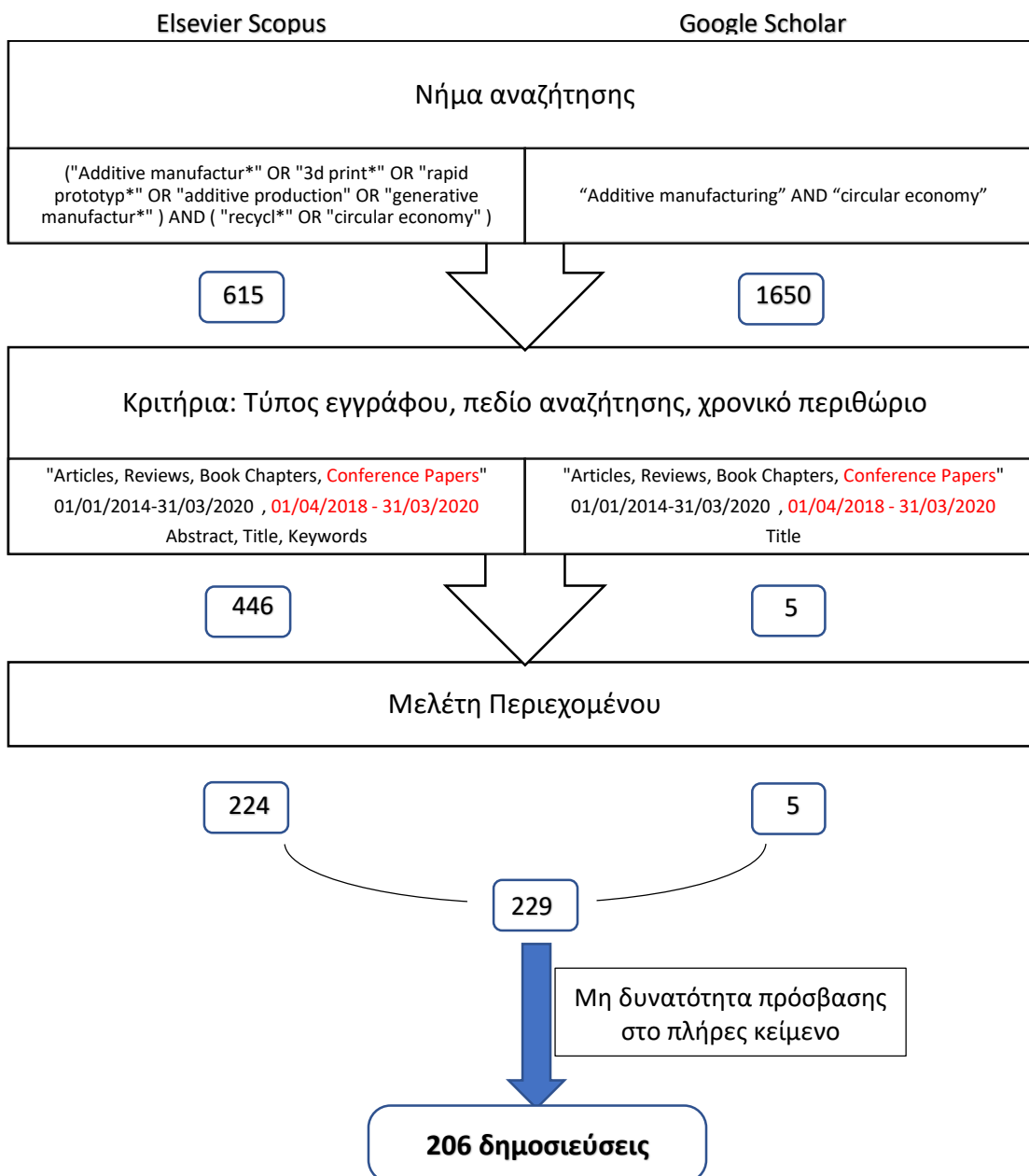
ACS Applied Materials and Interfaces	6
Construction and Building Materials	6
JOM	6
Polymers	6
Procedia CIRP	6
3D Printing and Additive Manufacturing	5
ACS Sustainable Chemistry and Engineering	5
Key Engineering Materials	5
Materials	5
Minerals, Metals and Materials Series	5
Powder Technology	5
Resources, Conservation and Recycling	5

Συγκρίνοντας με το σύνολο των δημοσιεύσεων (446), τα αποτελέσματα προέρχονται από πληθώρα επιστημονικών περιοδικών, με το επικρατέστερο να είναι το «Additive Manufacturing» με εικοσιτέσσερις δημοσιεύσεις, δηλαδή μόλις το 5,38%. Στο Σχήμα 2-4 στην συνέχεια, απεικονίζονται διαγραμματικά αυτά τα στοιχεία.



Σχήμα 2- 4: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τον αριθμό των καταχωρήσεων ανά επιστημονικό περιοδικό, για όσα είχαν άνω των 5 καταχωρήσεων.

Μετά την εφαρμογή και του τελευταίου βήματος, δηλαδή της ανάγνωσης των σύντομων περιλήψεων κάθε εγγράφου, συγκεντρώθηκαν επιτυχώς 224 δημοσιεύματα από το SCOPUS, ενώ τα υπολειπόμενα 222 κρίθηκαν μη αποδεκτά βάσει των θεματικών αξόνων, και 5 από το Google Scholar. Το τελευταίο εμπόδιο στο να συγκεντρωθούν οι επιθυμητές δημοσιεύσεις είναι η απαγόρευση της πρόσβασης σε ορισμένες από αυτές. Συγκεκριμένα, σε 20 δημοσιεύσεις από το SCOPUS και σε 3 από το Google Scholar ήταν αδύνατο να βρεθεί το πλήρες κείμενο, οδηγώντας σε τελικό σύνολο **206** καταχωρήσεων. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα 2-5.



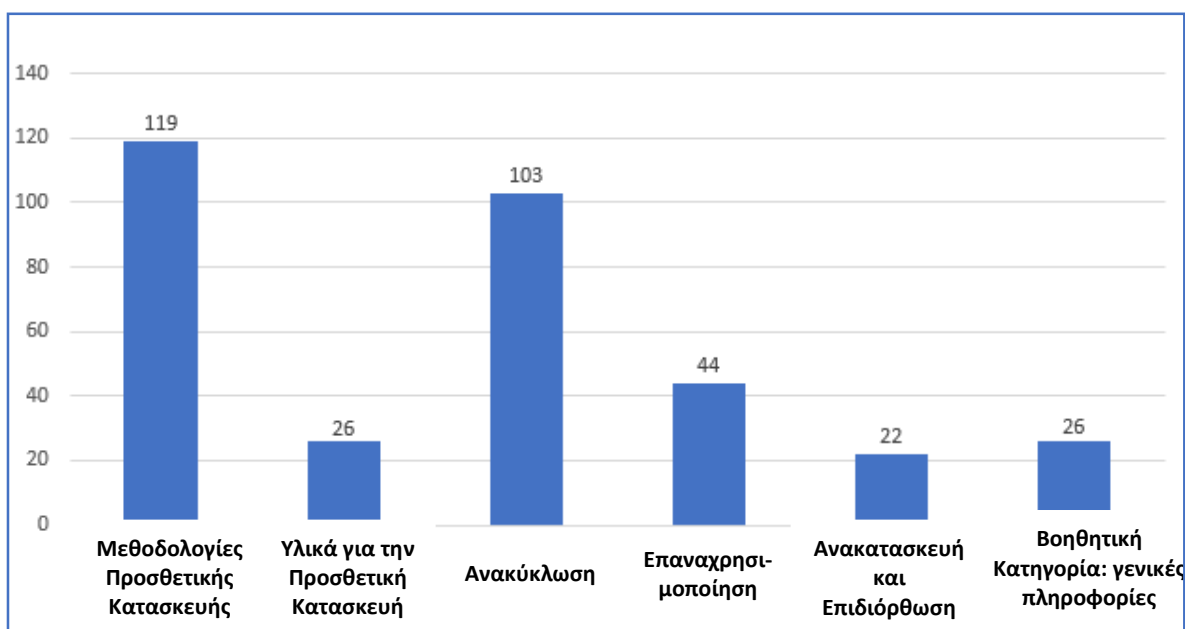
Σχήμα 2- 5 : Η μεθοδολογία για την τελική συγκέντρωση των απαραίτητων καταχωρήσεων για την διάρθρωση της έρευνας

Αυτές οι μελέτες επομένως, κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με τους πέντε θεματικούς άξονες που προαναφέρθηκαν, συγκεκριμένα (1) Μεθοδολογίες Προσθετικής Κατασκευής (2)

Χρησιμοποιούμενα Υλικά (3) Ανακύκλωση (4) Επαναχρησιμοποίηση (5) Επιδιόρθωση και ανακατασκευή. Εδώ θα πρέπει να αναφερθούν τρεις υποσημειώσεις:

- Χρησιμοποιήθηκε μία έκτη κατηγορία, για τις δημοσιεύσεις που φαίνονταν ενδιαφέρουσες και σχετικές με το θέμα με γενικές πληροφορίες για το περιβάλλον και την κυκλική οικονομία, παρόλα αυτά δεν ήταν ξεκάθαρο σε τόσο πρώιμο στάδιο σε ποιον θεματικό άξονα μπορούσαν να ενταχτούν.
- Οι περισσότερες δημοσιεύσεις φυσικά μπορούν να ενταχθούν σε πάνω από μία κατηγορίες.
- Η ομαδοποίηση αρχικά πραγματοποιήθηκε με την ανάγνωση των περιλήψεων. Σε επόμενο στάδιο ωστόσο, και με την αναλυτική μελέτη του πλήρους κειμένου, βρέθηκαν ορισμένα σημεία των μελετών που μπόρεσαν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες θεματικές ενότητες, που αρχικά δεν είχαν επιλεγεί. Αυτό είναι βέβαια αναμενόμενο όταν οι έννοιες που διαχειρίζονται είναι σε μεγάλο βαθμό αλληλένδετες.

Σύμφωνα με αυτά λοιπόν, στην συνέχεια (Σχήμα 2-6) φαίνεται η κατηγοριοποίηση των 206 δημοσιεύσεων από τις βιβλιογραφικές βάσεις δεδομένων SCOPUS και Google Scholar.



Σχήμα 2- 6 : Η κατηγοριοποίηση των 206 καταχωρήσεων στους 6 θεματικούς άξονες

Στο Παράρτημα Α, παρατίθεται εκτενώς η λίστα των βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων καθώς και η ταξινόμησή τους σε αυτούς τους έξι θεματικούς άξονες.

3. Μελέτη των τρεχόντων βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων

Πριν τη διάρθρωση της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης, με θέμα την Προσθετική Κατασκευή και τα σημεία τομής της με την Κυκλική Οικονομία, είναι αδιαμφισβήτητα απαραίτητη μία σύντομη και συνεκτική μελέτη στις ήδη υπάρχουσες καταχωρήσεις αυτής της κατηγορίας δημοσιεύσεων. Αυτό το εγχείρημα αποτελεί ένα βασικό βήμα, καθώς με τον τρόπο αυτό χτίζεται το βασικό υπόβαθρο που χρειάζεται κάποιος να κατέχει πριν προχωρήσει στην περαιτέρω ανάλυση του ζητήματος. Εκτός αυτού όμως, υπογραμμίζονται οι γκρίζες περιοχές που δεν έχει καλύψει η τρέχουσα βιβλιογραφία και δίνονται κατευθυντήριες ιδέες για μελλοντική έρευνα και μελέτη.

Η παρούσα ενότητα, δομείται ως εξής: στο υποκεφάλαιο 3.1 αναπτύσσεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την συγκέντρωση των δημοσιεύσεων, καθώς και τα κριτήρια διαλογής και φιλτραρίσματος των αποτελεσμάτων. Στο υποκεφάλαιο 3.2, γίνεται μία περαιτέρω ταξινόμηση και ομαδοποίηση των ανασκοπήσεων που κρίνονται αποδεκτές προς μελέτη. Τέλος, η συγκεκριμένη ενότητα κλείνει με το υποκεφάλαιο 3.3, κατά το οποίο γίνεται μία σύντομη ανάλυση των κύριων συμπερασμάτων κάθε δημοσίευσης, όπως και επίσης παραθέτονται οι προτάσεις τους για σημεία της βιβλιογραφίας που χρειάζονται παραπάνω έρευνα και ανάπτυξη.

3.1 Μέθοδος

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, «2.1. Μέθοδος Έρευνας», χρησιμοποιήθηκε η βιβλιογραφική βάση δεδομένων Elsevier Scopus για τη συγκέντρωση των δημοσιεύσεων, σε χρονικό ορίζοντα από το 2014 έως και τις 31/3/2020. Το νήμα αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκε, είναι το εξής:

("Additive manufactur*" OR "3d print*" OR "rapid prototyp*" OR "additive production" OR "generative manufactur*") AND ("recycl*" OR "circular economy")

φέρνοντας ως αποτέλεσμα 605 δημοσιεύσεις. Εισάγοντας το φίλτρο “Review” στο είδος των δημοσιεύσεων, το ζητούμενο νούμερο μειώθηκε στις δεκαεννέα (19) καταχωρήσεις, οι οποίες αποτελούν και το αρχικό δείγμα μελέτης του συγκεκριμένου υποκεφαλαίου. Εξ’ αυτών των δημοσιεύσεων, μόνο οι δεκαπέντε (15) κρίθηκαν χρήσιμες, με τις υπόλοιπες τέσσερις (4) να απορρίπτονται. Ονομαστικά, η ανασκόπηση «Plastic waste management in Indonesia: Review» από Laila et al., 2020, απορρίφθηκε λόγω αδυναμίας εντόπισης ολόκληρου του κειμένου της δημοσίευσης. Επίσης, η δημοσίευση «Research progress in recycling and reuse of carbon fiber reinforced resin composites» των Ruan et al., 2019, δεν συμπεριλαμβάνεται στην μελέτη, λόγω της μη συνάφειας του περιεχομένου της με το εξεταζόμενο αντικείμενο αλλά και λόγω της συγγραφής της σε άλλη γλώσσα αντί των αγγλικών. Τέλος, οι δημοσιεύσεις «Paper-based chemical and biological sensors: Engineering aspects» με συγγραφείς τους Ahmed et al., 2016, και «Recent advances in sulfonated resin catalysts for efficient biodiesel and bio-derived additives production» των Trombettoni et al., 2018, μη έχοντας κάποιο κοινό άξονα είτε με το ζήτημα της Προσθετικής Κατασκευής είτε με την Κυκλική Οικονομία, αποφασίστηκε να μη συμπεριληφθούν υπόψιν εξίσου. Στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί, παραθέτονται συνοπτικώς οι κύριες λεπτομέρειες κάθε

δημοσίευσης από την βιβλιογραφική βάση δεδομένων Elsevier Scopus, με την τελευταία στήλη να υποδηλώνει το αν κρίθηκαν αποδεκτές ή όχι. Όλες οι δημοσιεύσεις ανήκουν στην κατηγορία “Journal”.

Πίνακας 3- 1 : Σύνοψη των βασικών πληροφοριών των βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων της βάσης δεδομένων ELSEVIER SCOPUS, την χρονική περίοδο 01/01/2014 – 31/03/2020

Συγγραφείς και Χρονολογία	Τίτλος	Αριθμός παραπομπών	Επίκεντρο της μελέτης	Αποδεκτή μελέτη (Ναι/Όχι)
Laila et al., 2020	Plastic waste management in Indonesia: Review	0	Η μελέτη εστιάζει στον εντοπισμό των σημαντικότερων δυσκολιών στην διαδικασία της ανακύκλωσης στην Ινδονησία.	O
Santecchia et al., 2020	Material reuse in laser powder bed fusion: Side effects of the laser—metal powder interaction	0	Η μελέτη αφορά στην σκιαγράφηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του λέιζερ και της πούδρας μετάλλου κατά την διαδικασία της Προσθετικής Κατασκευής, υπογραμμίζοντας τις εκδηλωμένες παρενέργειες.	N
Wang et al., 2020	Friction Stir Processing of Magnesium Alloys: A Review	6	Η έρευνα εξειδικεύεται στην διαδικασία ανάδευσης τριβής κραμάτων μαγνησίου, όπως για παράδειγμα σχετικά με την δομή και την πλαστική παραμόρφωση, σε συνδυασμό με την Προσθετική Κατασκευή.	N
Sibisi et al., 2020	Review on direct metal laser deposition manufacturing technology for the Ti-6Al-4V alloy	0	Η μελέτη αναλύει την τεχνική Direct laser metal deposition, της κατηγορίας των ΠΚ με βάση το Laser, σε σχέση με την αλληλεπίδραση της τεχνικής με τη μεταλλουργία του κράματος Ti-6Al-4V.	N
Kumar et al., 2020	Processing techniques of polymeric materials and their reinforced composites	0	Η μελέτη περικλύει 4 μελέτες περίπτωσης για τις 4 διαφορετικές μεθόδους ανακύκλωσης, εξάγοντας συμπεράσματα για τη χρήση τους σε εφαρμογές ΠΚ.	N
Rahito et al., 2019	Additive manufacturing for repair and restoration in remanufacturing: An overview from object design and systems perspectives	0	Στην μελέτη παραθέτονται οι προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η ΠΚ στην επισκευή και αποκατάσταση, προκειμένου τεμάχια στο τέλος της ζωής τους να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση (as-new).	N
Daraban et al., 2019	A deep look at metal additive manufacturing recycling and use tools for sustainability performance	1	Η μελέτη εστιάζει αποκλειστικά στην Προσθετική Κατασκευή με υλικό το μέταλλο, από την σκοπιά της βιωσιμότητας, ανακύκλωσης, και επέκτασης του κύκλου ζωής των προϊόντων, στο πνεύμα της προστασίας του περιβάλλοντος .	N
Saboori et al., 2019	Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair	6	Η μελέτη εξετάζει την τεχνολογία Direct Energy Deposition της Προσθετικής Κατασκευής, με έμφαση στην επιδιόρθωση μεταλλικών τεμαχίων και ανταλλακτικών.	N

Ruan et al., 2019	Research progress in recycling and reuse of carbon fiber reinforced resin composites	0	Στην μελέτη αναλύονται οι τεχνικές ανακύκλωσης και η εξέλιξη θερμοσκληρυνόμενων και θερμοπλαστικών ινών άνθρακα με βάση τη ρητίνη.	O
Nascimento et al., 2019	Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal	22	Η μελέτη επικεντρώνεται στην Βιομηχανία 4.0 και το σημείο τομής της με την Κυκλική Οικονομία, προκειμένου να εδραιωθεί ένα πράσινο επιχειρηματικό μοντέλο με έμφαση στην ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων.	N
Navarro et al., 2018	Policies and motivations for the CO ₂ valorization through the sabatier reaction using structured catalysts. A review of the most recent advances	5	Η μελέτη αφορά στην ανακύκλωση του CO ₂ στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με την ανάπτυξη σύγχρονων τεχνολογιών όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση.	N
Gama et al., 2018	Polyurethane foams: Past, present, and future	38	Η μελέτη στοχεύει στην ανάλυση της παραγωγής αφρού πολυουρεθάνιου και στις προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει.	N
Walsh and Ponce de León, 2018	Progress in electrochemical flow reactors for laboratory and pilot scale processing	16	Στη μελέτη εξετάζονται οι αρχές για την εκλογή του πιο αρμόδιου τύπου ηλεκτροχημικού αντιδραστήρα για εργαστηριακές ή πιλοτικές εφαρμογές, με έμφαση σε μοντέρνες τεχνικές όπως Rapid Prototyping μέσω 3D printing.	N
Peng et al., 2018	Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact	17	Η μελέτη επικεντρώνεται στην βιωσιμότητα της Προσθετικής Κατασκευής, με άξονα το αντίκτυπο που έχει στην ενέργεια και το περιβάλλον, καθώς και στην έννοια του κύκλου ζωής και τη διαχείριση του στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του.	N
Trombettoni et al., 2018	Recent advances in sulfonated resin catalysts for efficient biodiesel and bio-derived additives production	24	Στην έρευνα παραθέτονται οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι καταλύτες, καθώς και η υιοθέτηση εναλλακτικών οργανικών όξινων καταλυτών με βάση πολυμερές, στο πλαίσιο ενός υβριδικού συστήματος.	O
Tan et al., 2017	An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process	61	Η έρευνα αφορά στην πρώτη ύλη μετάλλου για ΠΚ, και το πως τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης πούδρας επηρεάζουν τις ιδιότητες του τελικού παραγόμενου προϊόντος.	N
Singh et al., 2017	Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review	29	Η μελέτη αναλύει τεχνικές βιώσιμης κατασκευής προϊόντων με ευαισθησία προς το περιβάλλον, αποσκοπώντας σε ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση απορριφθέντας ύλης για την κατασκευή νέων τεμαχίων.	N

Ahmed et al., 2016	Paper-based chemical and biological sensors: Engineering aspects	122	Η έρευνα μελετά το σχεδιασμό, τη χημεία και τις μηχανικές πτυχές αυτών των αισθητήρων, με έμφαση στα τελευταία χρόνια.	O
Yang et al., 2014	Advanced shape memory technology to reshape product design, manufacturing and recycling	52	Η μελέτη πραγματοποιείται την ανάλυση της προηγμένης Shape Memory τεχνολογίας, συγκεκριμένα στα πολυμερή υλικά, καθώς και τις προοπτικές σύζευξής της με σύγχρονες τεχνολογίες όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση	N

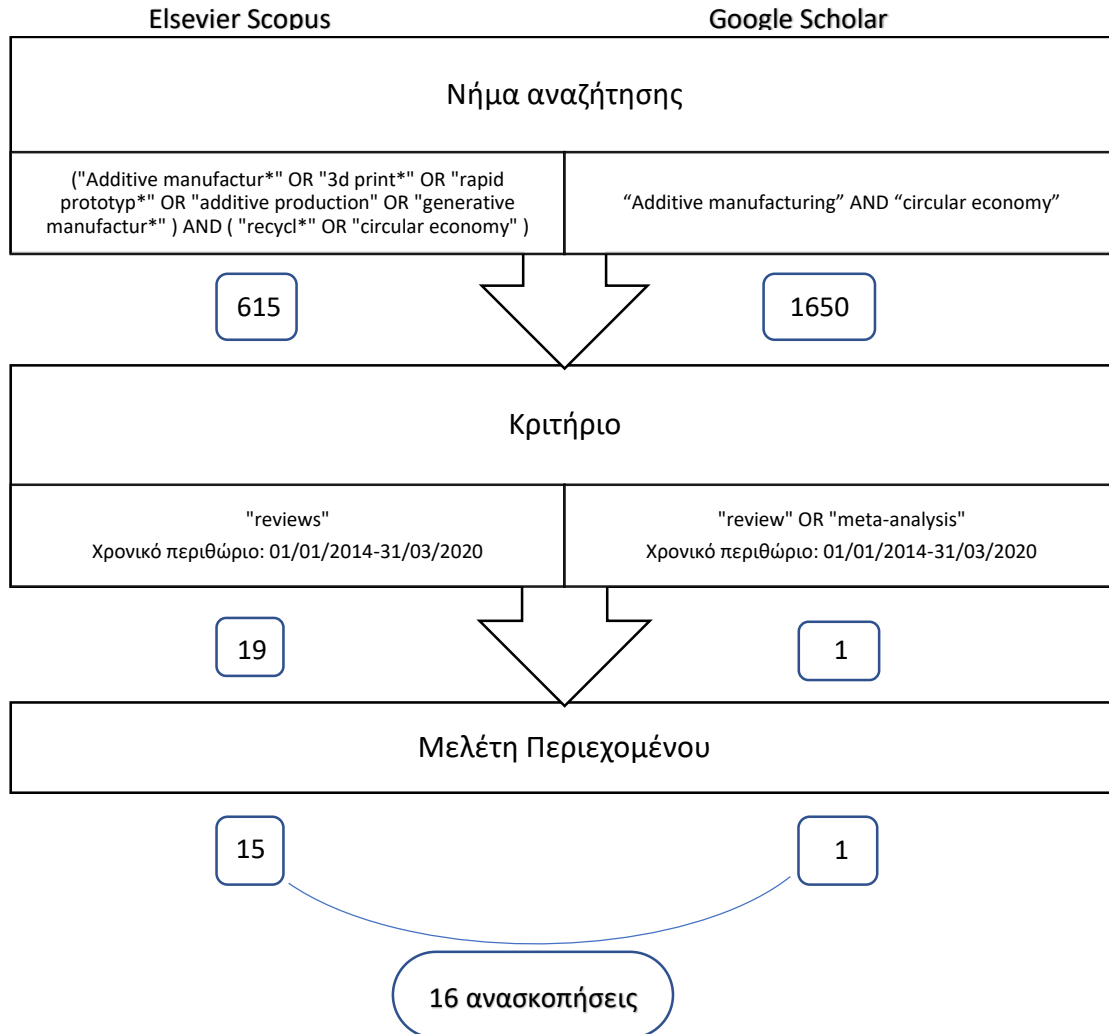
Προκειμένου να επιτευχθεί η πληρότητα και η αξιοπιστία της ποιότητας της παρούσας μελέτης των ήδη υπαρχόντων βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων, εκτός από αναζήτηση στην βιβλιογραφική βάση δεδομένων ELSEVIER Scopus, χρησιμοποιήθηκε και η μηχανή αναζήτησης Google Scholar. Λόγω του ότι αποφέρει πληθώρα καταχωρήσεων και το πλήθος τους είναι μη διαχειρίσιμο, έπρεπε να επιλεγεί με μεγαλύτερη προσοχή το νήμα αναζήτησης, προκειμένου να αποφευχθεί όσο γίνεται περισσότερο ο θόρυβος των αποτελεσμάτων. Έτσι, η αναζήτηση περιορίστηκε αυστηρά στο **“Additive manufacturing” AND “circular economy”**, για την χρονική περίοδο 2014 έως 2020, με την αναζήτηση των συγκεκριμένων όρων να γίνεται μόνο στον τίτλο. Επίσης, τα αποτελέσματα φιλτραρίστηκαν με τους όρους “review” ή “meta-analysis”, και εν τέλει βρέθηκαν δύο επιπλέον καταχωρήσεις. Η ανασκόπηση με τίτλο «Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy», των Sanchez et al., δυστυχώς απορρίφθηκε, καθώς δημοσιεύθηκε στις 15/04/2020, και βρίσκεται εκτός του προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος μελέτης. Η δεύτερη ανασκόπηση, με τίτλο «Analysis of the Application of Additive Manufacturing in the Circular Economy: An Integrative Literature Review» των Betim et al., ανήκει στην κατηγορία των πρακτικών συνεδρίων, και ούσα δημοσιευμένη στις 15/10/2019, είναι αποδεκτή για τη μελέτη.

Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί, παραθέτονται συνοπτικώς οι κύριες λεπτομέρειες των αποτελεσμάτων που επέστρεψε η μηχανή αναζήτησης Google Scholar, με την τελευταία στήλη να υποδηλώνει αν θεωρήθηκαν αποδεκτές ή όχι.

Πίνακας 3- 2: Σύνοψη των βασικών πληροφοριών των βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων από την μηχανή αναζήτησης Google Scholar, την χρονική περίοδο 01/01/2014 – 31/03/2020

Συγγραφείς και Χρονολογία	Τίτλος	Αριθμός παραπομπών	Επίκεντρο της μελέτης	Αποδεκτή μελέτη (Ναι/Όχι)
Sanchez et al., 2020	Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy	0	Η έρευνα καλείται να εξετάσει τις τρέχουσες εξελίξεις στον τομέα της ανακύκλωσης θερμοπλαστικών υλικών, μέσω των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής.	O

Συνολικά λοιπόν, πραγματοποιούνται δεκαέξι (16) βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις. Συνοπτικά σκιαγραφείται η μέθοδος στο Σχήμα 3-1 που ακολουθεί.



Σχήμα 3- 1: Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων

3.2 Ομαδοποίηση

Στη συνέχεια, θα γίνει μία προσπάθεια για την κατηγοριοποίηση των δεκαέξι ερευνών που κρίθηκαν αποδεχτές και πρόκειται να αναλυθούν. Η ομαδοποίηση θα γίνει με δύο τρόπους, αρχικά σύμφωνα με το περιεχόμενό τους (υποενότητα 3.2.1), και έπειτα βάσει της μεθόδου διάρθρωσης και κατηγορία ανασκόπησης που έχει επιλεγεί (υποενότητα 3.2.2). Περαιτέρω ομαδοποίηση με άλλα κριτήρια, όπως για παράδειγμα ανάλογα το έτος δημοσίευσης, δεν κρίθηκε σκόπιμο διότι ο

τομέας της Προσθετικής Παραγωγής είναι μία πρόσφατα αναδυόμενη τεχνολογία, και εκ των πραγμάτων δεν θα προσέφερε ιδιαίτερη πληροφορία μία τέτοια κατηγοριοποίηση.

3.2.1. Ομαδοποίηση κατά περιεχόμενο

Έπειτα από εκτενή μελέτη, και πάντα σύμφωνα με τη γνώμη του συγγραφέα αυτής της έρευνας, οι μελέτες αυτές μπορούν να χωρισθούν σε πέντε κατηγορίες ενδιαφέροντος, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

1) Συγκεκριμένη Μέθοδος Προσθετικής Κατασκευής. Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσονται οι μελέτες που εξειδικεύονται σε μία συγκεκριμένη τεχνική προσθετικής κατασκευής

2) Βιωσιμότητα. Στο πλαίσιο της βιωσιμότητας, έχουν ενοποιηθεί δύο κατηγορίες που θα μπορούσαν να αναφερθούν και ξεχωριστά: ανακύκλωση (recycle) και ανακατασκευή (remanufacture). Καθώς όμως αυτές οι δύο έννοιες έχουν πολλά κοινά, και στοχεύουν ουσιαστικά στο ίδιο επίτευγμα, δηλαδή μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή με ελαχιστοποίηση χρήσης καινούριων πόρων και πρώτων υλών, κρίθηκε θεμιτό να αποτελέσουν μία ενιαία κατηγορία.

3) Υλικά και Ιδιότητες. Στην ομάδα αυτή συγκαταλέγονται οι μελέτες που στόχευσαν την έρευνα τους σε συγκεκριμένα υλικά και τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και το πως επηρεάζονται και επηρεάζουν την σύγχρονη τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

4) Ψηφιοποίηση – Βιομηχανία 4.0. Στην εν λόγω κατηγορία γίνεται λόγος για τις μελέτες που έδωσαν ιδιαίτερη βαρύτητα στον εκσυγχρονισμό των συμβατικών διαδικασιών όχι μόνο στο πλαίσιο της Προσθετικής Κατασκευής, αλλά και στην ανάγκη για γενική ψηφιοποίηση των διεργασιών, με τεχνολογίες RFID, IoT, big data analytics, cloud computing, artificial intelligence και άλλα.

5) Πρακτικές Εφαρμογές. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι κάποιες έρευνες ενασχολήθηκαν με συγκεκριμένες μελέτες περίπτωσης και με πειραματικές εφαρμογές, δίνοντας ποσοτικά αποτελέσματα και πρακτικά συμπεράσματα στην βιβλιογραφία.

Είναι φυσικό οι μελέτες να μην ασχολούνται μονόπλευρα με ένα μόνο ζήτημα, αλλά να ανήκουν σε παραπάνω από μία κατηγορίες σύμφωνα με το περιεχόμενό τους. Στον Πίνακα 3-3 που ακολουθεί, φαίνεται σχηματικά αυτή η κατηγοριοποίηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η βιβλιογραφική ανασκόπηση των Betim et al., 2019, δεν έχει συμπεριληφθεί στην εν λόγω κατηγοριοποίηση, λόγω του ότι δεν προσφέρει καινούρια πληροφορία παρά εξίσου συγκεντρώνει και αναλύει τις ήδη υπάρχουσες πηγές στην βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο θέμα.

Πίνακας 3- 3: Ομαδοποίηση των αποδεκτών βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων σε πέντε θεματικούς άξονες

Συγγραφείς & Χρονολογία	Συγκεκριμένη Μέθοδος	Βιωσιμότητα	Υλικά και Ιδιότητες	Ψηφιοποίηση - Βιομηχανία 4.0	Πρακτικές Εφαρμογές
Kumar et al., 2020		X			X
Santecchia et al., 2020	X	X	X		

Sibisi et al., 2020	X		X		
Wang et al., 2020			X		
Daraban et al., 2019		X	X	X	
Nascimento et al., 2019		X		X	
Rahito et al., 2019		X			
Saboori et al., 2019	X	X			
Gama et al., 2018			X		
Navarro et al., 2018		X			X
Peng et al., 2018		X		X	
Singh et al., 2017		X			
Walsh and Ponce de León, 2018					X
Tan et al., 2017	X	X	X		
Yang et al., 2014					X
# Δημοσιεύσεων	4	10	6	3	4
%	25%	62,5%	37,5%	18,75%	25%

3.2.2. Ομαδοποίηση κατά τύπο ανασκόπησης

Για τον προσδιορισμό της κατηγορίας στην οποία συγκαταλέγεται καθένα από τα δεκαέξι έγγραφα σχετικά με το είδος της ανασκόπησης τους, κλήθηκε η βοήθεια της μηχανής αναζήτησης Google Scholar. Με νήμα αναζήτησης «Type of reviews», βρέθηκε η καταχώρηση «A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies» των Grant and Booth, 2009. Έπειτα από εκτενή μελέτη, κρίθηκε πως πέντε από τις δεκατέσσερις κατηγορίες είναι εκείνες που ικανοποιούν και τα δεκαέξι αρχεία: Συστημική (systematic) ανασκόπηση, Ποιοτική (qualitative) ανασκόπηση, Αφηγηματική (narrative) ανασκόπηση, Ποσοτική (quantitative) ανασκόπηση, Συνδυασμός (mixed methods). Αναλυτικότερα:

1) Συστημική ανασκόπηση. Πρόκειται για ένα εγχείρημα κατά το οποίο συλλέγονται εμπειρικά στοιχεία έπειτα από εκτενή αναζήτηση, σύμφωνα με περιορισμούς και κριτήρια απόρριψης ή αποδοχής, ούτως ώστε να απαντηθεί μία συγκεκριμένη ερευνητική ερώτηση. Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσεται και η κατηγορία “integrative review” καθώς συχνά στην βιβλιογραφία αναφέρονται ως παρεμφερείς.

2) Ποιοτική ανασκόπηση. Αφορά έρευνες σύνθεσης πληροφοριών/στοιχείων από εξίσου ποιοτικές ανασκοπήσεις, για την ανάπτυξη ενός ζητήματος χωρίς αριθμητική - ποσοτική

προσέγγιση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, διαπιστώθηκε πως όσες ανασκοπήσεις είναι αφηγηματικές (δηλαδή συνοψίζουν τι έχει γραφτεί στην βιβλιογραφία επί του θέματος και προτείνουν κατευθυντήριες ιδέες για την αποκωδικοποίηση σύνθετων εννοιών και τη δόμηση αδόμητων ερευνητικών περιοχών), είναι ταυτόχρονα και ποιοτικές.

3) Ποσοτική ανασκόπηση. Μία ποσοτική ανασκόπηση συνδυάζει αποτελέσματα άλλων ποσοτικών μελετών, προσεγγίζοντας το εκάστοτε ζήτημα με μία πιο πρακτική σκοπιά με τη βοήθεια αριθμητικών υπολογισμών και αποτελεσμάτων.

4) Συνδυασμός μεθόδων. Ουσιαστικά πρόκειται για μελέτες που συνδυάζουν τόσο την ποιοτική όσο και την ποσοτική θεώρηση ενός θέματος, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα και θεωρητικά και υπολογιστικά στοιχεία.

Στον Πίνακα 3-4 που ακολουθεί, παρατίθεται αναλυτικά η κατηγοριοποίηση ανάλογα με το είδος της ανασκόπησης, σύμφωνα με τις κατηγορίες που προαναφέρθηκαν από τους Grant and Booth, 2009. Αξίζει να τονισθεί ξανά πως η κατηγορία ποιοτική και αφηγηματική ανασκόπηση, έχουν ενσωματωθεί σε μία.

Πίνακας 3- 4: Η ομαδοποίηση των αποδεκτών ανασκοπήσεων ανάλογα με το είδος της ανασκόπησης, σύμφωνα με τη θεωρία των Grant and Booth, 2009

Συγγραφείς & Χρονολογία	Συστημική	Ποιοτική - Αφηγηματική	Ποσοτική	Συνδυασμός
Daraban et al., 2019		X		
Rahito et al., 2019	X			
Yang et al., 2014			X	
Tan et al., 2017			X	
Saboori et al., 2019		X		
Nascimento et al., 2019	X			
Wang et al., 2020			X	
Santecchia et al., 2020		X		
Navarro et al., 2018				X
Gama et al., 2018				X
Kumar et al., 2020			X	
Walsh and Ponce de León, 2018			X	
Sibisi et al., 2020		X		
Peng et al., 2018		X		
Singh et al., 2017		X		
Betim et al., 2019	X			

# Δημοσιεύσεων	3	6	5	2
%	18,75%	37,5%	31,25%	12,5%

3.3 Συζήτηση

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει μία σύνοψη των πιο σημαντικών σημείων – συμπερασμάτων των υπαρχουσών ανασκοπήσεων στη βιβλιογραφία.

Στην έρευνα των Peng et al., 2018, μετά από μία σύντομη σύνοψη των κύριων μειονεκτημάτων της Προσθετικής Κατασκευής, δίνεται το υπόβαθρο των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την υιοθέτηση κατασκευαστικών μεθόδων προσθετικής φύσης, με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος. Το συμπέρασμα που εξάγεται, είναι πως τα αρνητικά χαρακτηριστικά που διέπουν την παραγωγή με προσθετικές μεθόδους είναι δυνατόν να εξαφανισθούν, να μειωθούν δραστηρικά, εφόσον οι βιομηχανίες υιοθετήσουν το πρότυπο της βιωσιμότητας. Στο τέλος της μελέτης, οι Peng et. al κατηγοριοποιούν τις ήδη υπάρχουσες μελέτες σχετικά με την Προσθετική Κατασκευή σε τέσσερις θεματικούς άξονες, ενώ έπειτα υπογραμμίζουν πέντε γκρίζες περιοχές της βιβλιογραφίας που χρήζουν περαιτέρω έρευνας. Εστιάζουν την προσοχή τους τόσο στην βιωσιμότητα και στην ανακύκλωση, όσο και στις «έξυπνες» και καινοτόμες εφαρμογές που μπορεί να παρέχει η Προσθετική Κατασκευή.

Οι Navarro et al., 2018 τονίζουν εξίσου την ανάγκη για μεταβολή σε ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας, με απαραίτητο βήμα τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas emissions) και τον εκσυγχρονισμό της διαδικασίας ανακύκλωσης διοξειδίου του άνθρακα. Σε αυτό συμβάλλει η εμφάνιση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία έχει οδηγήσει σε μία πληθώρα επιλογών για χρησιμοποιούμενα υλικά. Αυτές οι τεχνολογίες δίνουν ώθηση για στιβαρά μοντέλα προσομοίωσης, όπως η τρισδιάστατη μοντελοποίηση, που θα οδηγήσει σε βελτιστοποίηση νέων «έξυπνων» μηχανημάτων. Είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο, με πολλές προοπτικές σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, το οποίο αναμένεται να εξελιχθεί άμεσα στο κοντινό μέλλον.

Αυτό το κενό των «έξυπνων» διαδικασιών έρχεται να καλύψει η μελέτη των Nascimento et al., 2019, στην οποία προτείνεται ένα επιχειρηματικό μοντέλο για την ανακύκλωση αποβλήτων και παραγωγή νέων προϊόντων, στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0. Αναφέρεται πως η κουλτούρα της ανακύκλωσης μέσω Προσθετικής Κατασκευής στη Βιομηχανία 4.0, θα οδηγήσει στον αυτοματισμό των συμβατικών διαδικασιών. Επίσης, δίνεται μια ποιοτική προσέγγιση του ζητήματος, μέσω συνεντεύξεων με στελέχη διοίκησης, ερευνητές και καθηγητές σχετικούς με τον τομέα, προκειμένου να συλλεχθούν σχετικές πληροφορίες. Το δείγμα εμπειρογνομώνων αν και μικρό και απαγορευτικό για γενίκευση των αποτελεσμάτων, παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή επιχειρηματικών μοντέλων κυκλικής οικονομίας μέσω της Βιομηχανίας 4.0.

Οι Daraban et al., 2019 επίσης εντάσσουν στο πλαίσιο της ανασκόπησής τους την Βιομηχανία 4.0. Υποστηρίζουν πως υπάρχουν πολλές ευκαιρίες προς εκμετάλλευση σχετικά με την ψηφιοποίηση της Προσθετικής Κατασκευής. Τα ψηφιακά εργαλεία συνδυαζόμενα με τις αρχές της εκτεταμένης ωφέλιμης ζωής, συναρτήσει της αυτοματοποίησης συμβατικών διεργασιών, καθιστούν τη

βιωσιμότητα μιας σύγχρονης, «έξυπνης» παραγωγής μονόδρομο. Σχετικά με την δυνατότητα χρήσης υλικών με πολλαπλούς κύκλους ζωής, η συγκεκριμένη έρευνα εξετάζει μεθόδους ανακύκλωσης μεταλλικής πούδρας που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη καθώς και τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για υλικά από ανοξείδωτο ατσάλι και CoCr, ενώ αναφέρει και τα αποτελέσματα του σχετικού έργου στο Ινστιτούτο Έρευνας και Ανάπτυξης Μηχανικής και Τεχνικής Μέτρησης στη Ρουμανία.

Επίσης με την πρώτη ύλη σε μορφή πούδρας ασχολήθηκαν οι Santeccchia et al., 2020. Εκτός των άλλων, εξετάζεται η επαναχρησιμοποίηση πούδρας μετάλλου και το αντίκτυπο που έχει στη χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων αντικειμένων, κατά τη μέθοδο προσθετικής κατασκευής Laser Powder Bed Fusion. Ομοίως επικεντρώθηκαν και οι Tan et al., 2017. Στην συγκεκριμένη έρευνα εξετάζεται με ποσοτικά αποτελέσματα η επίδραση που έχει η κοκκομετρία της πούδρας ως πρώτη ύλη στην τελική απόδοση του κατασκευαζόμενου τεμαχίου μέσω της μεθόδου προσθετικής κατασκευής Selective Laser Melting. Την βιβλιογραφική τους ανασκόπηση κλείνουν πέντε κατευθυντήριες ιδέες για μελλοντική έρευνα σε πεδίο εκτός της κοκκομετρίας της πούδρας.

Την αξία της ανακύκλωσης της μεταλλικής σκόνης μέσω της Προσθετικής Κατασκευής υπογραμμίζει και η μελέτη των Sibisi et al., 2020. Η ανακύκλωση αυτής της πρώτης ύλης κρίνεται μία μέθοδος ενεργειακής απόδοσης, η οποία επιτυγχάνει την βέλτιστη χρήση υλικού. Επίσης, αναλύονται διαδικασίες προσθετικής κατασκευής με βάση το λέιζερ, με πολλές προοπτικές για τη βελτίωση της μηχανικής απόδοσης αλλά και του κόστους κατασκευής των κραμάτων τιτανίου, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές. Η χρήση πιο ελαφρών υλικών για πεδία όπως η αεροδιαστημική, έχει άμεσο αντίκτυπο στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου άρα μειώνεται και η αρνητική επίδραση της βιομηχανίας στο περιβάλλον.

Συνεχίζοντας στις πιο πρακτικές προσεγγίσεις του ζητήματος, στην έρευνα των Kumar et al., 2020, παραθέτονται τέσσερις διαφορετικές μελέτες περίπτωσης, για τα τέσσερα διαφορετικά είδη ανακύκλωσης (1°, 2°, 3°, 4°). Μέσω αυτών των τεσσάρων διαφορετικών «πειραμάτων» γεφυρώνονται τα κενά μεταξύ της θεωρίας και της πραγματικής βιομηχανικής εφαρμογής αυτών των τεχνικών, με χαμηλού κόστους μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής. Τα πιο βασικά συμπεράσματα που εξάγονται είναι: 1) η τεχνική εξώθησης πολυμερούς είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες μεθόδους ανακύκλωσης θερμοπλαστικών, 2) αν τα βιομηχανικά πλαστικά στερεά απόβλητα χρησιμοποιηθούν ως ενίσχυση σε μεταλλικά ή όχι υλικά, ενισχύουν τις μηχανικές τους ιδιότητες 3) Η τελική χρήση πλαστικών στερεών αποβλήτων καθίσταται πολύ χρήσιμη στην προετοιμασία σύνθετων μεταλλικών πλεγμάτων.

Και πάλι στο πνεύμα των πρακτικών εφαρμογών, στην έρευνα των Yang et al., 2014, σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν με 3D printer σπирάλ λεπτά «νήματα», τα οποία δύνανται να ισιωθούν και έπειτα να θερμανθούν για να ανακτήσουν το σχήμα τους. Με τον τρόπο αυτό, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που είναι η customized παραγωγή εκμεταλλεύθηκε πλήρως, ενώ το μειονέκτημα που είναι το χρονοβόρο της διαδικασίας, ελαχιστοποιήθηκε διότι κατασκευάσθηκε απλά ένα πολύ λεπτό αντικείμενο.

Μία μελέτη περίπτωσης εξετάζεται και από τους Singh et al., 2017, όπου με γνώμονα τη βιωσιμότητα, αναπτύσσεται ένα case study στον αεροδιαστημικό τομέα με ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ομοίως με ανασκοπήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και σε αυτή την ανασκόπηση τονίζεται η ανάγκη για πιο εξελιγμένες μεθόδους και ψηφιακές τεχνολογίες (sensors,

big data analytics, IoT, τεχνητή νοημοσύνη), σε συνδυασμό πάντα και με την Προσθετική Κατασκευή. Κλείνοντας, εξάγεται το συμπέρασμα πως στην πορεία για την υιοθέτηση ενός μοντέλου πλήρως Zero Waste Manufacturing συμβάλλει καθοριστικά η Προσθετική Κατασκευή, κατά την οποία αντικείμενα παράγονται απευθείας μέσω ενός ψηφιακού τρισδιάστατου σχεδιασμού. Δίνονται επίσης τρία κατευθυντήρια μονοπάτια που εκλείπουν ικανοποιητικής ανάλυσης, συγκεκριμένα 1) αν επαρκούν τα υλικά που συμβαδίζουν με την Προσθετική Κατασκευή για να καλυφθεί πλήρως το σύνολο των μηχανικών εφαρμογών 2) αν η Προσθετική Κατασκευή είναι πραγματικά και εξολοκλήρου Zero Waste Manufacturing τεχνολογία 3) αν είναι δυνατό η Προσθετική Κατασκευή να ικανοποιήσει όλη τη ζήτηση των γραμμών παραγωγής.

Αρκετές έρευνες εξέτασαν το πεδίο της Προσθετικής Κατασκευής από τη σκοπιά των προοπτικών της στην επισκευή και επιδιόρθωση. Οι Rahito et al., 2019 εστίασαν στη σημασία του σχεδιασμού των αντικειμένων με γνώμονα τη δυνατότητα επιδιόρθωσης και αποκατάστασης τους στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Αναφέρουν πως η ανάπτυξη τεχνολογιών όπως η Προσθετική Κατασκευή, αναπόφευκτα θα οδηγήσει στην εφαρμογή αυτόματης και ψηφιοποιημένης ανακατασκευής, συνεισφέροντας ταυτόχρονα και στην Κυκλική Οικονομία. Έτσι, συμπεραίνουν πως είναι απαραίτητο να εξελιχθεί τεχνολογικά ο σχεδιασμός, ειδικότερα σε μία μορφή μεγάλης ακρίβειας και με συγκεκριμένα προαπαιτούμενα για την αποκατάσταση προϊόντων στο τέλος της ζωής τους χρησιμοποιώντας τεχνολογίες κατασκευής προσθετικής φύσης.

Στο ίδιο πλαίσιο κυμαίνεται και η μελέτη των Sabori et al., 2019, όπου υπογραμμίζεται εξίσου η αξία των μεθόδων Προσθετικής Κατασκευής, και ονομαστικά η τεχνική Direct Energy Deposition (DED), στην επισκευή εξαρτημάτων αφότου έχουν αστοχήσει. Συνοψίζοντας, η επισκευή ακριβών ανταλλακτικών, συχνά και σύνθετης γεωμετρίας μέσω της μεθόδου DED εξοικονομεί χρόνο και χρήμα, γεγονός από το οποίο επωφελούνται τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική. Στο τέλος της έρευνας τους, οι Sabori et al. επισημαίνουν ωστόσο πως αυτή η τεχνολογία δεν είναι ακόμα αρκετά ώριμη όσον αφορά στην επιδιόρθωση εξαρτημάτων και δεν υπάρχει κάποιο τεχνικά εγκεκριμένο εγχειρίδιο, γι' αυτό μελλοντικά είναι απαραίτητο να εδραιωθεί μία στάνταρντ διαδικασία για την επισκευή ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν.

Οι υπόλοιπες τρεις έρευνες, δεν είχαν τόσο άμεση σύνδεση με το κομμάτι της Προσθετικής Κατασκευής, εκτός από λίγες αναφορές στη συγκεκριμένη τεχνική, κάθε φορά και στο εκάστοτε πλαίσιο μελέτης. Δεν κρίθηκαν απορριπτές για λόγους πληρότητας της παρούσας ανασκόπησης, και έτσι στην συνέχεια θα ακολουθήσει μία σύντομη αναφορά των σημείων τομής τους με την τρισδιάστατη εκτύπωση.

Οι Wang et al., 2019, ασχολούνται με την διαδικασία ανάδευσης τριβής (Friction Stir Processing – FSP), μια διαδικασία έντονης πλαστικής παραμόρφωσης, με πολλά πλεονεκτήματα στην αναδιαμόρφωση της δομής χυτών, προσφέροντας έτσι προοπτικές στην τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής. Η έρευνα αναφέρει πως η διαδικασία «FSP - Additive Manufacturing» με υλικό τα κράματα μαγνησίου είναι ακόμα σχετικά μη-ώριμη διότι αναδύονται αρκετά μειονεκτήματα. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη μία έρευνα εξειδικευμένη στη σχέση μεταξύ του σχεδιασμού, της μικροδομής, των ιδιοτήτων και των παραμέτρων της διαδικασίας, καθώς και η ανάπτυξη εξοπλισμού για την «FSP - Additive Manufacturing» και την μηχανική εφαρμογή της.

Οι Gama et al., 2018 αναφέρουν πως λόγω της ανάγκης για νέα υλικά πρώτης ύλης καθώς και την ανάπτυξη προϊόντων με περίπλοκα σχήματα και διαστάσεις, έχουν εμφανισθεί νέες τεχνολογίες

όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση, κατά την οποία χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά (πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά) και εφαρμόζεται σε μεγάλο πλήθος δραστηριοτήτων (βιοϊατρική, αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, αρχιτεκτονική και λοιπά). Συμπεραίνουν πως αυτή η πρόσφατα αναδυόμενη μέθοδος ίσως αποδειχθεί απειλή για την εδραιωμένη τεχνολογία των αφρών πολυαιθανίου, καθώς οι καταναλωτές πλέον στρέφονται σε ανανεώσιμες πρώτες ύλες, και όχι σε πλαστικά με βάση το πετρέλαιο.

Τέλος, οι Walsh and Ponce de León, 2018 στο πλαίσιο των ηλεκτροχημικών αντιδραστήρων, αντιμετωπίζουν την τρισδιάστατη εκτύπωση ως μια αποδοτική, γρήγορη και ευέλικτη μέθοδο παραγωγής. Το κύριο πλεονέκτημα τους έγκειται στη δυνατότητα ενσωμάτωσης των εξαρτημάτων ενός ηλεκτροχημικού αντιδραστήρα με τρόπο φιλικό προς το σχεδιασμό και συμβατό με λογισμικό. Η τρισδιάστατη εκτύπωση συνήθως είναι εξοπλισμένη με μεταλλικά, κεραμικά και σύνθετα τροφοδοτικά μαζί με υλικά ηλεκτροδίων νανοδομής, αντί για απλή τροφοδοσία σκέτου πολυμερούς.

Έμεινε μία τελευταία έρευνα που δεν έχει ακόμα συζητηθεί, και κρίθηκε σκόπιμο να αφηθεί για το τέλος καθότι ακολουθεί μία διαφορετική φιλοσοφία από προαναφερθείσες. Πρόκειται για την ανασκόπηση των Betim et al., 2019: Analysis of the Application of Additive Manufacturing in the Circular Economy: An Integrative Literature Review. Η συγκεκριμένη ανασκόπηση αποτελεί επίσης έναν οδηγό συγκέντρωσης και ταξινόμησης της ήδη υπάρχουσας βιβλιογραφίας πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα, όπως ακριβώς επιχείρησε να φέρει εις πέρας και η τρέχουσα υποενότητα. Τα αποτελέσματα είναι, εννέα δημοσιεύσεις ομαδοποιημένες σε τέσσερις θεματικούς άξονες: βιοϋλικά, σχεδιασμός, ανακατασκευή, ανακύκλωση. Μετά την σύντομη ανάλυση τους, οι συγγραφείς προτείνουν για μελλοντική έρευνα που να εστιάζει στον καθορισμό ενός πυρήνα κατευθυντήριων γραμμών για κάθε περιοχή που συνδέεται με την Κυκλική Οικονομία καθώς και τις διαδικασίες για μια βιώσιμη Προσθετική Κατασκευή.

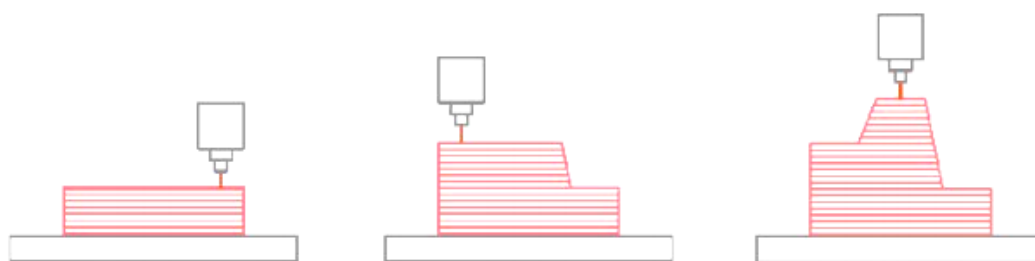
4. Εισαγωγή στην Προσθετική Κατασκευή

Η συγκεκριμένη ενότητα στοχεύει στο να θέσει το κατάλληλο υπόβαθρο γνώσεων περί της Προσθετικής Κατασκευής που χρειάζεται να εξοικειωθεί ο αναγνώστης. Αποδομώντας την ενότητα, στο 4.1 παραθέτονται οι βασικές μεθοδολογίες της Προσθετικής Κατασκευής, οι υποκατηγορίες και οι βασικές αξίες λειτουργίας τους, ενώ στο 4.2 επεξηγούνται λεπτομερώς τα βασικά υλικά που είναι συμβατά με την Προσθετική Κατασκευή και οι ιδιότητες τους.

4.1. Μεθοδολογίες

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την τρισδιάστατη εκτύπωση σύμφωνα με την μελέτη των Behm et al. (2018), αποτελείται από τα εξής βήματα:

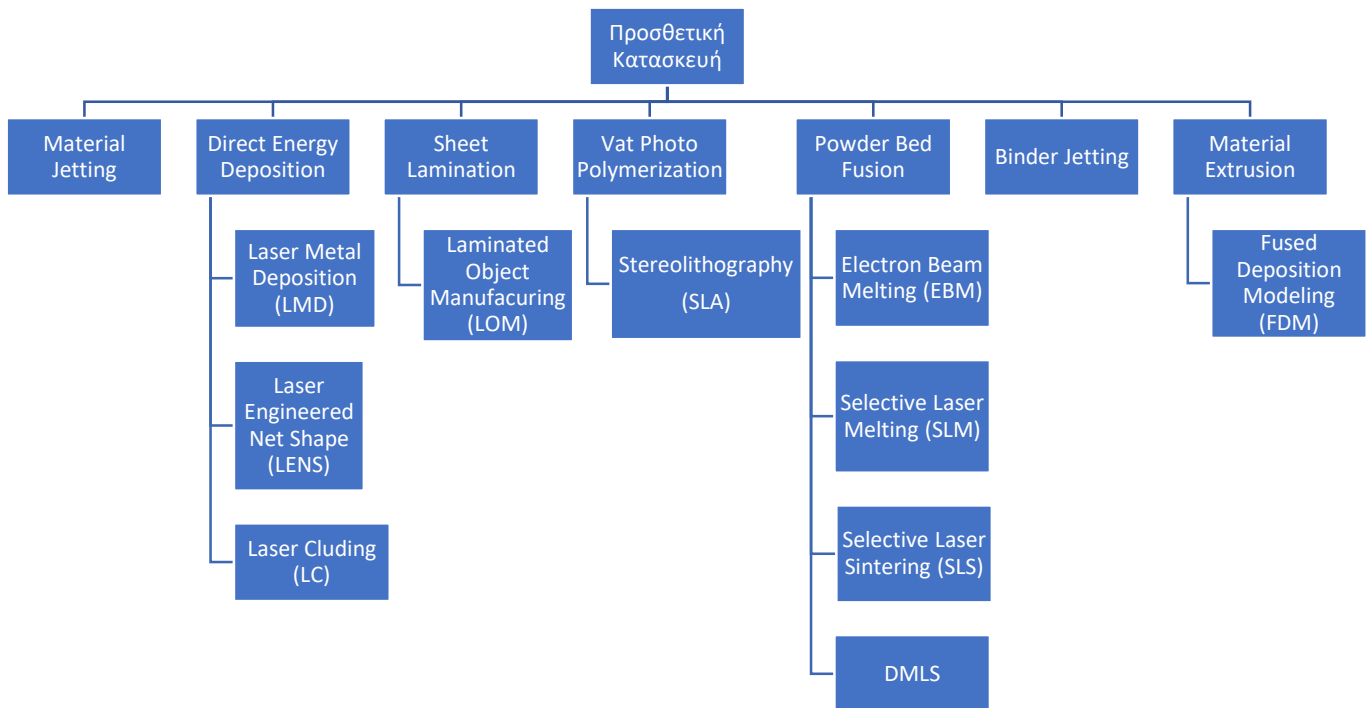
- 1) Δημιουργία ενός ψηφιακού, τρισδιάστατου αρχείου για εκτύπωση
- 2) Επιλογή εκτυπωτή και υλικού. Ορισμένοι παράγοντες για το βήμα αυτό είναι το κόστος, η αντοχή του υλικού, η ποιότητα της επιφανείας, και ο χρόνος εκτύπωσης
- 3) Αφότου πραγματοποιηθεί μια δοκιμαστική εκτύπωση και όλα ελεγχθούν καλώς, πραγματοποιείται η τελική εκτύπωση
- 4) Μετά την εκτύπωση, μία σειρά διεργασιών μετά-επεξεργασίας είναι πιθανό να χρειάζεται, όπως αφαίρεση περιττού υλικού, βαφή, προσθήκη πηλού ή / και συναρμολόγηση κομματιών



Σχήμα 4- 1: Απλοποιημένο σκαρίφημα της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, υιοθετημένη από τους Ujjeniia and Rachchh (2019)

Οι τεχνικές προσθετικής κατασκευής μπορούν να ταξινομηθούν σε επτά κατηγορίες ανάλογα τον τύπο της τεχνολογίας (Pavlo et al., 2018).

Σύμφωνα με το ISO/ASTM52900-15, ορίζονται επτά (7) τύποι προσθετικής κατασκευής, με κριτήριο την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή, ονομαστικά: (1) Binder jetting, (2) Direct energy deposition, (3) Material extrusion, (4) Material jetting, (5) Powder bed fusion, (6) Sheet lamination, (7) Vat Photo-polymerization (βλ. Σχήμα 4-2). Οι κύριες διαφορές ανάμεσα σε αυτές τις παραλλαγές της προσθετικής κατασκευής συναντώνται στα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται, στην αρχική τους μορφή καθώς και στην τεχνική με την οποία δημιουργείται το κάθε επίπεδο αλλά και ενώνεται με το επόμενο (Lahrour & Brissaud, 2018; Cholleti & Gibson 2018).



Σχήμα 4- 2: Οι 7 κατηγορίες της Προσθετικής Κατασκευής ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, κατά ISO/ASTM52900-15, υιοθετημένη από τους Damanhuri et al. (2019)

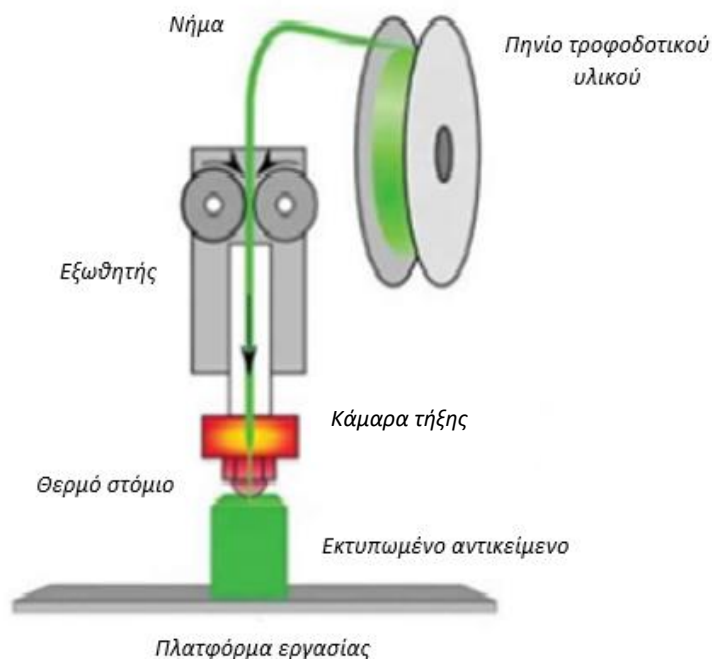
Στην συνέχεια ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή της κάθε τεχνικής και των υποκατηγοριών της.

Material extrusion – FDM / FFF

Η μέθοδος Material Extrusion, αποτελείται από άλλες δύο υποκατηγορίες, (1) Fused Filament Fabrication (FFF) ή αλλιώς Fused Deposition Modelling (FDM), και 2) 3D dispensing (Stolz & Mülhaupt, 2020). Θα αναλυθεί ωστόσο μόνο η πρώτη κατηγορία, ούσα από τις πιο ευρέως υιοθετημένες μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής που χρησιμοποιείται σε πληθώρα παραγωγικών διαδικασιών (Domingues et al., 2017).

Η τεχνική FDM είναι από τις πολλά υποσχόμενες τεχνικές της Προσθετικής Κατασκευής (Chacón et al., 2019). Ανακαλύφθηκε από τον Scott Crump στην εκπονή της δεκαετίας του '80 (Domingues et al., 2017), συγκεκριμένα το 1989 (Stolz & Mülhaupt, 2020). Θεωρείται μία από τις πιο γνωστές τεχνολογίες ΠΚ (Cunico et al., 2019; Chacón et al., 2019), και χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της μεγάλης ποικιλίας υλικών που καλύπτει αλλά και της διαθεσιμότητας απλού εξοπλισμού και φθηνών συστημάτων (Kumar & Czekanski, 2018) για την χρήση της (Kyziot et al., 2019 ; Pavlo et al., 2018). Επίσης, η πρώτη ύλη που απαιτείται είναι φθηνή, μη-τοξική και άοσμη, καθιστώντας την τεχνική αυτή ως την καταλληλότερη για ερασιτέχνες (Pavlo et al., 2018). Η FDM ξεκίνησε αρχικά ως τεχνολογία προτυποποίησης, πλέον όμως υιοθετείται για την παραγωγή τελικών εξαρτημάτων (Chacón et al., 2019). Είναι από τις πιο ταχείς μεθόδους, και μπορεί να δημιουργήσει τεμάχια μέσα σε λίγες μέρες, ενώ επίσης όπως όλες οι μέθοδοι ΠΚ διακατέχεται από πλήρη σχεδιαστική ελευθερία από άποψη σχήματος αντικειμένου και γεωμετρίας (Wu, 2019). Πρόκειται για μια εξαιρετικά ευέλικτη τεχνολογία (Domingues et al., 2017).

Η βασική λογική της μεθόδου είναι πως νήματα πολυμερούς τήκονται, εξωθούνται μέσω ενός θερμού στομίου (Kyziof et al., 2019 ; Peeters et al., 2019), και το ημι-λιωμένο υλικό εναποτίθεται σε μία πλατφόρμα (Kumar & Czekanski, 2018), ονομαζόμενη πλάκα βάσης ή κλίνη (Peeters et al., 2019), κατά τη ζητούμενη γεωμετρία (Stolz & Mühlaupt, 2020). Το ημι-λιωμένο υλικό κλειδώνει στο επίπεδο που εναποτίθεται, και ψύχεται ώστε να στερεοποιηθεί, και η διαδικασία συνεχίζει επίπεδο ανά επίπεδο (Kyziof et al., 2019) ώστε να δημιουργήσει το τρισδιάστατο αντικείμενο (Peeters et al., 2019 ; Wu, 2019 ; Lee et al., 2019).



Σχήμα 4-3: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Fused Deposition Modeling, υιοθετημένη από τους Kyziof et al. (2019)

Είναι μία έξυπνη τεχνολογία σχετικά με τα υλικά με τα οποία είναι συμβατή (Domingues et al., 2017). Ως υλικό δέχεται νήματα θερμοπλαστικού υλικού, με το πιο διάσημο να είναι το PLA (Pavio et al., 2018; Singh et al., 2018) και το ABS (Kumar & Czekanski, 2017), αλλά χρησιμοποιούνται και άλλοι τύποι πλαστικού όπως πολυανθρακικά, πολυαμίδια και πολυστυρένιο (Wu, 2019), συγκεκριμένα PP (πολυπροπυλένιο), PE (πολυαιθυλένιο) (Chacón et al., 2019), τереφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) (Peeters et al., 2019). Επίσης, θερμοπλαστικά με ενισχυμένη την μηχανική τους απόδοση (Chacón et al., 2019), που αποτελούνται από πληρωτικά, ίνες, και άλλα πρόσθετα (Peeters et al., 2019). Στην βιομηχανία, τα τυποποιημένα μεγέθη νήματος είναι διαμέτρου 1.75 ή 3 χιλιοστά, κατά κύριο λόγο για την μέθοδο FDM και με υλικό το θερμοπλαστικό. Τα σύνθετα υλικά και τα νήματα τους έχουν γίνει ένα από τα πιο συνηθισμένα υλικά σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (Singh et al., 2018).

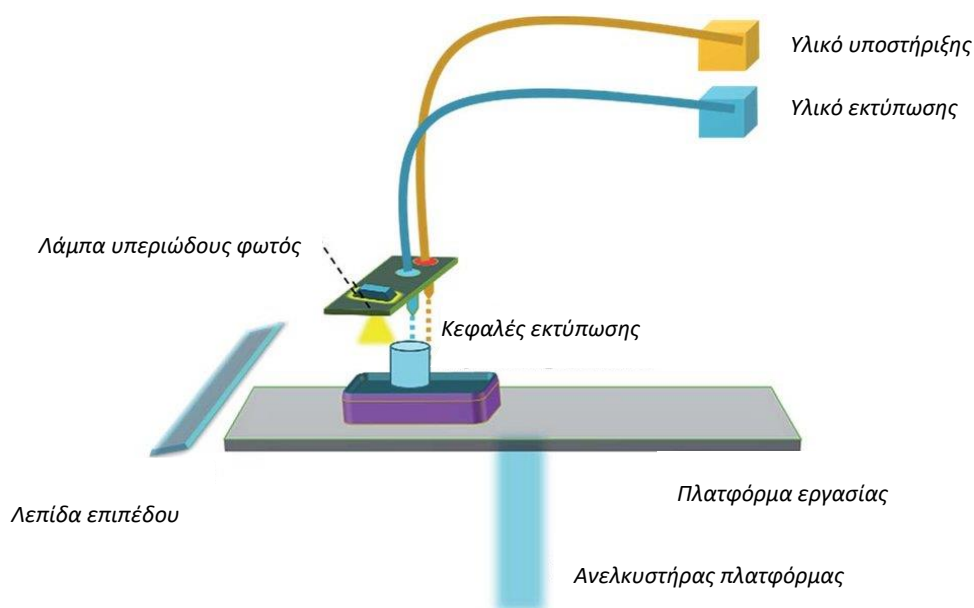
Πρόκειται για μία τεχνολογία προσθετικής φύσης, ωστόσο, όπως είναι λογικό, έχει και ορισμένους περιορισμούς (Domingues et al., 2017). Θεωρείται πως κατασκευάζει αντικείμενα με κακή ποιότητα επιφανείας, περιορίζοντας έτσι την εφαρμογή του σε χόμπι ή προτυποποίηση τεμαχίων (Cunico et al., 2019). Τα περισσότερα εκτυπωμένα πολυμερή αντικείμενα ακόμα χρησιμοποιούνται περισσότερο ως πρωτότυπα παρά ως λειτουργικά εξαρτήματα, διότι εκλείπουν αντοχής και λειτουργικότητας για πλήρως κανονικές συνθήκες εργασίας. Εκτός αυτού, τα

εξαρτήματα κατασκευαζόμενα μέσω FDM, συνήθως έχουν χαμηλότερες ελαστικές ιδιότητες σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά κατασκευασμένα αντικείμενα του ίδιου θερμοπλαστικού (Chacón et al., 2019). Ένα άλλο παράδειγμα είναι σε γεωμετρικές αντικειμένων που χρειάζονται περικοπές, απαιτούνται υποστηρικτικές δομές (Domingues et al., 2017). Ως αποτέλεσμα, οι επιφάνειες πάνω από την δομή υποστήριξης, έχουν σημάδια λόγω αυτής της στήριξης (Lecký et al., 2019). Είναι δυνατό, κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης, να συμβεί αποκόλληση στα σημεία ένωσης των στρώσεων, με αποτέλεσμα να σημειωθεί πρόωρη αστοχία (Chacón et al., 2019), ή το αποτέλεσμα να μην είναι καλαίσθητο λόγω του εμφανούς διαχωρισμού των επιπέδων (Wu, 2019). Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι σχετικά φτωχές λόγω της θερμοπλαστικής ρητίνης που χρησιμοποιείται, αν και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων επεξεργασίας, όπως ο προσανατολισμός κατασκευής, το πάχος του στρώματος ή ο ρυθμός τροφοδοσίας, έχει διερευνηθεί για τη βελτίωση τους. Αυτά τα μειονεκτήματα δρουν ως κατασταλτικοί παράγοντες στην ευρεία υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον χώρο της βιομηχανίας, οδηγώντας στην παραγωγή πρωτοτύπων ως κυρίαρχη εφαρμογή (Chacón et al., 2019).

Καθώς η τεχνολογία έχει ωριμάσει την τελευταία δεκαετία, οι οικιακές μηχανές τύπου FFF (για παράδειγμα το MakerBot Replicator, το Ultimaker 3, το Prusa i3 και λοιπά) έχουν εμφανιστεί με πολύ φθηνότερο κόστος και μικρότερο μέγεθος. Ταυτόχρονα, μικρές μηχανές που έχουν σχεδιαστεί για να μετατρέπουν την πρώτη ύλη πολυμερούς σε νήμα για την προσθετική κατασκευή (λόγου χάριν το Filabot EX 2, το Filastruder, το FilaFab EX 350, το Noztek Pro και λοιπά) έχουν εμφανιστεί σε κλίμακα και κόστος κατάλληλο για ένα ατομική χρήση από τον εκάστοτε καταναλωτή. Η συνδυασμένη μείωση του κόστους και του μεγέθους τόσο των απαιτούμενων πρώτων υλών όσο και των εκτυπωτών FDM έχει ξεκλειδώσει οικονομικά βιώσιμες οδούς για κατανομημένα, ανακύκλωση αυτοχθόνων πολυμερών αποβλήτων (Hart et al., 2018). Σε αυτό το αποκεντρωμένο μοντέλο παραγωγής, γίνεται εκτενής ανάλυση στο κεφάλαιο 5.2.2.

Material Jetting

Η μέθοδος Material Jetting χρησιμοποιεί λεπτά ακροφύσια, για να ψεκάσει με ελεγχόμενο τρόπο ένα κολλώδες υλικό, ώστε να κολλήσει έπειτα πούδρα στο στερεό αντικείμενο και να διαμορφωθεί

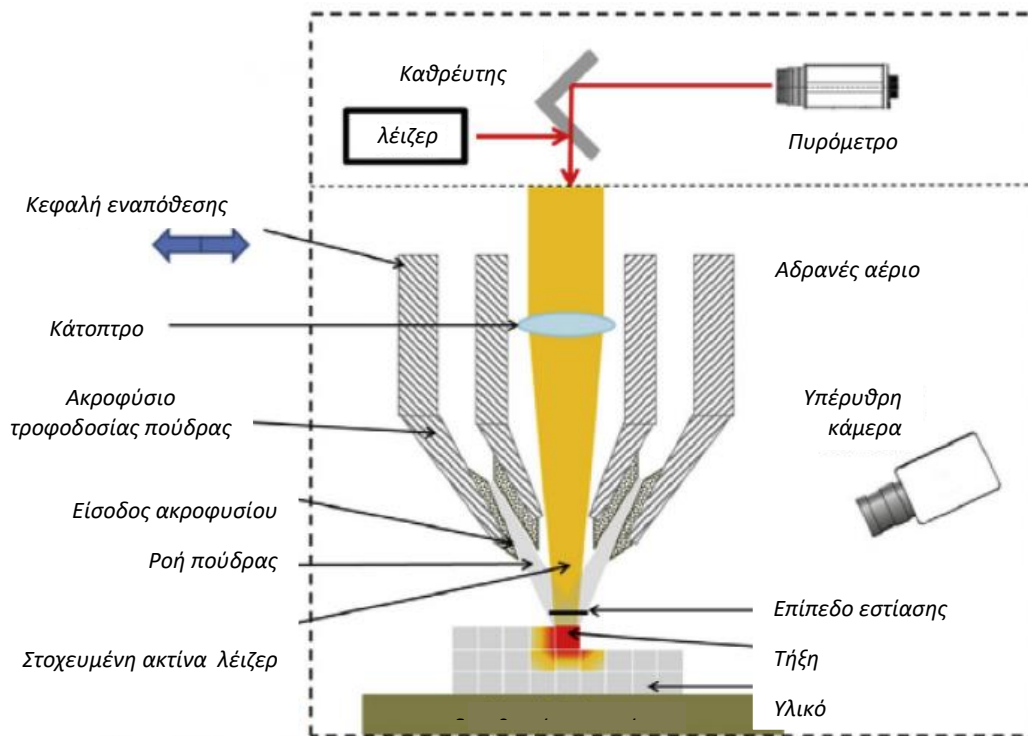


Σχήμα 4-4: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Material Jetting, υιοθετημένη από τους Sireesha et al. (2018)

το ζητούμενο αποτέλεσμα (Pavlo et al., 2018). Οι van Wijk & van Wijk (2015) αναφέρουν πως κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία, ένα υγρό φωτοπολυμερούς εκτοξεύεται με ακρίβεια και στη συνέχεια σκληραίνεται με υπεριώδες φως (βλ. Σχήμα 4-4). Τα στρώματα στοιβάζονται διαδοχικά. Στις μεθόδους Material Jetting, συνήθως το φινιρίσμα είναι ματ (Lecký et al., 2019).

Direct Energy Deposition (DED)

Το υλικό τροφοδοσίας σε αυτή τη μέθοδο είναι το μέταλλο, σε μορφή σύρματος (van Wijk & van Wijk, 2015) ή πούδρας και διαχέεται μέσω ενός στομίου (Sundqvist & Samarjy, 2019). Το υλικό έρχεται σε τήξη και εναποτίθεται σε επίπεδα κατά τη ζητούμενη γεωμετρία για να δημιουργηθεί το τελικό αντικείμενο (βλ. Σχήμα 4-5) (van Wijk & van Wijk, 2015). Η μέθοδος DED μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιδιόρθωση ή ανακατασκευή αντικειμένων (Sundqvist & Samarjy, 2019). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν εκτός των άλλων δύο τεχνικές, η Laser Engineered Net Shape (LENS) (Wilkinson & Cope, 2015) και η Electron Beam Direct Manufacturing (EDBM) (van Wijk & van Wijk, 2015).

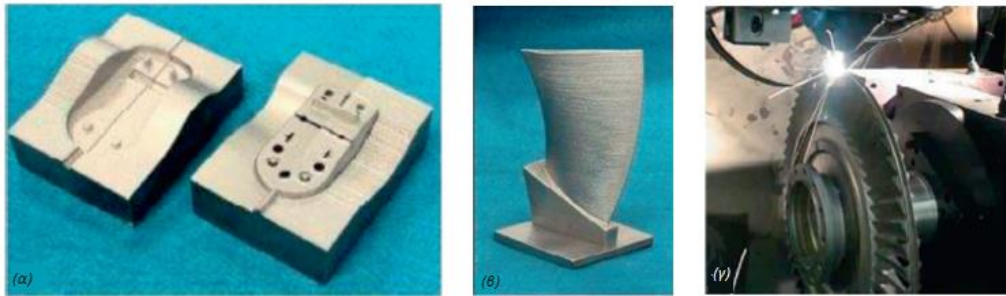


Σχήμα 4-5: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Direct Energy Deposition, υιοθετημένη από τους Le et al. (2018)

Η LENS χρησιμοποιεί μεταλλική πούδρα που τροφοδοτείται με *argon-shielded* λείζερ. Χειρίζεται μέσω ενός συστήματος πέντε αξόνων το οποίο μπορεί να τοποθετήσει διάφορα μέταλλα σε μία επιφάνεια, ή να δημιουργήσει εξολοκλήρου το μεταλλικό αντικείμενο και έπειτα να περαστεί από μηχανή κατεργασίας για το τελείωμα. Χρησιμοποιείται τόσο για την εκ νέου κατασκευή όσο και για την επιδιόρθωση εξαρτημάτων (βλ. Σχήμα 4-6) (Wilkinson & Cope, 2015).

Κατά τη διαδικασία EDBM, δέσμες ηλεκτρονίων παρέχουν την πηγή ενέργειας για την τήξη του μετάλλου, συνήθως σε μορφή σύρματος. Η δέσμη ηλεκτρονίων έχει πλήρως ακριβή εστίαση, λόγω του ότι χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ελέγχεται από τον υπολογιστή αλλά και την κινούμενη πλατφόρμα εργασίας, ώστε να δημιουργηθεί το αντικείμενο επίπεδο ανά επίπεδο.

Με αυτή την μέθοδο δημιουργούνται πολύ μεγάλα και ογκώδη αντικείμενα σε σχετικά γρήγορους ρυθμούς (van Wijk & van Wijk, 2015).



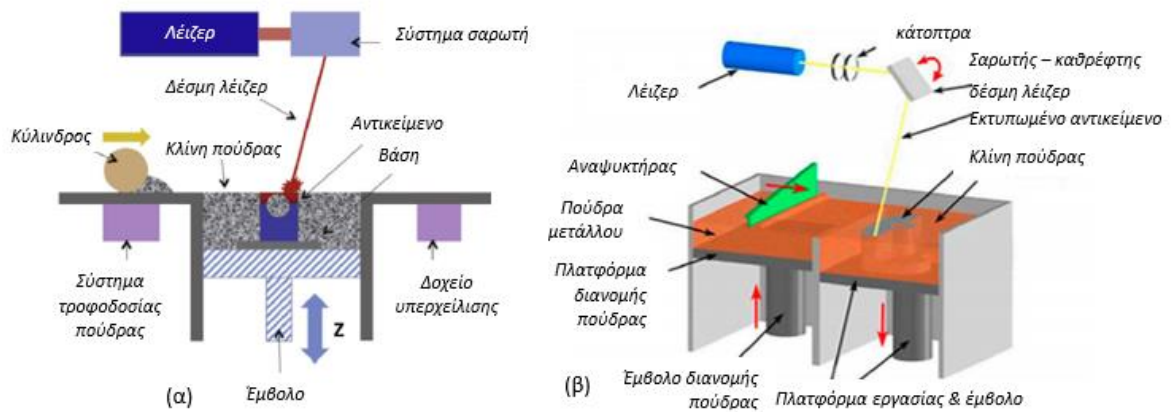
Σχήμα 4-6: Αντικείμενα μετά από τη μέθοδο LENS. (α): ζευγάρι από «μήτρες» (β) πτερύγιο στροβίλου (γ) συντήρηση στροβίλου Wilkinson & Cope (2015)

Powder Bed Fusion

Η Powder-bed fusion τεχνική ανήκει στις μεθόδους ΠΚ που επιλεκτικά λιώνουν και έπειτα στερεοποιούν επίπεδα πούδρας κατά τη προσδοκώμενη γεωμετρία για τον σχηματισμό των τρισδιάστατων εξαρτημάτων από ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα υπολογιστή (CAD) (Sutton et al., 2020). Στην συνέχεια θα αναλυθούν ορισμένες υποκατηγορίες της μεθόδου αυτής.

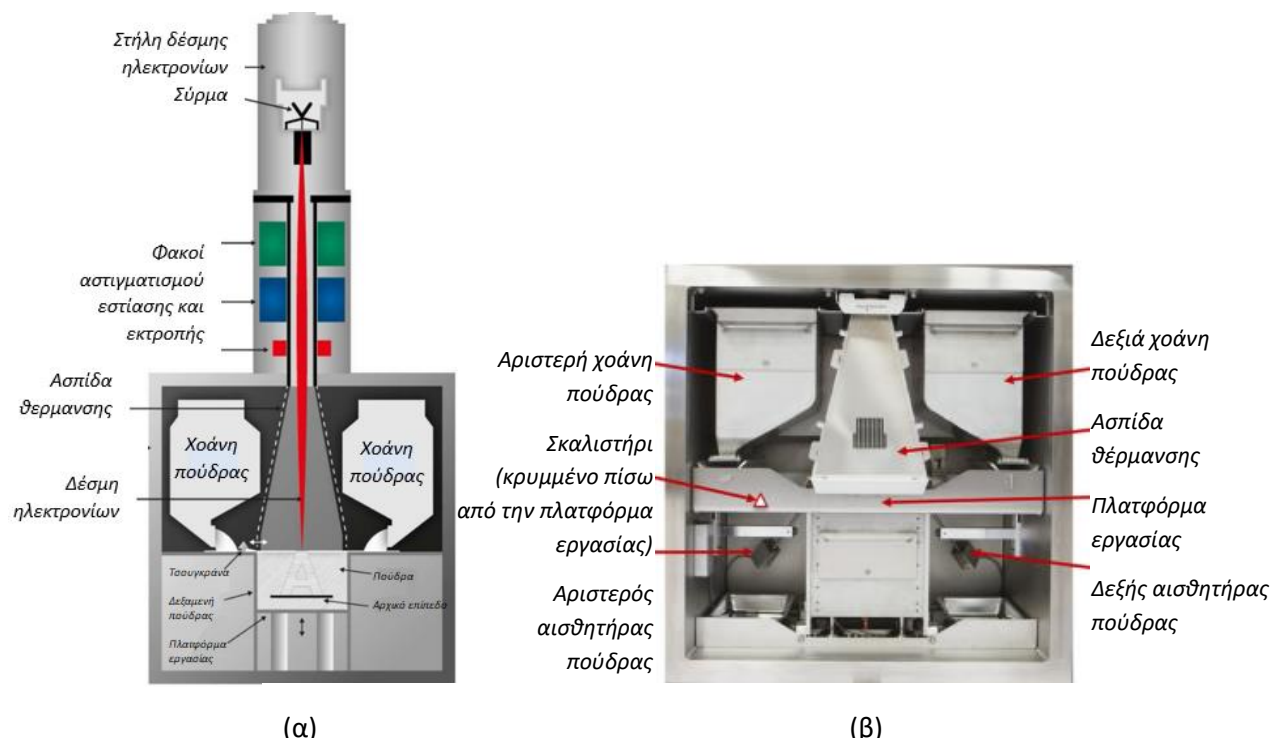
Ανάμεσα στις τεχνικές powder-bed fusion, είναι η Laser Powder-Bed Fusion (L-PBF) που συχνά ονομάζεται και Selective Laser Melting (Sutton et al., 2020 ; Sundqvist & Samarjy, 2019), ή LBM (Zarico et al., 2019). Αυτή η μέθοδος είναι η πιο δημοφιλής και ευρέως χρησιμοποιούμενη για την κατασκευή μεταλλικών, λειτουργικών εξαρτημάτων με περίπλοκη γεωμετρία (Santecchia et al., 2020 ; Ahmed et al., 2020). Στη μέθοδο αυτή, σωματίδια συγχωνεύονται μαζί με τη βοήθεια του λέιζερ (Sutton et al., 2020). Ο απαιτούμενος εξοπλισμός περιλαμβάνει ένα σύστημα τροφοδοσίας του υλικού, στην περίπτωση αυτή πούδρα μετάλλου, και την κάμαρα κατασκευής, όπου το αντικείμενο δημιουργείται ανά επίπεδα, με τη βοήθεια υψηλής ενέργειας λέιζερ που επιλεκτικά λιώνει την πούδρα σύμφωνα με τη δοθείσα γεωμετρία σχήματος από το σχεδιαστικό μοντέλο στο CAD (Santecchia et al., 2020). Συγκεκριμένα, ένα στρώμα πούδρας αρχικά απλώνεται και έπειτα η δέσμη λέιζερ σαρώνει επιλεκτικά την επιφάνεια για την στοχευμένη τήξη του υλικού κατά το ζητούμενο σχήμα (Ahmed et al., 2020 ; Antonov et al., 2019). Αφού επιτευχθεί το δισδιάστατο σχήμα στις δοθείσες διαστάσεις μήκους-πλάτους, η πλατφόρμα κατασκευής μπορεί και κατεβαίνει κατά ύψος για να επιτύχει το ζητούμενο πάχος κάθε «φέτας» που πρέπει να λιώσει, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ανά επίπεδο για την ολοκλήρωση του τελικού αντικειμένου (βλ. Σχήμα 4-7) (Santecchia et al., 2020). Μία συνεχής ροή αερίου – ασπίδας στην κάμαρα κατασκευής γύρω από το μηχάνημα, προστατεύει το υλικό από την οξείδωση κατά την τήξη (Lutter-Günther et al., 2018). Η SLM συνήθως χρησιμοποιείται για παραγωγή ανταλλακτικών εξαρτημάτων (Sundqvist & Samarjy, 2019).

Το υλικό τροφοδοσίας είναι μέταλλο και συνήθως σε μορφή πούδρας ή πολύ σπάνια σύρμα (Sundqvist & Samarjy, 2019). Χρησιμοποιείται μεγάλο εύρος μετάλλων όπως κράματα Ti ή Al, tool and stainless steels, Nickel-based super alloys, precious metals and others (Lutter-Günther et al., 2018). Οι πούδρες pre-alloy, όπως stainless steel, cobalt chromium, titanium alloy μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την παραγωγή λειτουργικών τεμαχίων σε αντίθεση με την κλασική χύτευση ή την μεταλλουργία της πούδρας. Τα χαρακτηριστικά ωστόσο της πούδρας είναι



Σχήμα 4-7: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου Laser Powder Bed Fusion (L-PBF ή SLM) υιοθετημένη από (α) Le et al. (2018) (β) Santecchia et al. (2020)

το κλειδί για την ποιότητα, τις ιδιότητες και την απόδοση του τελικού προϊόντος (Gong et al., 2018). Η διάμετρος των κόκκων της πούδρας συνήθως δεν ξεπερνά τα 70 μm, επιτυγχάνονται περίπλοκες γεωμετρίες με υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια. Επίσης είναι μια μέθοδος που δεν έχει μεγάλη ανάγκη για μετά-επεξεργασία, επομένως υιοθετείται ιδιαίτερος στις βιομηχανίες αεροναυπηγίας, αυτοκίνησης, και βιοϊατρικής (Sutton et al., 2020), για την κατασκευή τελικών προϊόντων (Lutter-Günther et al., 2018).

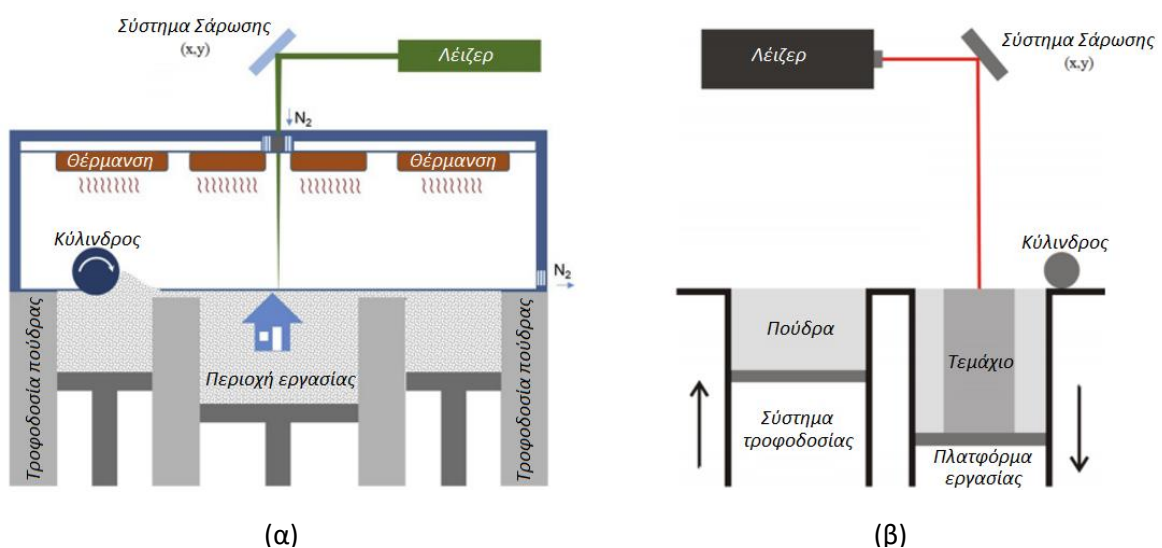


Σχήμα 4-8: Η μέθοδος Electron Beam Melting υιοθετημένη από τους Chandrasekar et al. (2020), (α) Σχηματική αναπαράσταση (β) Εσωτερική όψη του συστήματος Arcam EBM

Θα ήταν χρήσιμο ωστόσο να εξετασθούν τα πιθανά προβλήματα της αλληλεπίδρασης του λέιζερ με την πούδρα (Santecchia et al., 2020). Εκτός από την ποιότητα της πούδρας, και άλλοι παράγοντες επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες και την ποιότητα του αντικειμένου όπως ο σχηματισμός πόρων, spatter, and denudation zones κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, που οδηγούν σε μειωμένες μηχανικές ιδιότητες ή τραχιά ποιότητα επιφάνειας (Zarico et al., 2019). Η διαδικασία LPBF είναι επιρρεπής στην μόλυνση λόγω συσσωμάτωσης, στην μερική τήξη του υλικού, και την δημιουργία spatter particles που θα οδηγήσει σε αρνητικές επιπτώσεις στο παραγόμενο αντικείμενο (Ahmed et al., 2020). Επίσης, οι περίπλοκοι θερμικοί κύκλοι στους οποίους εκτίθενται τα υλικά (δηλαδή η επαναλαμβανόμενη θέρμανση – ψύξη) προκαλεί τον σχηματισμό εναπομενουσών τάσεων στο αντικείμενο, που επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια στην διαστασιολόγηση ή συμβάλλει στην δημιουργία ρωγμών (Zarico et al., 2019).

Μία άλλη διαδικασία αυτής της κατηγορίας, είναι η Selective Laser Sintering (SLS) ή σκέτο Laser Sintering (LS) (Gu et al., 2019), όπου πούδρα τήκεται μέσω μιας δέσμης υψηλής ενέργειας λέιζερ για τον σχηματισμό του επιθυμητού αντικειμένου (Wu, 2019). Είναι η τρίτη δημοφιλέστερη μέθοδος ΠΚ, και συγκεκριμένα την ξεπερνάει η FDM και η SLA (Sillani et al., 2019). Στην διαδικασία SLS, εφαρμόζεται ένα λεπτό στρώμα πούδρας στην επιφάνεια εκτύπωσης, και έπειτα μία δέσμη λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (Feng et al., 2019 ; Sillani et al., 2019) λιώνει και εκχύει την πούδρα ελεγχόμενα σε περιοχές κατά την προσδοκώμενη γεωμετρία (Wang et al., 2018). Αυτές οι «περιοχές» λιωμένης πούδρας η μία μετά την άλλη τελικά διαμορφώνουν το τελικό τρισδιάστατο αντικείμενο (βλ. Σχήμα 4-9) (Sillani et al., 2019 ; Feng et al., 2019).

Η κύρια διαφορά από τη μέθοδο SLM δεν έγκειται στην διαδικασία αλλά στο υλικό, καθότι η SLS χρησιμοποιεί πλαστικό και όχι μέταλλο (Gu et al., 2019). Αν και η FDM είναι δημοφιλέστερη μέθοδος, η SLS είναι καλύτερη διότι κατασκευάζει πλαστικά αντικείμενα με μεγάλη αντοχή πιο εύκολα (Kumar & Czekanski, 2018). Είναι συμβατή με πολλά είδη πολυμερούς, και συγκριτικά με την FDM (επίσης πλαστική ΠΚ) οδηγεί σε πιο λεία αντικείμενα (Wu, 2019). Ωστόσο, σύμφωνα με τους Kumar & Czekanski (2018) έχει ορισμένους περιορισμούς: (1) ακριβή πρώτη ύλη (2) όχι πλήρως αποδοτική χρήση υλικού (3) υψηλή απαίτηση σε ενέργεια για την παραγωγή της πούδρας.

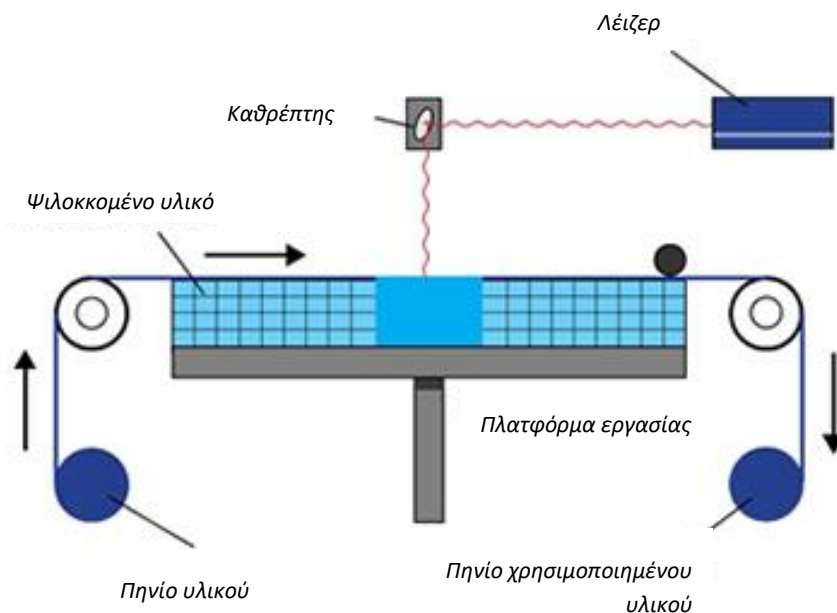


Σχήμα 4-9: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Selective Laser Sintering, από (α) Gu et al. (2019) (β) Rahito et al. (2019)

Συγκεκριμένα, λόγω του ότι πρέπει να καλυφθεί με πούδρα όλη η επιφάνεια εργασίας και έπειτα να γίνει η στοχευμένη τήξη των επιθυμητών περιοχών, ακόμα και για την δημιουργία ενός πολύ μικρού αντικειμένου, χρειάζεται μεγάλη ποσότητα πούδρας. Η πούδρα που μένει στην κάμαρα χωρίς να συμμετέχει όμως στην δημιουργία του τεμαχίου υπόκειται σε συνεχείς επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους και χάνει σταδιακά την ποιότητα της, με αντίκτυπο και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος (Kumar & Czekanski, 2018). Επίσης, στην κάτω επιφάνεια του αντικειμένου συνήθως εμφανίζεται μία κοκκώδης υφή (Lecký et al., 2019). Γενικά, ο απαραίτητος εξοπλισμός είναι πιο ακριβός για παράδειγμα από την FDM (Wu, 2019).

Sheet Lamination

Σε αυτή τη μέθοδο το 3D αντικείμενο δημιουργείται με το κόψιμο πολύ λεπτών φύλλων υλικού και την ένωση τους επίπεδο ανά επίπεδο (σχήμα 4-10). Μία τέτοια τεχνική είναι η Laminated Object Manufacturing (LOM), κατά την οποία φύλλα χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου, επικαλυμμένα με κόλλα, επικολλώνται διαδοχικά μεταξύ τους και κόβονται σε σχήμα με μαχαίρι ή κόπτη λέιζερ (van Wijk & van Wijk, 2015).

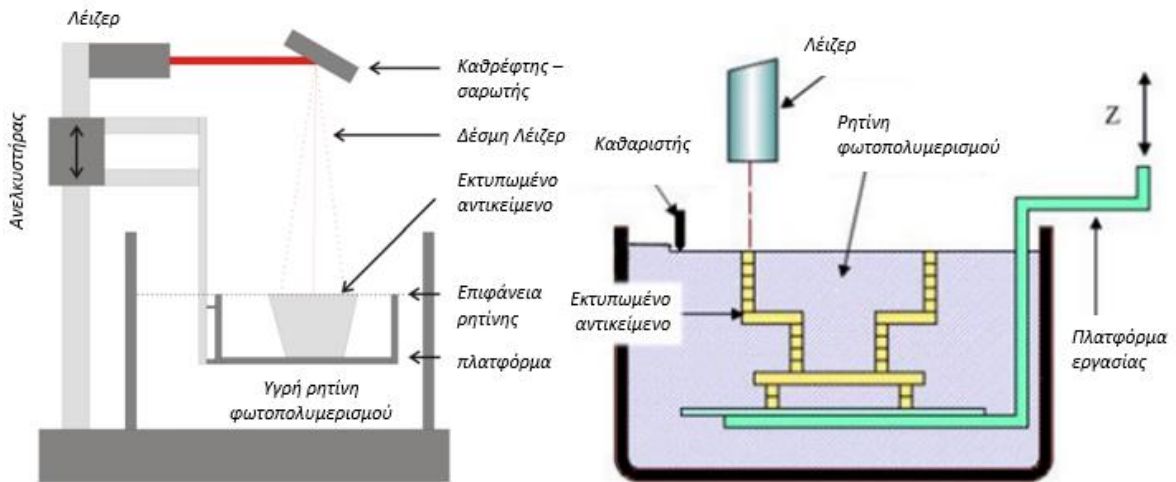


Σχήμα 4-10: Απεικόνιση της μεθόδου Sheet Lamination, υιοθετημένη από την ερευνητική ομάδα του Loughborough University (<https://www.lboro.ac.uk/research/amrq/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>)

Vat Photo Polymerization

Οι τεχνικές Photo-polymerization-based βασίζονται στην επίπεδο ανά επίπεδο σκλήρυνση υγρών photo-curable resins, μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας. Η πιο σημαντική εξ αυτών είναι η Stereolithography (SLA) (van Wijk & van Wijk, 2015), η οποία αναλύεται στην επόμενη παράγραφο. Η SLA είναι μια διαδικασία κατά την οποία υπεριώδες φως κάνει αλυσίδες μορίων να σχηματίσουν πολυμερή (Wu, 2019), απαιτεί δηλαδή τη χρήση φωτός και curable resin, το οποίο σκληραίνει στις ζητούμενες από τον κατασκευαστή γεωμετρίες (Kyzioł et al., 2019 ; Wu, 2019). Συγκεκριμένα, το υλικό βυθίζεται σε μία λεκάνη με υγρή ρητίνη. Τα στρώματα δημιουργούνται ως αποτέλεσμα βαθύτερης εμβάπτισης των δημιουργημένων στοιχείων στη δεξαμενή με ακρυλική ή εποξική ρητίνη. Η πρώτη στρώση τοποθετείται ελαφρώς κάτω από τη στάθμη υγρού. Ο πολυμερισμός συμβαίνει λόγω της ενέργειας της υπεριώδους ακτίνας λέιζερ, η πηγή της οποίας βρίσκεται πάνω

από τη δεξαμενή. Μετά τη σκλήρυνση του εφαρμοζόμενου στρώματος, η διαδικασία επαναλαμβάνεται εφαρμόζοντας διαδοχικά στρώματα και σκλήρυνσή τους έως ότου επιτευχθεί η επιδιωκόμενη γεωμετρία του στοιχείου, με βάση το μοντέλο του υπολογιστή (βλ. Σχήμα 4-11) (van Wijk & van Wijk, 2015 ; Kyzioł et al., 2019).



Σχήμα 4- 21: Η διαδικασία Stereolithography (SLA) υιοθετημένη από τους (α) Rahito et al. (2020) (β) Kyzioł et al. (2019)

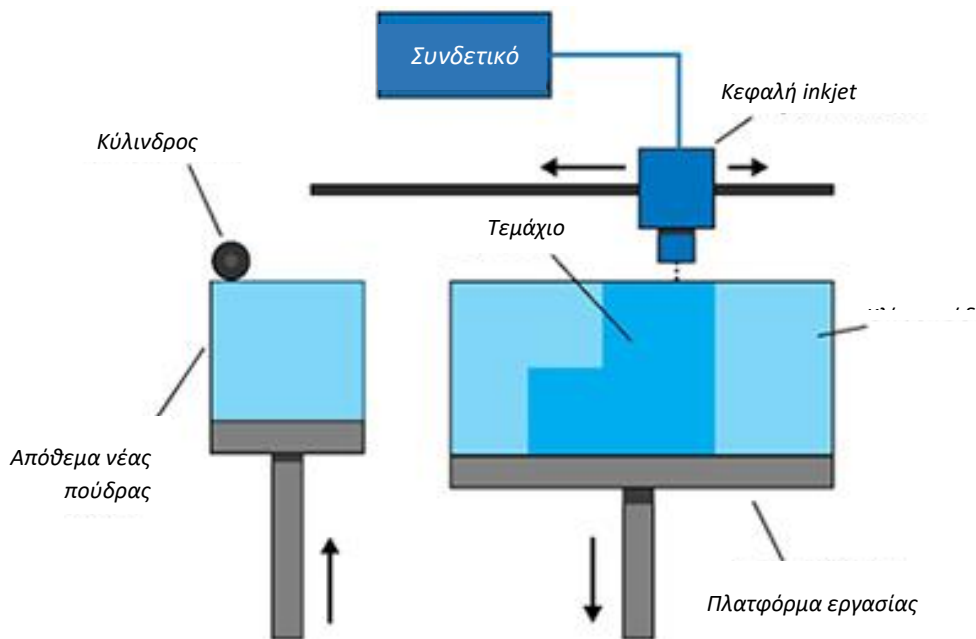
Αν και στα μειονεκτήματα της μεθόδου ανήκει ο ακριβός αναγκαίος εξοπλισμός (Wu, 2019) και η πιθανότητα σημαδιών στήριξης που χρειάζονται μετά-επεξεργασία (Lecký et al., 2019), η SLA δύναται να κατασκευάσει σε ταχείς ρυθμούς (Wu, 2019), και είναι η δημοφιλέστερη πλαστική μέθοδος μετά την FDM (Sillani et al., 2019). Μάλιστα ο πρώτος εμπορικός τρισδιάστατος εκτυπωτής (παρόλο που δεν είχε αυτό το όνομα τότε) βασίστηκε στην μέθοδο αυτή (van Wijk & van Wijk, 2015).

Άλλες μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η Digital Light Processing (van Wijk & van Wijk, 2015 ; Rahito et al., 2019), και η Polyjet (van Wijk & van Wijk, 2015).

Binder Jetting

Στην διαδικασία αυτή, η πούδρα ενώνεται με ένα συνδετικό υλικό που διανέμεται από μια κινητή μονάδα inkjet ανά στρώση. Η πλατφόρμα εργασίας κατεβαίνει και το επόμενο στρώμα σκόνης εφαρμόζεται και συντήκεται με τον ίδιο τρόπο. Είναι δυνατόν η πούδρα που δεν έχει συντηχθεί να λειτουργήσει ως δομή στήριξης ή και να επαναχρησιμοποιηθεί για την επόμενη εκτύπωση (βλ. Σχήμα 4-12) (van Wijk & van Wijk, 2015).

Όπως και σε άλλες διαδικασίες με βάση την πούδρα σε κλίνη (powder bed), και η Binder Jetting, εμφανίζει μια κοκκώδη υφή στις κάτω επιφάνειες (Lecký et al., 2019).



Σχήμα 4-12: Η μέθοδος Binder Jetting, υιοθετημένη από την ερευνητική ομάδα του Loughborough university (<https://www.lboro.ac.uk/research/amrq/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>)

Εκτός από αυτή την κατηγοριοποίηση στις επτά τεχνικές της ΠΚ (Morsidi et al., 2020), μπορούν να χωριστούν και με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, οι Pavlo et al. (2018) έχουν κατηγοριοποιήσει τις διαφορετικές διαδικασίες σε πέντε κατηγορίες, σύμφωνα με την μέθοδο που ακολουθείται, και ονομαστικά είναι: (1) Laser-based processes, όπου μίας χαμηλής με μέτριας έντασης πηγή χρησιμοποιείται για την τήξη και έπειτα την στερεοποίηση του υλικού (2) Extrusion processes, όπου χρησιμοποιείται ένα θερμό ακροφύσιο για την τήξη του υλικού (συνήθως πλαστικό), το οποίο έπειτα εναποθέτεται μέσω ενός ακροφυσίου για την διαμόρφωση της επιζητούμενης γεωμετρίας (3) Material jetting (4) Adhesive, όπου ένας κόφτης κόβει μία λεπτή μεμβράνη από χαρτί ή πλαστικό, σύμφωνα με το αντίστοιχο περίγραμμα του αντικειμένου, και έπειτα η μεμβράνη εναποτίθεται, πιέζεται και προσκολλάται στο προκαθορισμένο σχήμα κατά τη διαδικασία εκτύπωσης μέσω ενός θερμαντήρα που ενεργοποιεί την κόλλα στο κάτω μέρος της μεμβράνης, και τέλος (5) Electron beam, όπου χρησιμοποιείται μια δέσμη ηλεκτρονίων για την τήξη του υλικού και την διαμόρφωση του επιθυμητού αποτελέσματος.

Οι French et al. (2019) επίσης διακρίνουν τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο παροχής του υλικού πρώτης ύλης: (1) συστήματα «κλίνης», όπου το υλικό είτε σε υγρή είτε σε μορφή πούδρας απλώνεται σε ένα λεπτό στρώμα στην πλατφόρμα εργασίας, (2) συστήματα «τροφοδοσίας», όπου το υλικό είναι συνήθως σε μορφή νήματος (ή σύρματος αν πρόκειται για μέταλλο) ή ταινίας (3) υβριδικά συστήματα όπου μία από τις προηγούμενες μεθόδους συνδυάζεται με μηχανική κατεργασία. Στις δύο πρώτες κατηγορίες, αφότου το αντικείμενο χτισθεί επίπεδο ανά επίπεδο, έπειτα εξέρχεται του συστήματος κατασκευής και προχωράει στην διαδικασία παραγωγής για post-treatment. Στα υβριδικά συστήματα, η milling διαδικασία πραγματοποιείται μέσα στο σύστημα κατασκευής, οδηγώντας σε τελικά προϊόντα που ικανοποιούν πλήρως τις ζητούμενες προδιαγραφές. Τα συστήματα κλίνης προτιμώνται από την αεροδιαστημική βιομηχανία, ωστόσο περιορίζονται σε μικρές εφαρμογές διότι απαιτείται μεγάλη ποσότητα πρώτης ύλης, ιδιαίτερα για μεγάλα και ογκώδη τεμάχια, πράγμα που θα οδηγούσε σε μεγάλη σπατάλη και οικονομικά έξοδα.

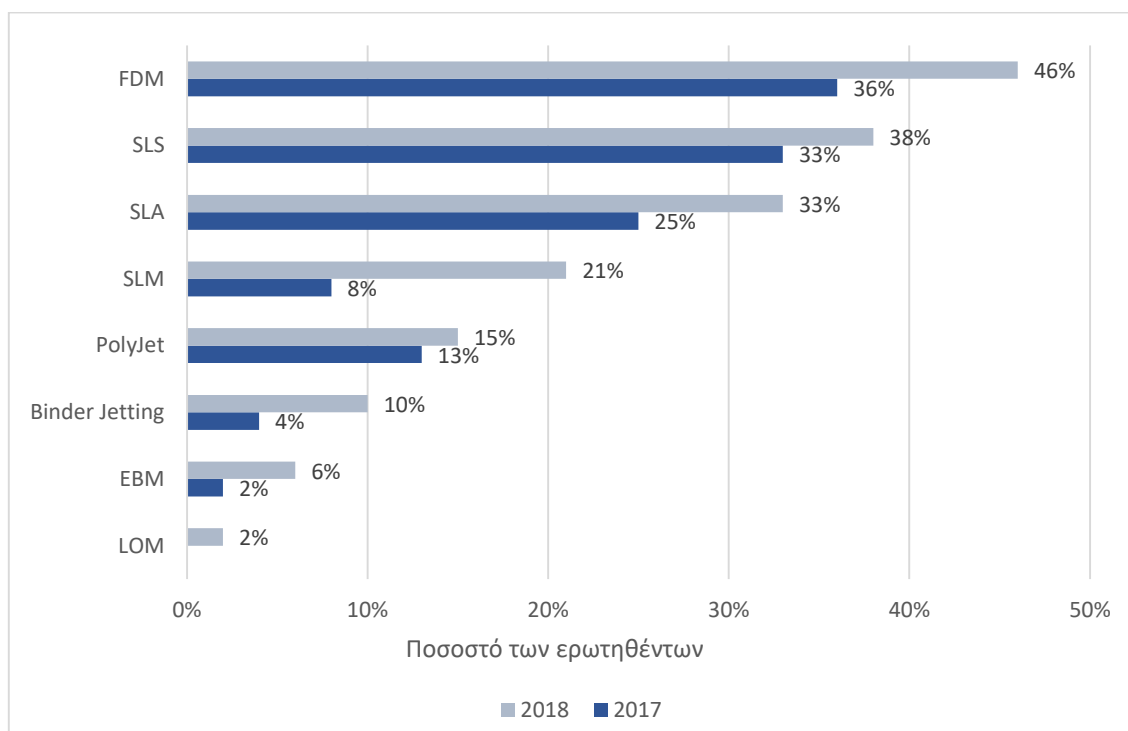
Τα συστήματα τροφοδοσίας αποδίδουν έως και 100% καλύτερα όσον αφορά στη χρήση του υλικού, συγκριτικά με την προαναφερθείσα κατηγορία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τους Antonov et al. (2019), καθότι αναφέρουν πως η παραγωγή λειτουργικών εξαρτημάτων είναι πιο εύκολη στα συστήματα τροφοδοσίας, ενώ τα συστήματα κλίνης παράγουν αρκετή φύρα.

Στον Πίνακα 4-1 που ακολουθεί, θα γίνει μια σύντομη επισκόπηση των πληροφοριών που προαναφέρθηκαν, ως ένας βασικός οδηγός στις μεθόδους της Προσθετικής Κατασκευής.

Πίνακας 4- 1: Συγκεντρωτικός πίνακας των προαναφερθέντων πληροφοριών, περί των μεθοδολογιών της Προσθετικής Κατασκευής και των υποκατηγοριών κάθε μεθόδου, το υλικό και την μορφή που χρησιμοποιείται

Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής	Βασικές Αρχές	Παραδείγματα εκάστοτε μεθόδου	Συμβατό Υλικό	Μορφή Υλικού
Material Extrusion	Εναπόθεση λιωμένου υλικού μέσω ενός θερμού ακροφυσίου κατά τη ζητούμενη γεωμετρία και έπειτα ψύξη του	FDM ή FFF	Πλαστικό	Νήμα
		3D Dispensing	Δ/Ο	Δ/Ο
Material Jetting	Ψεκασμός κολλώδους υλικού και προσκόλληση πούδρας στο στερεό αντικείμενο για την δημιουργία του 3D αντικειμένου	-	Πλαστικό	Πούδρα
Direct Energy Deposition	Εναπόθεση πούδρας και στοχευμένη θερμική ενέργεια για την τήξη της σε συγκεκριμένα σημεία	LENS	Μέταλλο	Πούδρα
		EDBM		Σύρμα
Powder Bed Fusion	Σύντηξη συγκεκριμένης γεωμετρίας σε μία περιοχή πούδρας στην κλίνη για την δημιουργία του 3D αντικειμένου με στοχευμένη θερμική ενέργεια	SLM ή LPBF	Μέταλλο	Πούδρα
		SLS ή LS	Πλαστικό	
		EBM	Μέταλλο	Σύρμα
Sheet Lamination	Σύνδεση λεπτών φύλλων υλικών	LOM	Μέταλλο/Πλαστικό/Χαρτί	Φύλλο
		UC/UAM		
Vat Photo Polymerization	Στοχευμένη δέσμη φωτός προς μία δεξαμενή πολυμερούς	SLA	Ρητίνη (πλαστικό)	Υγρή μορφή
		PolyJet		
		DLP		
Binder Jetting	Εναπόθεση υγρού συνδετικού σε συγκεκριμένη γεωμετρία επίπεδο ανά επίπεδο, όπου και κολλάει η πούδρα για να δημιουργηθεί το 3D αντικείμενο	3D inkjet technology	Μέταλλο	Πούδρα

Στην συνέχεια, στο σχήμα 4-13, φαίνεται η τάση προτίμησης για την εκάστοτε μέθοδο Προσθετικής Κατασκευής των ερωτηθέντων κατά την έρευνα του Wu (2019), για τα έτη 2017 και 2018.



Σχήμα 4- 3: Το ποσοστό προτίμησης για διάφορες μεθόδους προσθετικής κατασκευής, για το 2017 και 2018, υιοθετημένο από Wu (2019).

Στην συνέχεια γίνεται η ανάλυση των υλικών που είναι συμβατά με την Προσθετική Κατασκευή.

4.2. Υλικό

Πριν προχωρήσουμε σε εκτενή ανάλυση συγκεκριμένων υλικών, είναι σκόπιμο να δοθούν γενικές πληροφορίες όπως η μορφή και το σχήμα τους για την συμβατότητα στην προσθετική κατασκευή. Αυτή η γενική εισαγωγή είναι στην υποενότητα 4.2.1, και έπειτα στο 4.2.2 αναλύεται το πλαστικό, στο 4.2.3 το μέταλλο, και στο 4.2.4 τα βιοϋλικά.

4.2.1. Γενικά – Μορφή υλικού

Η συνεχής αναβάθμιση της ελευθερίας όχι μόνο από άποψη γεωμετρίας αντικειμένων αλλά και σχετικά με τα χρησιμοποιούμενα υλικά, διευρύνει κατά πολύ τις δυνατότητες και τις ευκαιρίες της ΠΚ (Domingues et al., 2017), διότι είναι σημαντική η ευελιξία και η αυτονομία στα υλικά (Wu, 2019). Με την ωρίμανση της τεχνολογίας, υπάρχει και καλύτερη γνώση των υλικών τροφοδοσίας καθώς και των εφαρμογών με τελικά προϊόντα (Giurco et al., 2014). Η αγορά των υλικών για την τρισδιάστατη εκτύπωση ενδέχεται να αξίζει δεκαέξι δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2028 (Gaikwad et al., 2018). Η αύξηση της ποικιλίας στα υλικά για την τροφοδοσία της εκτύπωσης είναι

αναγκαία, για την άμεση λειτουργικότητα των αντικειμένων αφότου παραχθούν. (Singh et al., 2018)

Η μορφή του υλικού τροφοδοσίας είναι συνήθως σε μορφή πούδρας, νήματος, σύρματος, ή υγρού (Esposito Corcione et al., 2018). Η πούδρα είναι μία πολύ χρήσιμη μορφή υλικού καθότι εμπεριέχει υλικά που ποικίλουν στο μέγεθος και το ειδικό τους βάρος, επομένως μπορούν να αναμειχθούν σε μία ομοιόμορφη κατανομή υλικού (Kumar & Czekanski, 2017). Τα υλικά σε μορφή πούδρας ή σκόνης που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ανάλογα το μέγεθος του κόκκου, χαρακτηριστικό το οποίο είναι πιο ισχυρό από τις άλλες ιδιότητες μίας πούδρας, και το οποίο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τελική απόδοση του προϊόντος, γι' αυτό πρέπει να εξεταστούν οι διάφορες επιπτώσεις που μπορεί να επέλθουν κατά τη διαδικασία της επεξεργασίας της κοκκομετρίας. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μιας πούδρας που ευθύνονται κατά κόρον για της φυσικές και χημικές ιδιότητες της προκύπτουσας πρώτης ύλης, είναι η μορφολογία και η κοκκομετρία (Tan et al., 2017).

Το νήμα είναι ένα σκληρό υλικό, συνήθως αποθηκευμένο σε πηνία, που λιώνει και εναποτίθεται σε μορφή κόκκων ή λεπτών ρυακίων κατά την εκτύπωση, και έπειτα γρήγορα ξανά-σκληραίνει σε στρώματα για να σχηματίσει το αντικείμενο (Behm et al., 2018). Είναι σημαντικό να διατηρείται μια σταθερή διάμετρος στο νήμα, με αποδεκτή απόκλιση περίπου 0.05 χιλιοστά, και βέλτιστη διάμετρο 1.66 – 1.83 χιλιοστά (Lee et al., 2019). Μια πολύ μικρή διάμετρος μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ο εκτυπωτής να μην είναι σε θέση να "πιάσει" το νήμα και να μην ωθείται το νήμα στο θερμό άκρο, προκαλώντας κώλυμα στον εκτυπωτή. Επίσης, μια πολύ μεγάλη διάμετρος μπορεί επίσης να προκαλέσει εμπλοκή, επειδή το νήμα δεν μπορεί να προωθηθεί περαιτέρω κατά τη διαδικασία εξώθησης. (Peeters et al., 2019) Το νήμα είναι συνήθως φθηνότερη λύση, όμως σε εκτύπωση χαμηλότερης ανάλυσης, με το τελικό αντικείμενο να εμφανίζει «ανωμαλίες» στην επιφάνεια του. Για την εξομάλυνση αυτών των ασυνεχειών, μπορούν να εφαρμοστούν μέθοδοι για το φινίρισμα της επιφάνειας, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας ατμό ακετόνης. Εκτός αυτού, το νήμα ίσως να έχει λιγότερη αντοχή για ορισμένες εφαρμογές, διότι αν στο αντικείμενο ασκηθεί ορισμένη πίεση, ίσως εμφανιστούν ρωγμές και σπασίματα ανάμεσα στα επίπεδα (Behm et al., 2018). Συγκριτικά ωστόσο, το υλικό σε μορφή νήματος αποδίδει έως και 100% καλύτερα όσον αφορά στην αξιοποίηση της πρώτης ύλης, συγκριτικά με την πούδρα (French et al., 2019).

Η επιλογή του υλικού και της μεθόδου ΠΚ είναι από τα πιο σημαντικά σημεία στον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση στην ΠΚ για συναρμολόγηση εξαρτημάτων (Lecký et al., 2019). Οι τελικές ιδιότητες που έχει το παραγόμενο αντικείμενο, εξαρτώνται από τις παραμέτρους που ορίστηκαν κατά τη διαδικασία και από τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιηθείσας πρώτης ύλης (Antonon et al., 2019). Αν η ποιότητα των υλικών τροφοδοσίας δεν είναι επαρκώς χαρακτηρισμένη, είναι δύσκολο να εγγυηθεί κάποιος ότι το αποτέλεσμα της προσθετικής κατασκευής θα είναι επαναλήψιμο (Zarico et al., 2019). Κάποια από τα χαρακτηριστικά που θα έπρεπε να έχει τα υλικά είναι η υψηλή ικανότητα εξώθησης και ρευστότητα για τη μεταφορά του υλικού, η ικανότητα διατήρησης του σχήματος υλικού κατά την εξώθηση, και η ικανότητα για την υποστήριξη του βάρους των επόμενων στρώσεων που εναποτίθενται από επάνω (Ting et al., 2019).

Οι τεχνολογίες ΠΚ είναι συμβατές με μία καλή ποικιλία υλικών (Domingues et al., 2017). Παρόλο που αρχικά η ΠΚ ήταν επικεντρωμένη κατά κόρον σε πλαστική πρώτη ύλη, πλέον χρησιμοποιείται ευρέως για μεταλλικά εξαρτήματα (με υλικά όπως το τιτάνιο, το αλουμίνιο, το ασάλι και το ασήμι) (Esposito Corcione et al., 2018; Wu, 2019), σε εφαρμογές στην αεροδιαστημική, την ιατρική και οδοντιατρική, και σε άλλες βιομηχανίες (Giurco et al., 2014 ; Behm et al., 2018). Επίσης, οι

τριδιάστατοι εκτυπωτές είναι συμβατοί με πληθώρα νέων υλικών, όπως τα κεραμικά (Wu, 2019), το χαρτί, το ξύλο, τον φελλό, το αφρολέξ, το καουτσούκ (Quetzeri-Santiago et al., 2019), ή άλλα σύνθετα υλικά (Sillani et al., 2019 ; Esposito Corcione et al., 2018), κατάλληλα για πολλές εφαρμογές (Behm et al., 2018 ; Domingues et al., 2017).

Στην συνέχεια θα αναλυθούν αυτά τα υλικά και οι εφαρμογές τους στην Προσθετική Κατασκευή.

4.2.2. Πλαστικό

Η τρισδιάστατη εκτύπωση με υλικό το πλαστικό είναι μία πολύ δημοφιλής τάση στη σύγχρονη βιομηχανία (Antonov et al., 2019). Τα θερμοσκληρόμενα πολυμερή διεκδικούν σχεδόν το 50% της αγοραστών υλικών, και η ευρεία τους χρήση σε πολλά πεδία αποδίδεται κυρίως στην εξαιρετική μηχανική τους σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, την χημική τους αντοχή και την συμβατότητα τους σε πολυάριθμες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης (Zhang et al., 2018). Βέβαια, μια διαδεδομένη διαδικασία είναι η ενίσχυση των πολυμερών με ίνες γυαλιού, μετάλλου ή κεραμικού, ούτως ώστε να ενισχυθούν οι μηχανικές, θερμικές και τριβολογικές ιδιότητες, καθιστώντας το ανώτερο υλικό από το συμβατικό πολυμερές, και την υιοθέτηση του σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές (Boragai et al., 2016). Στη βιβλιογραφία συχνά λέγεται πως τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα πλαστικά μοντέλα, εκτός του ότι είναι οικονομικότερα και κατασκευάζονται ταχύτερα, επίσης δεν παρουσιάζουν διαφορά από τα μεταλλικά μοντέλα στις θερμικές τους ιδιότητες. (Behm et al., 2018)

Από την σκοπιά της Κυκλικής Οικονομίας, το πλαστικό έχει πολλές προοπτικές για την υιοθέτηση του σε τοπικές δομές ανακύκλωσης, κάτι που αναπτύσσεται ενδελεχώς στο κεφάλαιο 5.2.2. Ο βαθμός συμβατικής ανακύκλωσης πλαστικών είναι αρκετά χαμηλός, και η μικρή πυκνότητα του υλικού οδηγεί σε υψηλά μεταφορικά κόστη σε σχέση με άλλα υλικά. Μπορεί να αξιοποιηθεί εύκολα για την Κυκλική Οικονομία, καθώς είναι ένα υλικό με σταθερές ροές αποβλήτων παγκόσμια, και χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στα καταναλωτικά αγαθά (Garmulewicz et al., 2018).

Το πιο ευρέως διαδεδομένο υλικό εκτύπωσης είναι το πλαστικό και τα διάφορα παράγωγα του, κυρίως το Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) (Behm et al., 2018) και το Polylactic Acid (PLA) (Lanzotti et al., 2018). Οι Domingues et al. (2017) επίσης επισημαίνουν τα πιο συνηθισμένα υλικά της πλαστικής ΠΚ να είναι το ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) και το PLA, με διαφορετικές ανταλλαγές (different trade-offs) μεταξύ αντοχής και θερμικών ιδιοτήτων. Ωστόσο πρέπει να διευκρινιστεί ότι το PLA αν και θεωρητικά συμπεριλαμβάνεται στα πλαστικά υλικά, ουσιαστικά είναι δημιουργημένο από ανανεώσιμες πηγές, δηλαδή δεν εξαρτάται από το πετρέλαιο ή τα παράγωγά του (Lecký et al., 2019). Αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω στην συνέχεια. Άλλα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται είναι τα poly-caprolactone (PCL), PLLA/poly(lactic-coglycolic acid) (PLGA) (Esposito Corcione et al., 2018), polyimide, polycarbonate, nylon, polyvinyl alcohol, high density polyethylene, polyetheretherketone and high impact polystyrene (Kumar & Czekanski, 2017).

Το ABS είναι το πιο γνωστό και ευρέως χρησιμοποιούμενο πολυμερές με βάση το πετρέλαιο (Anderson, 2017), με τα τελευταία χρόνια να είναι πολύ δημοφιλές για τη χρήση του στην μέθοδο προσθετικής κατασκευής FDM. Έχει εξαιρετική τραχύτητα, καλή σταθερότητα διαστάσεων, καλή

δυνατότητα επεξεργασίας και μεγάλη χημική αντίσταση και σταθερότητα. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα σε συνδυασμό με την οικονομική του φύση καθότι είναι αρκετά προσιτό υλικό, μετέτρεψαν το ABS στο θερμοπλαστικό υλικό με τις μεγαλύτερες πωλήσεις. Το ABS είναι ιδιαίτερα κατάλληλο και στη συμβατική κατασκευή όπως η χύτευση με έγχυση και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται σε μια μεγάλη ποικιλία κατασκευασμένων προϊόντων που περιλαμβάνουν εξαρτήματα αυτοκινήτων, αθλητικό εξοπλισμό, ηλεκτρικά περιβλήματα ακόμα και παιχνίδια (Charles et al., 2019). Η συνηθέστερη μορφή του για την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι σε μορφή νήματος (Behm et al., 2018).

Το δεύτερο πιο συνηθισμένο υλικό είναι το PLA, βιοδιασπώμενο νήμα πολυμερούς, προερχόμενο από φυτική ύλη, συγκεκριμένα από άμυλο καλαμποκιού (Behm et al., 2018), ζαχαροκάλαμο (Lanzotti et al., 2018), ή και γλυκοπατάτα (Cisneros-López et al., 2016), δηλαδή ως κύριο συστατικό είναι η βιομάζα (Lecký et al., 2019). Μπορεί να φαίνεται σαν ένα σύνθετος με βάση το πετρέλαιο πλαστικό, καθότι έχει τις ίδιες ιδιότητες ευελιξίας, σκληρότητας και αγωγιμότητας (Esposito Corcione et al., 2018), ωστόσο ξεχωρίζει από τα κοινά πλαστικά (Lecký et al., 2019), και αρκετές φορές μπορεί επίσης να τα αντικαταστήσει (Cisneros-López et al., 2016). Έχει μεγάλες δυνατότητες στην συναρμολόγηση, και γι' αυτό αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό από την ΠΚ, λόγω της ικανότητας για κατασκευαστική μεταβλητότητα, και εξοικονόμηση χρόνου σε συνήθεις σχεδιαστικές αλλαγές (Lecký et al., 2019). Το αποτύπωμα άνθρακα του είναι μέχρι και 3000 φορές μικρότερο από το αυτό των πλαστικών με βάση το πετρέλαιο (Anderson, 2017). Το μη χρήσιμο PLA μπορεί να διαχειρισθεί με πολλούς τρόπους, όπως η ανακύκλωση, η καύση, η κομποστοποίηση και η μετατροπή του σε βιομάζα (Lecký et al., 2019), ή η ρίψη του στη χωματερή (Lanzotti et al., 2018 ; Anderson, 2017). Από περιβαλλοντική άποψη, η καταλληλότερη μέθοδος είναι η ανακύκλωση, με την κομποστοποίηση παρόλο που φαίνεται καλή λύση, να είναι μη ρεαλιστική. Φυσικά, η καύση δεν γίνεται να ληφθεί υπόψη ως καλή λύση λόγω της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Lanzotti et al., 2018 ; Anderson, 2017).

Για την μέθοδο SLS χρησιμοποιείται ανάμεσα στα άλλα πολυμερή κατά κόρον τα πολυαμίδια, διεκδικώντας το 95% της αγοράς των πολυμερών για τη συγκεκριμένη μέθοδο (Goodridge et al., 2012), με το 90% αυτού να είναι το Polyamide 12 (PA12) (Sillani et al., 2019). Είναι σχετικά ακριβό υλικό καθώς κοστίζει εκατό δολάρια το κιλό. Ένα σύστημα SLS περικλείει περίπου 20 κιλά τέτοιας πούδρας, και εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του επιθυμητού τρισδιάστατου μοντέλου. Περίπου το 25% αυτής της πούδρας απορρίπτεται γιατί δεν χρησιμοποιείται κατά την κατασκευή. Συνήθως, ένα σύστημα SLS με κανονική χρήση παράγει περίπου πενήντα κιλά απόβλητη πούδρα το μήνα, επομένως είναι εύκολα αντιληπτό ότι σε πιο μεγάλη χρήση και περισσότερες μηχανές SLS για μαζική παραγωγή, μπορεί να παραχθεί και απόβλητη πούδρα άνω των εκατό κιλών (Kumar & Czekanski, 2017).

Το Polyethylene Terephthalate (PET) είναι ένα θερμοπλαστικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον σε διάφορα προϊόντα όπως πλαστικά μπουκάλια, ρούχα, και γενικά διάφορες εφαρμογές. Ο βαθμός στον οποίο ανακυκλώνεται είναι περίπου 28.4% (Idrees et al., 2018).

Στον Πίνακα 4-2 που ακολουθεί, συνοψίζονται τα βασικότερα θερμοπλαστικά της τρισδιάστατης εκτύπωσης, και ορισμένα χαρακτηριστικά τους συγκεκριμένα το κόστος, το δυνατό εύρος θερμοκρασιών για την εκτύπωση, και τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Πίνακας 4- 2: Τα βασικότερα θερμοπλαστικά για την τρισδιάστατη εκτύπωση και τα κύρια χαρακτηριστικά τους, υιοθετημένο από τους Chong et al. (2015)

Θερμοπλαστικό	Ελάχιστη τιμή (\$/kg)	Θερμοκρασίες Εκτύπωσης (°C)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
PLA	19,19	175-200	Οικολογικό, βιοδιασπώμενο, καλή απόδοση σε υψηλές ταχύτητες εκτύπωσης, ιδιαίτερα καλό για παραγωγή αιχμηρών γωνιών, δεν είναι επιρρεπές στην επικάλυψη	Απαιτείται ανεμιστήρας στην εξώθηση, αρκετά εύθραυστο, ευαίσθητο στην θερμότητα άρα μη κατάλληλο για διαρκή χρήση σε εξωτερικούς χώρους
ABS	18,96	220-240	Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπως ακτινοβολία ήλιου ή καυτό νερό, καλή απόδοση σε υψηλές ταχύτητες εκτύπωσης, ευέλικτο, εύκολη εξώθηση, εύκολη λείανση	Ήπια χημική οσμή κατά την εξώθηση, διαστέλλεται και συστέλλεται στην θέρμανση και την ψύξη, όχι τέλεια σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων, εμφάνιση φυσαλίδων στην υγρασία
Nylon	39,95	230-270	Εξαιρετική σύνδεση στα επίπεδα, καλή αντοχή και στιβαρότητα, αντοχή στην θραύση, άοσμο	Επιρρεπές στην αναδίπλωση, πιθανόν να εκπέμπει κυάνιο σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω της θερμοκρασίας εκτύπωσης)
PC	49,99	260+	Υψηλή αντίσταση στην φθορά, υψηλή δύναμη και αντοχή	Υγροσκοπικό, πιθανόν να αλλάξει κατάσταση υπό την έκθεση σε ακτινοβολία, πιο αδιαφανές και εύθραυστο όσο περνάει ο χρόνος, μπορεί να εκπέμπει τοξικά αέρια
PET	79,95	212-235	Αρκετά άκαμπτο και ελαφρύ, δυνατό, μπορεί 100% να ανακτηθεί	Υγροσκοπικό, πιο εύθραυστο από το PLA
HIPS	25,49	210-230	Εύκολο να βαφτεί και να εκτυπωθεί, ιδανικό για εκτύπωση ελαφριών αντικειμένων	Ακόμα σε πειραματικό στάδιο για την διαπίστωση αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διαλύτης
PVA	35,95	160-205	Βιοδιασπώμενο, ανακυκλώσιμο, οικολογικό, μεγάλες δυνάμεις δεσμών, καλές ιδιότητες φραγμού	Πολύ υγροσκοπικό, δεν είναι κατάλληλο για συνθήκες με υγρασία

4.2.3. Μέταλλο

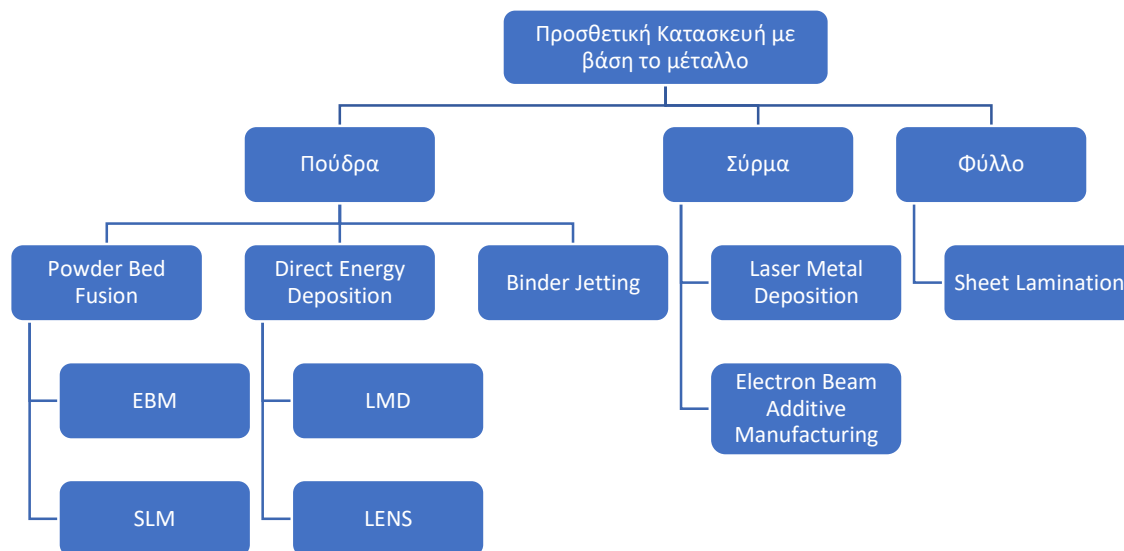
Η προσθετική κατασκευή με βάση το μέταλλο έχει προσελκύσει την προσοχή των ερευνητών πρόσφατα, κυρίως λόγω της ικανότητας τους να κατασκευάζουν αντικείμενα near-net-shape με ένα βήμα (Fullenwider et al., 2019). Αυτή η εξέλιξη στα μεταλλικά υλικά προμηνύει μεγάλη προοπτική ανάπτυξης σε χώρες πλούσιες σε ορυκτά να εκμεταλλευτούν την ΠΚ για την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας (Giurco et al., 2014).

Οι πιο συνήθεις μέθοδοι προσθετικής κατασκευής με μέταλλο, χρησιμοποιούν καθαρή ή προ-κραματική πούδρα με μικρομετρικές διαστάσεις, οι οποίες μπορούν να ποικίλλουν ανάλογα με τη διαδικασία και τη δέσμη υψηλής έντασης που χρησιμοποιείται για την τήξη της σκόνης (δηλαδή, laser or electron beam) (Santecchia et al., 2020). Τα κυριότερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται

είναι κράματα με βάση το Τιτάνιο, όχι μόνο λόγω της ικανότητας τους να επιτυγχάνουν υψηλή διαστασιολογική ακρίβεια αλλά και επειδή έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, ίσως και καλύτερες από αντικείμενα που παράγονται με συμβατική κατασκευή (Poron et al., 2018). Εκτός από το τιτάνιο, άλλα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι το ανοξείδωτο ατσάλι, το ασήμι και ο χαλκός (Nascimento et al., 2019).

Η ποιότητα του μετάλλου έχει μεγάλη σημασία για την κατασκευή αντικειμένων υψηλής απόδοσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του μετάλλου όταν είναι σε μορφή πούδρας, είναι το μέγεθος των σωματιδίων της, ο βαθμός συγκέντρωσης και η καθαρότητα της, συμπεριλαμβανομένου του βαθμού οξειδωσης της επιφάνειας (Poron et al., 2018). Έτσι η ΠΚ με βάση το μέταλλο εξακολουθεί να αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις λόγω της χαμηλής αποδοτικότητας των πρώτων υλών και της διαθεσιμότητας ιδανικής πούδρας υλικού. Οι πούδρες με ατομικό αέριο (Gas atomized) είναι η πιο κοινή πρώτη ύλη λόγω της σφαιρικής μορφολογίας τους και της ελεγχόμενης κατανομής μεγέθους σωματιδίων. Ωστόσο, μια περιβαλλοντική πρόκληση της χρήσης της είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή, οδηγώντας σε υψηλό κόστος και περιορισμένη διαθεσιμότητα σε συνθέσεις κραμάτων (Fullenwider et al., 2019). Εκτός του υψηλού επενδυτικού κόστους για τις υπάρχουσες μεταλλικές τρισδιάστατες τεχνολογίες εκτύπωσης, τα μέταλλα σαν υλικό έρχονται σε δεύτερη μοίρα επειδή γενικά σημειώνονται ήδη υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης λόγω της οικονομικής αξίας του υλικού (Garmulewicz et al., 2018).

Στην συνέχεια ακολουθεί το Σχήμα 4-14 για τον διαχωρισμό των μεθόδων Προσθετικής Κατασκευής με βάση το μέταλλο, με κριτήριο τη μορφή στην οποία τροφοδοτείται για την διαδικασία αυτή.



Σχήμα 4- 144: Οι κατηγορίες Προσθετικής Κατασκευής με βάση το μέταλλο και τη μορφή του, υιοθετημένη από τους Tan et al. (2017)

4.2.4. Βιοϋλικά

Η τρέχουσα τάση στην ΠΚ είναι τα βιοϋλικά, δηλαδή προϊόντα φιλικά προς το περιβάλλον, με κύριο πλεονέκτημα το ότι είναι βιοδιασπώμενα και ανακυκλώσιμα (Lecký et al., 2019). Τα βιοδιασπώμενα πολυμερή έχουν ιδιότητες παρόμοιες με τα συμβατικά, πετρελαιοπροερχόμενα

υλικά, ενώ ταυτόχρονα είναι πλήρως φιλικά στο φυσικό περιβάλλον. Επιπροσθέτως, παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για παράδειγμα από ρίζες λαχανικών, όπως το καλαμπόκι το ρύζι ή την βιομάζα (Paciorek-Sadowska et al., 2019). Η Βιομάζα προσφέρει την δυνατότητα για την δημιουργία βιοδιασπώμενων πολυμερών (που υπάρχουν ήδη στις διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα το παράδειγμα του PLA), ωστόσο η υπάρχουσα τεχνολογία περιορίζει την διανομή του υλικού (Garmulewicz et al., 2018). Πλέον, είναι δυνατή η απόκτηση μεταξύ 200-300 γραμμαρίων βιοπολυμερών ανά τετραγωνικό μέτρο καλλιεργούμενου αγρού. Υπάρχουν πολλά είδη βιοδιασπώμενων υλικών, όπου όπως προαναφέρθηκε η πιο ανεπτυγμένη έρευνα μεταξύ αυτών αφορά το πολυλακτίδιο (PLA) (Paciorek-Sadowska et al., 2019).

Οι σχεδιαστές και κατασκευαστές στο πλαίσιο της ΠΚ έχουν ασχοληθεί αρκετά με τα βιοϋλικά, διότι υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη και χρήση υλικών που μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν με αποδοτικότητα (Giurco et al., 2014). Υπάρχουν πολλές λύσεις με προοπτικές σχετικά με την βιωσιμότητα στα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι ειδήμονες αναπτύσσουν μία ποικιλία από νήματα τροφοδοσίας, τα οποία είναι βιοδιασπώμενα, κομποστοποιήσιμα, ή προέρχονται από ανακυκλωμένα υλικά (Behm et al., 2018). Η χρήση πρώτων υλών που προέρχονται από φυτά, ή τα διάφορα απορρίμματα που εμπεριέχουν φυτικές ίνες ως πρώτη ύλη (Stolz & Mühlaupt, 2020), είναι πολύ καλή λύση για το περιβάλλον, με πληθώρα παραδειγμάτων σε πρακτικές εφαρμογές (Wilkinson & Core, 2015). Για παράδειγμα, οικολογικά νήματα όπως WillowFlex (BioInspiration, Eberswalde, Germany), αποτελούνται από φυτικές πηγές και είναι πλήρως κομποστοποιήσιμα, ακόμα και στους δημοτικούς κάδους κομποστοποίησης (Behm et al., 2018). Η ASUS σε ορισμένες περιπτώσεις αντί για πλαστικό, χρησιμοποιεί μπαμπού ως υποκατάστατο, υλικό ανακυκλώσιμο και βιώσιμο, προστατεύοντας τις πολύ περιορισμένες πηγές ορυκτών καυσίμων. Το μπαμπού έχει βαθμό ανανεωσιμότητας πολύ υψηλότερο από κάθε άλλο φυτό (Wilkinson & Core, 2015).

Στην ΠΚ υπάρχουν προοπτικές για υλικά με βάση το ξύλο (Behm et al., 2018), δηλαδή οργανικές πρώτες ύλες με ίνες ξύλου, στο πλαίσιο μιας βιώσιμης εξέλιξης για παράδειγμα για ελαφριές κατασκευές στην αρχιτεκτονική (Stolz & Mühlaupt, 2020). Για παράδειγμα ένα βιώσιμο εναλλακτικό υλικό αποτελεί και ένα μείγμα ανακυκλωμένων ινών ξύλου με συνδεδετικά πολυμερούς (Wilkinson & Core, 2015). Η κυτταρίνη είναι σαν ένα φυσικό πολυμερές που βρίσκεται σε περισσότερη αφθονία, ενώ τα σύνθετα κυτταρίνης από φυσικά και συνθετικά πολυμερή, είναι γνωστά εδώ και δεκαετίες. Σύνθετα από ξύλο-πλαστικό με βάση το πολυπροπυλένιο, χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία, όπως στον τομέα της αυτοκίνησης ή της κατασκευής, διότι έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, μεγάλη αντοχή με χαμηλό βάρος. Αυτό το υλικό (ξύλο-πλαστικό) εμπορικά χρησιμοποιείται σε διαδικασία FFF, όπου οι μηχανικές ιδιότητες διέπονται από το εμπεριεχόμενο ξύλο (Stolz & Mühlaupt, 2020).

Ένα άλλο υλικό είναι τα απορρίμματα χαρτιού που αποτελούν μια πηγή βιολογικών πρώτων υλών που δεν έχουν ακόμα εκμεταλλευτεί στην ΠΚ (Stolz & Mühlaupt, 2020). Επίσης υπάρχουν επιλογές πλήρως μη πλαστικών υλικών, όπως το νήμα που φτιάχνεται από φύρα μπύρας, καφεΐνης ή κάνναβης (Behm et al., 2018). Τα υπολείμματα του καφέ μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή λειτουργικών, βιοπλαστικών προϊόντων. Τα βιοπλαστικά είναι 100% βιοδιασπώμενα, δηλαδή αποσυντίθενται σε λίγους μήνες (σε σχέση με τα κανονικά πλαστικά που χρειάζονται εκατοντάδες χρόνια). Όταν διασπώνται, τα βιοπλαστικά σε αντίθεση με τα κανονικά πλαστικά, δεν μολύνουν το έδαφος αλλά μπορούν να απορροφηθούν από τη γη ως λίπασμα (Fahim et al., 2019).

Η τελευταία λύση επιλογής βιοϋλικού, θα ήταν το ανακυκλωμένο πλαστικό (Behm et al., 2018), για το οποίο γίνεται εκτενής αναφορά στο κεφάλαιο. Συνοπτικά, το νήμα από ανακυκλωμένο πλαστικό είναι μία επιλογή, όπως από μπουκάλια από PET, ή σακουλάκια σνακ. Η παραγωγή ανακυκλωμένου νήματος είναι πιο οικονομική από την εξ αρχής δημιουργία νήματος από καθαρή πρώτη ύλη, συμβάλλοντας στην εδραίωση μιας αγοράς εμπορίου χρησιμοποιημένων πλαστικών, που συγκεντρώνονται από συλλέκτες απορριμμάτων (Behm et al., 2018). Επίσης, σε όχι λειτουργικά προϊόντα αλλά σε διάφορες υποστηρικτικές δομές, αυτό το βοηθητικό τεμάχιο μπορεί να δημιουργηθεί από οργανικό ή ανακυκλώσιμο υλικό, ώστε να είναι σε εύκολη πρόσβαση χωρίς αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. (Wilkinson & Core, 2015)

Αρκετές έρευνες τοποθετήθηκαν στις προοπτικές του ξύλου ως βιοϋλικό για την προσθετική κατασκευή. Οι Pitt et al. (2017) στην έρευνα τους ασχολήθηκαν λεπτομερώς με τις ιδιότητες του ξύλου για την υιοθέτηση του στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Είναι μια οικονομική και βιώσιμη πηγή με περιορισμένες απώλειες υλικού κατά την επεξεργασία. Η σκόνη ξύλου είναι ένα τυπικό απόβλητο ξύλου και παρέχεται από μετά-επεξεργασία του υλικού στην βιομηχανία, όπως για παράδειγμα το πριονίδι. Σε αυτή τη μελέτη, η τρισδιάστατη κατασκευή έγινε χρησιμοποιώντας απορρίμματα ξύλου ως υλικό πρώτης ύλης και φορμαλδεΐδη ως συνδετικό υλικό. Οι μηχανικές δοκιμές (κάμψη, εφελκυσμός) έδειξαν ότι αυτά τα προϊόντα έχουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα συμβατικώς κατασκευασμένα δείγματα σε αυτήν τη μελέτη. Αν και δεν είναι απολύτως βιώσιμο λόγω της χρήσης ρητινών, αυτή η διαδικασία και το υλικό έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώσουν μια φιλική προς το περιβάλλον λύση στη βιομηχανία με τη χρήση μιας ανακυκλώσιμης και βιώσιμης πρώτης ύλης.

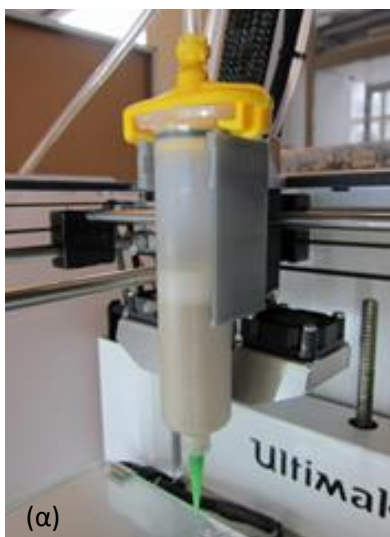
Ομοίως το ξύλο πραγματεύτηκαν οι Lösche et al. (2019), εξετάζοντας για την ακρίβεια ένα σύνθετο ξύλου-πλαστικού, το οποίο χαρακτηριστικά «κλείνει το βρόγχο» στη διαδικασία της παραγωγής. Στην φάση της παραγωγής, χρησιμοποιεί ανακυκλωμένο υλικό ως πρώτη ύλη, και στο τέλος της ζωής του, ανακυκλώνεται σε μορφή πούδρας και ξαναχρησιμοποιείται σε νέα εκτύπωση χωρίς να χάσει τη μηχανική του απόδοση, όπως έχουν δείξει οι έλεγχοι ποιότητας. Έτσι κλείνει ο βρόγχος της παραγωγής, και συμβάλλει στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας. Το ανακυκλωμένο υλικό ξύλου προερχόμενο 100% από απορρίμματα, είναι κυρίως από παραπροϊόντα τύπου πριονίδι από βιομηχανίες όπως επιπλοποιία και άλλα.

Στην έρευνα των Behm et al. (2018), έγιναν πειράματα με δύο είδη νήματος, υλικών πλαστικού (ABS) και υβριδικού πλαστικό-ξύλο. Απ' ότι φάνηκε, το ABS είναι καλύτερο από το υβριδικό από άποψη κόστους και αντοχής, ωστόσο φυσικά το υβριδικό είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον καθώς αποτελείται κατά 30% από ανακυκλωμένες ίνες ξύλου. (Behm et al., 2018). Μία όμοια προσέγγιση πραγματοποιήθηκε από τους Horta et al. (2018). Εκτυπώθηκαν δείγματα τόσο από καθαρό ABS όσο και από σύνθετο φυσικών ινών ξύλου με επαναχρησιμοποιημένο θερμοπλαστικό. Η εκτύπωση έγινε με τη μέθοδο FDM και το συμπέρασμα ήταν πως το σύνθετο ξύλου-πλαστικού έχει πολύ καλές προοπτικές.

Στην έρευνα των Hu et al. (2018), αναλύεται μια καινοτομία στα βιοϋλικά, με βουλκανισμένο θερμοπλαστικό με συνθετικό βιολογικό ελαστομερές (PLBSI) και πολυλακτίδιο (PLA) για υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μετά από επαναχρησιμοποίηση πέντε φορές, σημειώθηκε ένας βαθμός μείωσης των μηχανικών του ιδιοτήτων. Η ανανεώσιμη προέλευση, η καλή δυνατότητα επεξεργασίας και η επανεπεξεργασία, η εξαιρετική ικανότητα βιοδιάσπασης και η βιοσυμβατότητα, δείχνει ότι είναι ένα από τα ιδανικά υλικά για εκτύπωση 3D.

Σύμφωνα με την έρευνα των Voet et al. (2018), για να διευκολυνθεί η μετάβαση προς μια κυκλική οικονομία, η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων υλικών για την προσθετική κατασκευή καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική. Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζεται με επιτυχία η κατασκευή πρωτοτύπων από βιολογικές ακρυλικές φωτοπολυμερείς ρητίνες, χρησιμοποιώντας έναν εκτυπωτή (SLA). Έχουν αναπτυχθεί τέσσερις ξεχωριστές ρητίνες με βιοδιασπώμενο περιεχόμενο που κυμαίνεται από 34 έως 67%. Αυτή η πρόοδος καθιστά εφικτή την κατασκευή ενός ευρέος φάσματος βιώσιμων και ανανεώσιμων προϊόντων και διευκολύνει την Κυκλική Οικονομία και την προστασία του περιβάλλοντος.

Αρκετό ενδιαφέρον έχει η μελέτη των Sauerwein & Doubrovski (2018), καθώς γίνεται λόγος για ένα ιδιαίτερο υλικό. Εξετάστηκε η δυνατότητα μετατροπής ενός τοπικού είδους αποβλήτου σε υλικό κατάλληλο για την ΠΚ, συγκεκριμένα αλεσμένα κοχύλια μυδιών αναμεμιγμένα με νερό ζάχαρης. Αυτή η πάστα υλικού φάνηκε να είναι πλήρως συμβατή για τρισδιάστατη εκτύπωση με την μέθοδο εξώθησης υλικού, αφότου έγινε και πειραματική εκτύπωση ενός αντικειμένου από αυτό το υλικό (βλ. Σχήμα 4-15). Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η δυνατότητα ανακύκλωσης του υλικού, καθώς ξεπερασμένα σχέδια ή αποτυχημένες εκτυπώσεις μπορούν εύκολα να διαλυθούν στο νερό και να επαναχρησιμοποιηθούν ως είσοδος σε νέα διαδικασία εκτύπωσης (βλ. Πίνακα 4-3).



(α)

(β)

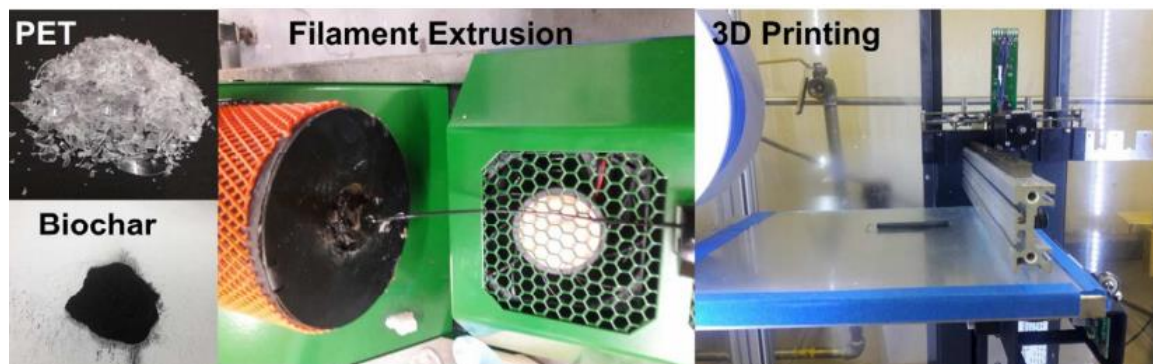
(γ)

Σχήμα 4- 55: (α) Η εξώθηση του υλικού (αλεσμένα κοχύλια με ζαχαρόνερο) ως βιοδιασπώμενο, οικολογικό υλικό για την ΠΚ, και προϊόντα εκτυπωμένα από βιοδιασπώμενο υλικό (β) καθαρή πρώτη ύλη (γ) ανακυκλωμένη πρώτη ύλη, υιοθετημένο από τους Sauerwein & Doubrovski (2018)

Πίνακας 4- 3: Σύγκριση ιδιοτήτων γνήσιου με ανακυκλωμένο υλικό, συγκεκριμένα μία πάστα αλεσμένων κοχυλιών με ζαχαρόνερο, υιοθετημένο από τους Sauerwein & Doubrovski (2018)

Ιδιότητα	Καθαρό υλικό	Ανακυκλωμένο υλικό
Χρώμα	Ανοιχτό καφέ	Ανοιχτό καφέ
Οσμή	Ελαφρώς αλμυρή	Ελαφρώς αλμυρή
Αντοχή στο νερό	Όχι	Όχι
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	11,3	12,6

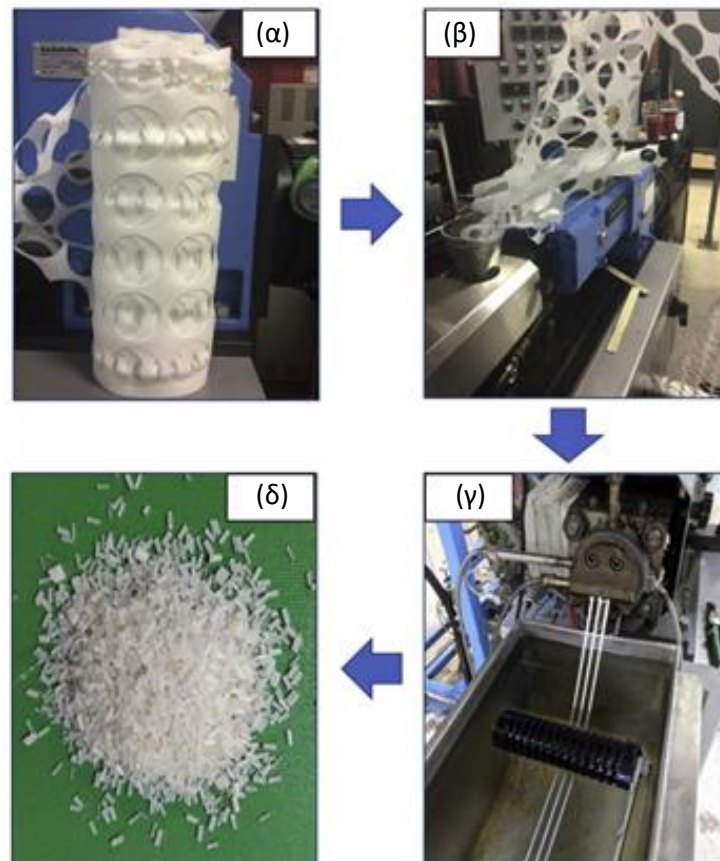
Επίσης εξαιρετικά καινοτόμα ήταν και η έρευνα των Idrees et al. (2018), η πρώτη έρευνα που εξέτασε την σύζευξη του biochar με ανακυκλωμένο PET (βλ. Σχήμα 4-17), για την τρισδιάστατη εκτύπωση αντικειμένων χαμηλού κόστους αλλά υψηλής περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, με ενισχυμένες θερμικές, μηχανικές και βιοελαστικές ιδιότητες. Αυτό το σύνθετο υλικό αποτελείται από αυτογενές biochar που συντίθεται σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση με 100% ανακυκλωμένο PET από πλαστικά μπουκάλια. Αν και το PET συνήθως παρουσιάζει μειωμένες επιδόσεις λόγω των μηχανικών του ιδιοτήτων, η ενίσχυση από το biochar οδηγεί σε αυξημένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες. Συμπερασματικά λοιπόν, το σύνθετο biochar/PET έχει εξαιρετικές ιδιότητες με καλές προοπτικές για την υιοθέτηση τους στην ΠΚ με εφαρμογές στην μηχανική και την αυτοκινητοβιομηχανία.



Σχήμα 4- 67: Η εξώθηση νήματος από PET και Biochar, και η χρήση του στην τρισδιάστατη εκτύπωση, υιοθετημένο από τους Idrees et al. (2018)

Οι Fahim et al. (2019) ανέπτυξαν ένα πρότζεκτ για μία καινοτόμα διαχείριση αποβλήτων και την παραγωγή βιοπλαστικού υλικού. Πρώτο βήμα ήταν η συλλογή φύρας καφέ και βαμβακιού, έπειτα μεταφέρθηκαν, διαχωρίστηκαν, αποθηκεύτηκαν και αξιοποιήθηκαν για την δημιουργία PLA, στο πλαίσιο της βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής ευαισθησίας. Στόχος της έρευνας λοιπόν είναι να εξελίξει τα σύγχρονα, βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή με τη χρήση ανανεώσιμων πρώτων υλών όπως τα γεωργικά απόβλητα. Ομοίως οι Cisneros-López et al. (2020), αξιοποίησαν φυσικές ίνες και υπολείμματα καφέ, για την παραγωγή νήματος PLA, στοχεύοντας σε βιώσιμη βιοσύνητη πρώτη ύλη (βλ. Σχήμα 4-18). Χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα για την ενίσχυση της ρεολογίας του PLA, και την θερμομηχανική απόδοση του παραγόμενου υλικού. Και από τις δύο έρευνες προκύπτει ότι η φύρα της καφεΐνης μπορεί να συμβάλει στην διαμόρφωση βιοπλαστικών από φυσικές ίνες, για την παραγωγή σύνθετων γεωμετρικά αντικειμένων, με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος. Ωστόσο χρειάζεται περαιτέρω μελέτη για να βελτιωθούν ακόμα περισσότερο οι ιδιότητες των βιοϋλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

Οι Thibaut et al. (2019) πρότειναν ως βιοϋλικό την αξιοποίηση της κυτταρίνης. Πρότειναν μία πάστα με περιεχόμενο 30% ίνες κυτταρίνης, 12.5% σύνθετο κεραμικό πλέγμα, και 57.5% αποσταγμένο νερό. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η κυτταρίνη έχει μεγάλες προοπτικές για την υιοθέτηση της στην ΠΚ, για την παραγωγή οικονομικών, ελαφριών, στιβαρών και ανακυκλώσιμων τεμαχίων. Τις προοπτικές της κυτταρίνης εξέτασαν και οι Cisneros-López et al. (2016). Πρόκειται για ένα σκληρό, ινώδες πολυμερές, αδιάλυτο στο νερό, που βρίσκεται άφθονο στην βιόσφαιρα και



Σχήμα 4-18: Παραγωγή νήματος PLA από φυσικές ίνες και υπολείμματα καφέ, υιοθετημένο από τους Cisneros-López et al. (2020), (α) φύρα PLA μετά τη βιομηχανική χρήση (β) διαδικασία εξώθησης (γ) παραγωγή νήματος σε δεξαμενή νερού (δ) ανακυκλωμένα κομματάκια PLA

μπορεί να εξαχθεί από φυτά, φύκια, βακτήρια, θαλάσσια ζώα και μύκητες. Χρησιμοποιείται και ως πρόσθετο σε άλλα βιοσύνθετα υλικά, για την ενίσχυση της κρυσταλλότητας και των θερμομηχανικών τους ιδιοτήτων.

Συμπερασματικά λοιπόν, υπάρχουν πολλές επιλογές για αξιοποίηση βιοδιασπώμενων υλικών, μη επιβλαβών προς το περιβάλλον (Hu et al., 2018). Δημοφιλής επιλογή φαίνεται να είναι τα βιοπλαστικά, καθώς είναι πλήρως οικολογικά και ταυτόχρονα έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα πλαστικά (Fahim et al., 2019) και ίδια μηχανική απόδοση (Ujeniya & Rachchh, 2019). Συνθέτονται κυρίως από βιομάζα, και μπορούν να αντικαταστήσουν τα πλαστικά με βάση το πετρέλαιο σε πολλές εφαρμογές (Hu et al., 2018). Με αυτό τον τρόπο μειώνεται όχι μόνο το αποτύπωμα του άνθρακα, αλλά και η εξάρτηση της βιομηχανίας από μη ανανεώσιμους πόρους για υλικά πρώτης ύλης (Cisneros-López et al., 2020).

Ωστόσο, ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής, είναι πως κάθε αντικείμενο μπορεί να παραχθεί μόνο με ένα υλικό, είτε είναι μέταλλο είτε πλαστικό είτε οποιοδήποτε άλλο. Η πραγματική δύναμη της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα αποδειχθεί όταν γίνει εφικτό να συνδυάζονται υλικά για το ίδιο αντικείμενο, δίνοντας την ευκαιρία κατασκευής ή επιδιόρθωσης οποιουδήποτε προϊόντος (Wilkinson & Core, 2015).

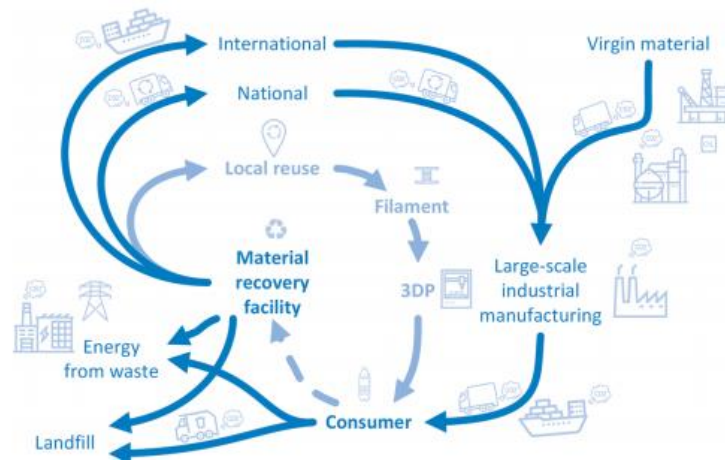
5. Κυκλική Οικονομία και Προσθετική Κατασκευή

Η ενότητα αυτή απαρτίζεται από πέντε επιμέρους υποενότητες. Στο 5.1 γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στις αρχές και την αξία της Κυκλικής Οικονομίας, καθώς και πως μπορεί να συμβάλει σε αυτή η τρισδιάστατη εκτύπωση. Έπειτα, αυτά τα σημεία τομής των δύο εννοιών, αναλύονται διεξοδικά. Στο 5.2 εξετάζονται οι προοπτικές της ανακύκλωσης, στο 5.3 παραθέτεται η επιλογή της επαναχρησιμοποίησης, και τέλος στο 5.4 υπογραμμίζεται η σπουδαιότητα της ανακατασκευής και επιδιόρθωσης.

5.1. Εισαγωγή

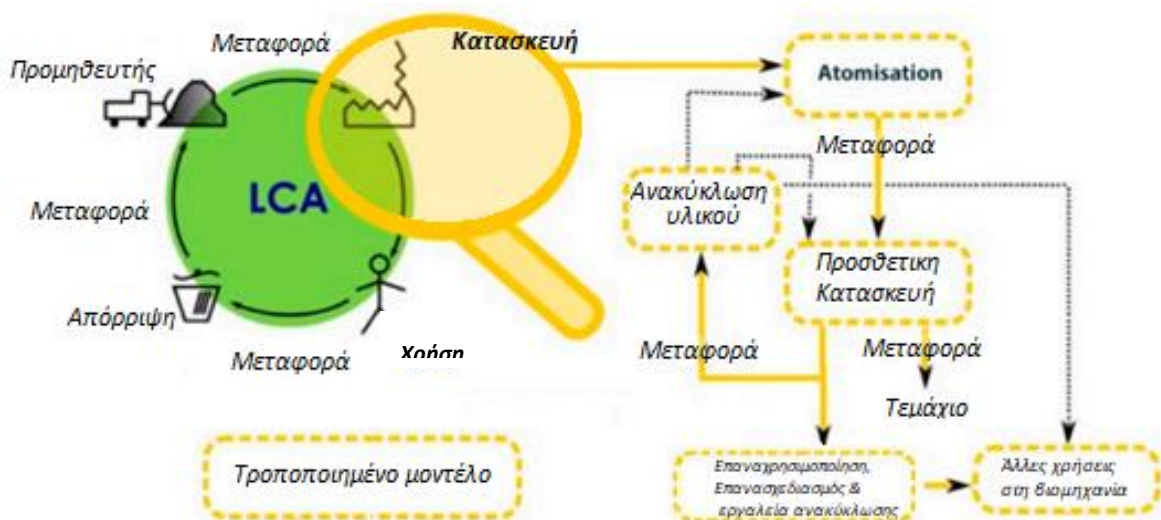
Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού, επέφερε εξίσου ραγδαία αύξηση στην ζήτηση πόρων και ενέργειας (Stolz & Mülhaupt, 2020). Σύμφωνα με το Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, μία από τις μεγάλες τάσεις που πρόκειται να απασχολήσουν την κοινωνικοοικονομική τάξη σχετικά με το περιβάλλον, είναι ονομαστικά «Περισσότερα από λιγότερα» (More from Less), δηλαδή οι κυβερνήσεις και οι επιχειρήσεις θα ανακαλύψουν νέους τρόπους εξασφάλισης της ποιότητας ζωής, διαχειριζόμενοι τους πολύ περιορισμένους φυσικούς πόρους (Giurco et al., 2014). Όσο λοιπόν αυξάνεται η κατανάλωση των αγαθών, αυξάνεται και η ζήτηση τους, και ως απόρροια, ο όγκος των προϊόντων στο τέλος της ζωής τους, με αδιαμφισβήτητα περιβαλλοντικές συνέπειες μεγάλου βεληνεκού (Lahrouf & Brissaud, 2018 ; Le et al., 2018). Ο τρόπος με τον οποίο διαχειρίζονται τα απόβλητα που προκύπτουν από γραμμικές ροές πόρων στο παρόν, επηρεάζει άμεσα τις προκλήσεις αλλά και ευκαιρίες του μέλλοντος. Τις τελευταίες δεκαετίες, τα απορρίμματα συνήθως διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής (βλ. Σχήμα 5-1-1) (Giurco et al., 2014).

Από όλα τα υλικά, τα πλαστικά είναι εκείνα με το μεγαλύτερο ρυθμό μαζικής παραγωγής, διότι είναι ανθεκτικό, ελαφρύ, πολύ ευέλικτο και όχι εύθραυστο, και οικονομικό στην χρήση του. Αυτή ακριβώς η ανθεκτικότητα του ωστόσο είναι που το καθιστά μία τεράστια απειλή για το περιβάλλον (Wu, 2019). Από τον καιρό που πρωτοάρχισε η παραγωγή με πλαστικό, εννέα δισεκατομμύρια τόνοι πλαστικού έχουν παραχθεί (Stephen et al., 2018). Το πλαστικό χρειάζεται από χρόνια έως και αιώνες για να αποσυντεθεί, με ορισμένα ήδη να μην αποσυντίθενται καθόλου, βαραίνοντας τα χερσαία αλλά και θαλάσσια οικοσυστήματα, δηλαδή την χλωρίδα και την πανίδα, τους ωκεανούς και την άγρια ζωή (Wu, 2019 ; Garmulewicz et al., 2018). Η Ευρωπαϊκή Ένωση προσεγγίζει το ζήτημα της πλαστικής ανακύκλωσης από μία άλλη οπτική γωνία, θέλοντας να αναπτύξει το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας για τα πλαστικά. Συγκεκριμένα, πάνω από το 50% των παραγόμενων πλαστικών απορριμμάτων αναμένεται να έχει ανακυκλωθεί, μέχρι το 2030. Για να επιτευχθεί αυτός ο φιλόδοξος στόχος, πρέπει να εφευρευθούν νέοι τρόποι για ανακύκλωση, περιορίζοντας ταυτόχρονα και τους περιβαλλοντικούς κινδύνους που ελλοχεύουν από την απόρριψη πλαστικών (Santander et al., 2020).



Σχήμα 5-1- 1: Οι ροές των υλικών σε τοπικό, εθνικό, και παγκόσμιο επίπεδο, υιοθετημένο από τους Garmulewicz et al. (2018)

Επομένως, είναι ζωτικής ανάγκης να αναπτυχθούν αποδοτικές πρακτικές για την διαχείριση αυτών των μη χρήσιμων πλέον προϊόντων (Le et al., 2018), ώστε να μειωθούν τα απόβλητα και η κατανάλωση των φυσικών πόρων (Lahrour & Brissaud, 2018). Ένα από τα εργαλεία για την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών και των προϊόντων είναι η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA). Το LCA είναι η συστηματική ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την κατασκευή, τη χρήση, τη συντήρηση και τελικά την απόρριψη του (Löschke et al., 2019), δηλαδή αξιολογεί σε διάφορα στάδια (συντήρηση, επιδιόρθωση, ανακυκλωσιμότητα, επαναχρησιμοποίηση, ανακατασκευή, αποσύνθεση) την βιωσιμότητα ενός αντικειμένου (βλ. Σχήμα 5-1-2) (Daraban et al., 2019). Εδώ αναδύεται λοιπόν η εξής ανάγκη: αντί για την απλή μετάβαση της ευθύνης της διαχείρισης των



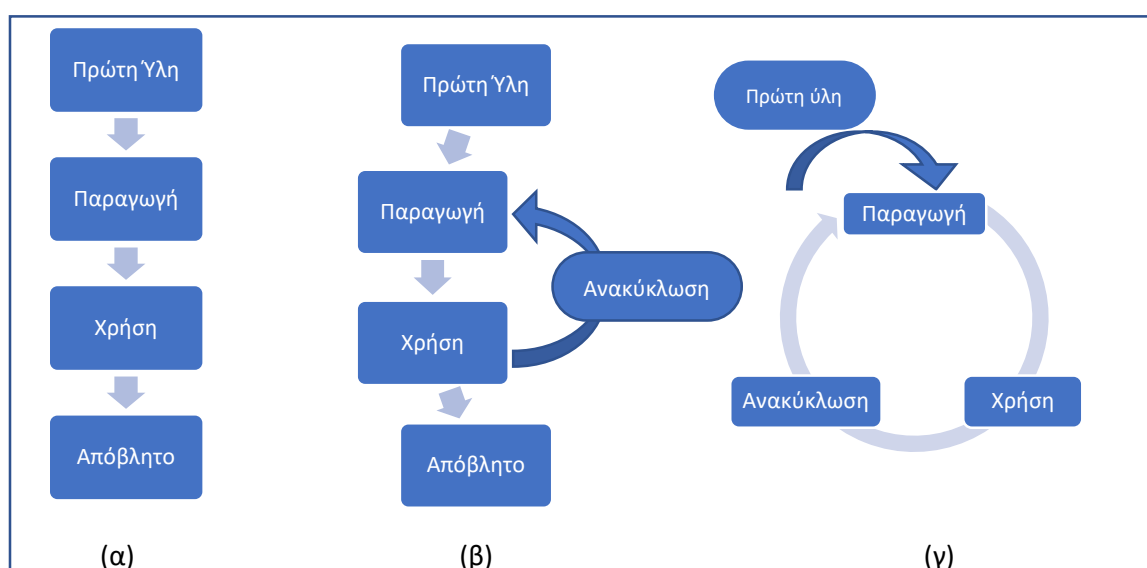
Σχήμα 5-1- 2: Παράδειγμα της Αξιολόγησης του κύκλου ζωής στην Προσθετική Κατασκευή, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019)

αποβλήτων στο τέλος της ζωής τους, απαιτούνται πιο ουσιαστικές λύσεις για την βιωσιμότητα και την προστασία του περιβάλλοντος (Peeters et al., 2019). Η υιοθέτηση ενός μοντέλου Κυκλικής Οικονομίας, είναι μία από αυτές τις λύσεις. Στοχεύει στην απόρριψη του τρέχοντος βιομηχανικού

μοντέλου «Make-Use-Dispose» και τη μετάβαση σε ένα μοντέλο παράλληλης δημιουργίας και αποκατάστασης (Lahrouf & Brissaud, 2018).

Η κυκλική οικονομία προσελκύει το ενδιαφέρον ως μία προοπτική για μια πιο ευήμερη κοινωνία, με μείωση της εξάρτησης από τα πρωτογενή υλικά και ενέργεια (Pavlo et al., 2018). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναφέρει «Στην Κυκλική Οικονομία, η αξία των προϊόντων και των υλικών διαρκεί για όσο γίνεται περισσότερο. Τα απόβλητα και η χρήση των πόρων ελαχιστοποιούνται, και όταν ένα προϊόν φτάνει στο τέλος της ζωής του, χρησιμοποιείται ξανά για την δημιουργία περαιτέρω αξίας. Αυτό μπορεί να επιφέρει μεγάλα οικονομικά οφέλη, συμβάλλοντας στην καινοτομία, την ανάπτυξη και την δημιουργία εργασίας» (Sundqvist & Samarjy, 2019). Το Ellen MacArthur Foundation ορίζει την κυκλική οικονομία ως «ένα βιομηχανικό σύστημα που είναι αποκαταστατικό ή αναγεννητικό από πρόθεση και σχεδιασμό» (Pavlo et al., 2018). Η φιλοσοφία της κυκλικής οικονομίας εμφανίσθηκε από έναν ακαδημαϊκό ασιατικής καταγωγής περί το 1998 προκειμένου να μειωθεί η αντίθεση μεταξύ ταχείας οικονομικής ανάπτυξης και απερισκεπτη κατανάλωση πόρων και ενέργειας (Zhong & Pearce, 2018).

Σε γενικές γραμμές λοιπόν, η κυκλική οικονομία είναι ένα οικονομικό μοντέλο για παραγωγή και κατανάλωση κλειστού βρόγχου, όπου τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως πηγές μεγάλης αξίας και η οικονομική ανάπτυξη δεν σημαίνει αλόγιστη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων (Garmulewicz et al., 2018), στοχεύοντας μάλιστα στην ελαχιστοποίηση της χρήσης τους (βλ. Σχήμα 5-1-3) (Rahito et al., 2019). Εστιάζει σε όλη την διάρκεια ζωής ενός υλικού, από την στιγμή που είναι πρώτη ύλη έως την αξιοποίηση του στη παραγωγική διαδικασία, την διάθεση του στους καταναλωτές και την τελική χρήση του, λαμβάνοντας υπόψιν την αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα όπου προϊόντα στο τέλος της ζωής τους ξαναεισάγονται ως πρώτη ύλη σε έναν νέο κύκλο ζωής (εφοδιαστική κλειστού βρόγχου) (Turner et al., 2019 ; Zhong & Pearce, 2018). Αποτελεί δηλαδή μια εξαιρετική λύση ούτως ώστε το υλικό και η ενέργεια του να χρησιμοποιηθεί σε πολλαπλές φάσεις στην ροή της ζωής του (Pavlo et al., 2018 ; Lahrouf & Brissaud, 2018). Γενικά λοιπόν, η κυκλική οικονομία χαρακτηρίζεται από κλειστούς βρόγχους, συντήρηση, επαναχρησιμοποίηση, ανακατασκευή και ανακύκλωση (Garmulewicz et al., 2018 ; Pavlo et al., 2018).



Σχήμα 5-1- 3: Η Σύγκριση Γραμμικής (α), Επαναχρησιμοποιητικής (β) και Κυκλικής (γ) οικονομίας, υιοθετημένη από τους Wu & Wu (2019)

Ένας από τους ακρογωνιαίους λίθους στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας, είναι ο σχεδιασμός των προϊόντων (Giurco et al., 2014). Ο σχεδιασμός, οφείλει να γίνει με ορισμένες αξίες, όπως: (1) Ανθεκτικότητα. Πρέπει να επιτευχθεί η μέγιστη αξιοπιστία και αντοχή του εξαρτήματος, να λειτουργούν όλη τη καθορισμένη διάρκεια ζωής τους χωρίς να παρουσιάζουν βλάβες εφόσον συντηρούνται σωστά. (2) Αναβάθμιση και προσαρμοστικότητα. Τα προϊόντα πρέπει να ενσωματώνουν επιλογές για επέκταση και τροποποίηση ώστε να συνεχίσουν να είναι χρήσιμα υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες και για τη βελτίωση της ποιότητας, της αξίας, της αποτελεσματικότητας και της απόδοσης. (3) Τυποποίηση και συμβατότητα. Τα προϊόντα πρέπει να απαρτίζονται από εξαρτήματα που ταιριάζουν σε άλλα προϊόντα (4) Αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα και τα ανταλλακτικά μπορούν να διαχωριστούν και να επανασυναρμολογηθούν εύκολα, τόσο για την αύξηση των μελλοντικών ποσοστών επαναχρησιμοποίησης υλικών και εξαρτημάτων όσο και για τη διευκόλυνση του διαχωρισμού υλικών που εισέρχονται σε διαφορετικούς κύκλους προϊόντων μέσω π.χ. επισκευής ή ανακατασκευής. (5) Ανακύκλωση. Τα προϊόντα πρέπει να υποστηρίζουν την ανάκτηση υλικών τους για τη δημιουργία συνεχών ροών πόρων, και να μην ελαττώνεται η ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών. (Sauerwein et al., 2019)

Πολλοί οργανισμοί έχουν θέσει ως στόχο να γίνουν οντότητες Μηδενικής Σπατάλης (Zero-Waste, ZW), δηλαδή καθόλου υλικό να μην απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής (βλ. Σχήμα 5-1-4) (Clemont & Zohdi, 2018). Προς αυτή την κατεύθυνση, για παράδειγμα στον κατασκευαστικό τομέα και την φύρα του σκυροδέματος, το CAM for Buildings δηλώνει τα εξής υποχρεωτικά μετρά: (1) τουλάχιστον το 15% του συνολικού βάρους των χρησιμοποιημένων υλικών, να προέρχεται από ανακύκλωση (2) τουλάχιστον το 50% των κατασκευασμένων αντικειμένων να είναι σχεδιασμένο για εύκολη αποσυναρμολόγηση (3) τουλάχιστον το 70% των αποβλήτων αντί να απορρίπτεται σε



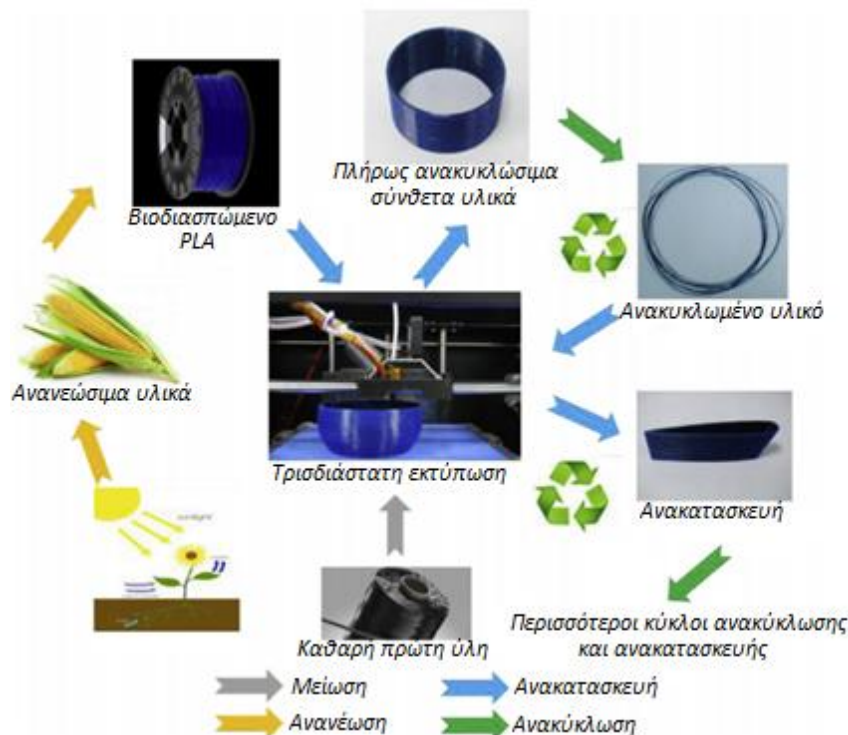
Σχήμα 5-1- 4: Το μοντέλο της Κυκλικής Οικονομίας σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη εκτύπωση, από την εταιρεία HP, υιοθετημένο από τους McIntyre & Ortiz (2015)

χώρο υγειονομικής ταφής να αξιοποιείται σε άλλες εφαρμογές, παραδείγματος χάρη επαναχρησιμοποίηση του τσιμέντου σε μικρά έργα τοιχοποιίας και λουπά (Altamura & Baiani, 2019). Σε αυτό το πλαίσιο κινείται και η ομάδα του πρότζεκτ «Additive Manufacturing Aiming Towards Zero Waste and Efficient Production of High-Tech Metal Products AMAZE», ένα εγχείρημα 6,5 ετών χορηγούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Peng et al., 2018).

Ανάμεσα στις αξίες του σχεδιασμού για το περιβάλλον, είναι και οι: (1) Ενεργειακή αποδοτικότητα, δηλαδή η μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή και χρήση των προϊόντων (2) Καινοτόμα υλικά, δηλαδή η μείωση της χρήσης των πόρων του περιβάλλοντος και η χρήση υλικών με μειωμένο αρνητικό αποτύπωμα στο περιβάλλον (3) Σχεδιασμός για επαναχρησιμοποίηση, δηλαδή η σχεδίαση προϊόντων με γνώμονα την αξιοποίηση τους στο τέλος της ζωής τους, με εύκολη αναβάθμιση ή ανακύκλωση (McIntyre & Ortiz, 2015). Η αναφορά του Factory of the Future, υπογράμμισε την αξία της μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας και της παραγωγής αποβλήτων προς την υιοθέτηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Wilkinson & Core, 2015).

Τα πλεονεκτήματα της Προσθετικής Κατασκευής σχετικά με το περιβάλλον, αναλύθηκαν εύστοχα από τους Peng et al. (2018): (1) Μειωμένη ποσότητα απαιτούμενης πρώτης ύλης κατά την εφοδιαστική αλυσίδα (2) Μειωμένη ανάγκη για παραγωγικές διαδικασίες που απαιτούν πολλή ενέργεια, μολύνουν το περιβάλλον και καταλήγουν σε μεγάλη ποσότητα ανεκμετάλλευτου υλικού (3) Πιο αποδοτικός και ευέλικτος σχεδιασμός προϊόντων με καλύτερη λειτουργία και απόδοση (4) Μειωμένο βάρος κατά τη μεταφορά των αντικειμένων άρα μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα (5) Αποκεντρωμένη παραγωγή ανταλλακτικών εξαρτημάτων, σε πιο κοντινή απόσταση στο σημείο ενδιαφέροντος – κατανάλωσης.

Η προσθετική κατασκευή διαμέσου των ψηφιακών εργαλείων κατασκευής προτείνεται ως ένα εργαλείο προς την διαχείριση των αποβλήτων, επηρεάζοντας επομένως άμεσα την προοπτική



Σχήμα 5-1- 5: Ο κύκλος ζωής ενός νήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, βάσει των αρχών της Κυκλικής Οικονομίας, υιοθετημένο από τους Tian et al. (2017)

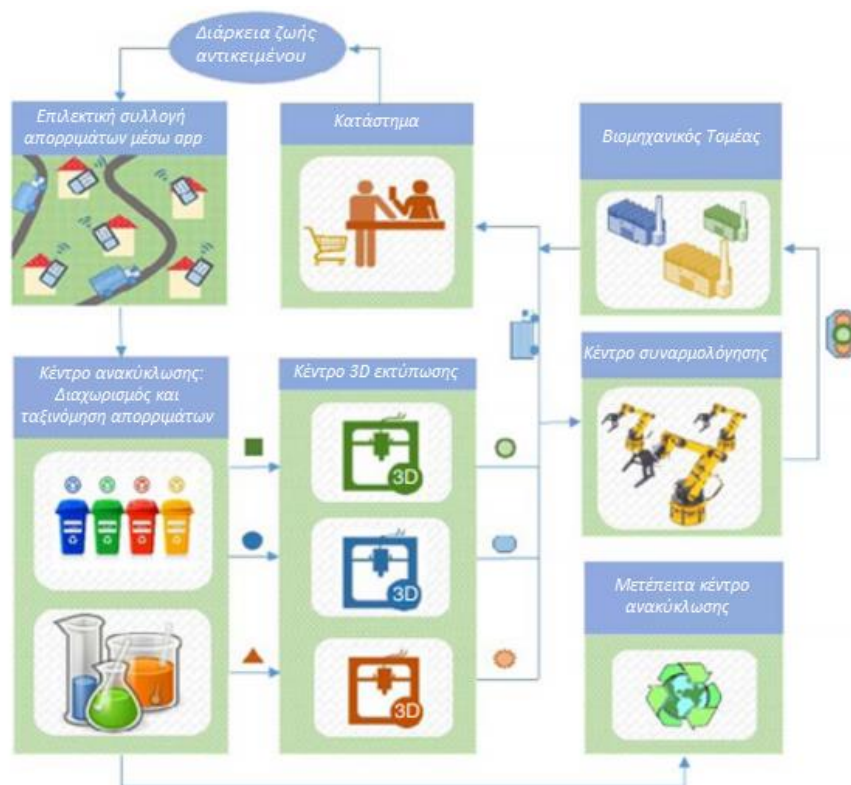
υιοθέτησης ενός μοντέλου κυκλικής οικονομίας (Wu, 2019). Η ΠΚ χρησιμοποιεί τα υλικά με εξαιρετικά αποδοτικό τρόπο, σε αντίθεση με την παραδοσιακή κατασκευή που το μείζον ζήτημα είναι η παραγωγή αποβλήτων και η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (Gandha et al., 2019 ; Damanhuri et al., 2019). Για παράδειγμα, ενισχύεται η προσέγγιση της κυκλικής οικονομίας για την ανακύκλωση και αξιοποίηση των μη χρήσιμων πια υλικών ως τροφοδοσία για τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης (Peeters et al., 2019). Η προσθετική κατασκευή πρέπει να παράγει προϊόντα, κατά τις αρχές της μείωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης (3Rs: Reduce – Reuse – Recycle), δηλαδή μείωση της χρήσης τοξικών υλικών και καθαρής πρώτης ύλης, επαναχρησιμοποίηση των εκτυπωμένων αντικειμένων και των αποβλήτων, ανακύκλωση των αντικειμένων, χρησιμοποιώντας κατάλληλα ανακυκλώσιμα, κομποστοποιημένα ή βιοδιασπώμενα υλικά (Behm et al., 2018).

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, δεν πρέπει να γίνει προτού ληφθούν υπόψιν και τα περιβαλλοντικά ή κοινωνικά κόστη (Behm et al., 2018). Παρά τα οφέλη και τις προοπτικές της ΠΚ, ακόμα και η ίδια η μέθοδος μπορεί να παράξει σημαντικό μέγεθος απορριμμάτων (Anderson, 2017 ; Lanzotti et al., 2018). Η παραγωγή αποβλήτων συνήθως μεγιστοποιείται όταν χρησιμοποιείται η τρισδιάστατη εκτύπωση για μαζική παραγωγή μεγάλης κλίμακας, κατά την οποία θέτονται σε εφαρμογή πολλά συστήματα ΠΚ ταυτόχρονα (Kumar & Czekanski, 2017). Συχνά μπορεί να παραχθούν αποτυχημένα τεμάχια λόγω σφάλματος στον εκτυπωτή , να χρησιμοποιηθούν υποστηρικτικές δομές για περίπλοκες γεωμετρίες (Behm et al., 2018), ή να κατασκευασθεί κάποιο πρωτότυπο που έπειτα δεν χρησιμοποιείται κάπου και απορρίπτεται σαν απόβλητο (Anderson, 2017 ; Lanzotti et al., 2018). Εκτός αυτού, παράγονται επιβλαβείς εκπομπές με τη μορφή εξαιρετικά λεπτών σωματιδίων και οργανικών ενώσεων, ιδιαίτερα επικίνδυνο για εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους σε γραφεία ή σπίτια. (Behm et al., 2018). Είναι ζωτικής σημασίας να αντιμετωπισθούν αυτά τα ζητήματα, για παράδειγμα, στις υποστηρικτικές δομές, το βοηθητικό υλικό μπορεί να είναι από οργανική ή ανακυκλώσιμη ύλη, άρα να είναι εύκολα προσβάσιμη αλλά και μη επιβλαβής προς το περιβάλλον (Wilkinson & Cope, 2015).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση λοιπόν είναι μία καλή λύση για την αντιμετώπιση του μεγάλου προβλήματος της διαχείρισης των αποβλήτων (Garmulewicz et al., 2018 ; Wu, 2019), καθώς είναι μια χαμηλού κόστους και διαθέσιμη τεχνολογία (Mohammed et al., 2019). Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των Nascimento et al. (2019), με ενδελεχή ανασκόπηση στην Κυκλική Οικονομία, τις αρχές τις, και το πως μπορεί να ενσωματωθεί σε αυτήν η τρισδιάστατη εκτύπωση, μέσω της Βιομηχανίας 4.0. Η κουλτούρα της ανακύκλωσης μέσω Προσθετικής Κατασκευής στην Βιομηχανία 4.0, θα επιφέρει αυτοματισμό στις συμβατικές διαδικασίες, αφήνοντας περισσότερο χώρο στα ενδιαφερόμενα μέρη να ασχοληθούν με την έρευνα, την ανάπτυξη και την καινοτομία. Επαναχρησιμοποιώντας φαινομενικά μη χρήσιμα υλικά για την δημιουργία νέων αντικειμένων, μειώνεται δραστικά η ρύπανση του περιβάλλοντος καθώς και η κατανάλωση πόρων, και διάφορα επιβλαβή υλικά παραμένουν στην παραγωγική διαδικασία αντί να μολύνουν τα οικοσυστήματα με την απόρριψή τους σε χωματερές και την κατάληξη τους στους ωκεανούς (Nascimento et al. 2019).

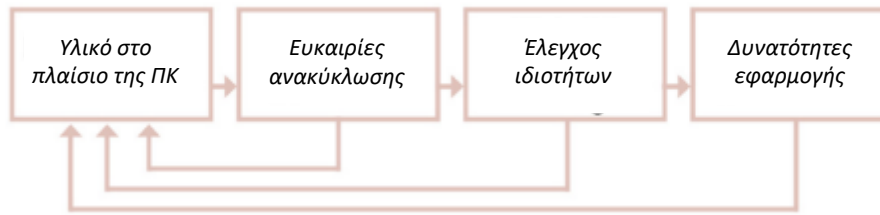
Συνοπτικά, οι φάσεις του προτεινόμενου μοντέλου Nascimento et al. (2019) έχουν ως εξής: (1) Συλλογή των απορριμμάτων μέσω εφαρμογής. Σε μία βάση δεδομένων τύπου cloud, μπορούν να καταχωρούνται σε πραγματική ώρα το μέγεθος και το είδος των αποβλήτων και τα σημεία που βρίσκονται ώστε η συλλογή των απορριμμάτων να είναι στοχευμένη ανάλογα με αυτά τα

δεδομένα, με φορτηγά αντίστοιχης δυναμικότητας και ανάλογα την εκάστοτε ανάγκη, διότι ένα μοναδικό όχημα για κάθε τύπο αποβλήτου δεν είναι αποδοτική λύση. (2) Ταξινόμηση των απορριμμάτων, κατά βάση σε πλαστικό, μέταλλο, ξύλο και γυαλί, υλικά που και τα τέσσερα μπορούν να αξιοποιηθούν για την τρισδιάστατη εκτύπωση. (3) Διαχείριση των απορριμμάτων, δηλαδή η μετατροπή τους από υλικά ταξινομημένα στις τέσσερις προαναφερθείσες κατηγορίες, σε υλικά σε συμβατή μορφή με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μετατροπή σε νήμα ABS ή PLA, ή η κοκκοποίηση του μετάλλου σε πούδρα. (4) Τρισδιάστατη εκτύπωση του αντικειμένου, συναρμολόγηση εξαρτημάτων αν χρειάζεται, και διάθεση του στην αγορά. Επομένως, αφότου αγορασθεί από τον καταναλωτή και χρησιμοποιηθεί για την ωφέλιμη ζωή του, η διαδικασία επαναλαμβάνεται (βλ. Σχήμα 5-1-5).



Σχήμα 5-1-5: Το προτεινόμενο μοντέλο Κυκλικής Οικονομίας μέσω της Βιομηχανίας 4.0 και της προσθετικής κατασκευής, υιοθετημένο από τους Nascimento et al. (2019)

Η μελέτη των Sauerwein & Doubrovski (2018) αποσκοπεί στην υποστήριξη της ανάπτυξης τρισδιάστατων εκτυπώσιμων υλικών για μια κυκλική οικονομία. Στη φάση «Υλικό στο πλαίσιο της ΠΚ» (βλ. Σχήμα 5-1-6), οι προοπτικές της πρώτης ύλης αναλύονται σε σχέση με την προσθετική κατασκευή. Όταν λαμβάνεται ένα επεξεργάσιμο υλικό, διερευνώνται οι «ευκαιρίες ανακύκλωσης», καθώς το θέμα δεν είναι μόνο η δημιουργία ενός υλικού για παραγωγή, αλλά και η εγγύηση της ανακυκλωσιμότητας και την επαναχρησιμοποίησής του. Κατά τη διάρκεια της «έλεγχος ιδιοτήτων» ελέγχονται με δοκιμές τα χαρακτηριστικά του ανεπτυγμένου υλικού. αρχικά στοιχειώδες και πιο συγκεκριμένα σε μεταγενέστερο στάδιο. Κατά τη διάρκεια των «δυνατοτήτων εφαρμογής», οι εφαρμογές προϊόντων διερευνούνται για να προσδιορίσουν έναν ουσιαστικό σκοπό του ανεπτυγμένου υλικού. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε ανάπτυξη υλικού ΠΚ μπορεί να ξεκινήσει από μια διαφορετική φάση.



Σχήμα 5-1-6: Σχηματική απεικόνιση της προσέγγισης των Sauerwein & Doubrovski (2018) για την Κυκλική Οικονομία

5.2. Ανακύκλωση

Η παρούσα υπόενοτητα δομείται ως εξής. Στο 5.2.1 γίνεται μία σύντομη γενική εισαγωγή στην ανακύκλωση, έπειτα στο 5.2.2 αναλύεται το μοντέλο της κατανεμημένης κατασκευής, και τέλος στο 5.2.3 γίνεται εις βάθος μελέτη της ανακύκλωσης αντικειμένων στο τέλος της ζωής τους διαφόρων υλικών.

5.2.1. Γενικά

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας ΠΚ, αναπτύσσεται και η γνώση περί της συστημικής ανακύκλωσης των αποβλήτων από την ΠΚ (Peeters et al., 2019). Η όλο και περισσότερο αύξηση της γέννησης αποβλήτων είναι ένα θέμα που απασχολεί την κοινότητα, με την καλύτερη λύση για τις ανεπτυγμένες χώρες να είναι η ανακύκλωση (βλ. Σχήμα 5-2-1) (Stephen et al., 2018). Η διαδικασία της ανακύκλωσης πραγματοποιείται όταν ένα προϊόν δεν μπορεί πλέον να συνεισφέρει με οποιοδήποτε άλλο τρόπο για την οποιαδήποτε λειτουργία, και πρέπει είτε να απορριφθεί είτε να αξιοποιηθεί με άλλον τρόπο για να αλλάξει πλήρως η τρέχουσα κατάσταση του (Wu & Wu, 2019).



Σχήμα 5-2-1: Προωθητική «κάρτα» για την αξία της ανακύκλωσης στο πλαίσιο της στρατηγικής για την Κυκλική Οικονομία, υιοθετημένη από τους Sauerwein et al. (2019)

Σχετικά με το πλαστικό, η ανακύκλωση εμπεριέχει τέσσερα κύρια είδη διαδικασιών: (1) πρωτογενής (2) δευτερογενής (3) τριτογενής και (4) τεταρτογενής ανακύκλωση (Pavlo et al., 2018 ; Singh et al., 2019). Η πρωτογενής ανακύκλωση αφορά τα μη μολυσμένα, μονού τύπου πλαστικά, με σκοπό να έχουν τις ίδιες ιδιότητες με το αμόλυπτο, γνήσιο πλαστικό. Η δευτερογενής, αφορά τα «μολυσμένα» πλαστικά, αποσκοπώντας στο να έχουν όσο πιο κοντινή απόδοση γίνεται στα γνήσια πλαστικά. Στην τριτογενή ανακύκλωση, τα πλαστικά απόβλητα αποπολυμερίζονται, για την ανάκτηση των μονομερών τους, μέσω χημικής ή θερμικής ανακύκλωσης. Τέλος, η τεταρτογενής πραγματοποιείται όταν καμία από τις προηγούμενες μεθόδους δεν γίνεται να πραγματοποιηθεί, κυρίως διότι έχουν πραγματοποιηθεί πολλοί κύκλοι ανακύκλωσης και έχουν χαθεί οι ιδιότητες του πλαστικού, επομένως ανακτάται η ενέργεια μέσω αποτέφρωσης.

Οι δύο πρώτες μέθοδοι εφαρμόζονται ευρέως, και είναι συνδεδεμένες με την λεγόμενη μηχανολογική ανακύκλωση (Pavlo et al., 2018). Στην μηχανική ανακύκλωση, τα στάδια που ακολουθούνται για την παραγωγή του τελικού ανακυκλωμένου υλικού είναι διαχωρισμός, πλύσιμο, λείανση, αναδιαμόρφωση και επαναχρησιμοποίηση (Pavlo et al., 2018), χωρίς να αλλάξει η χημική τους σύσταση (Charles et al., 2019 ; Zander, 2019 ; Domingues et al., 2017). Η τρίτη μέθοδος θεωρείται στην κατηγορία της χημικής ανακύκλωσης, όπου γίνεται η αποδόμηση του πολυμερούς στα συστατικά του, σε δομές μικρότερου μοριακού βάρους, δηλαδή ανακτά τα μεμονωμένα χημικά συστατικά για να τα επαναχρησιμοποιήσει ως χημικά ή για την παραγωγή νέων πλαστικών (Paciorek-Sadowska et al., 2019; Charles et al., 2019 ; Domingues et al., 2017 ; Zander, 2019). Η αποτέφρωση ωστόσο, αν και ανακτά την χημική ενέργεια των αποβλήτων σε μορφή θερμικής ενέργειας, δεν θεωρείται αποδεκτός τρόπος ανακύκλωσης (Zander, 2019 ; Domingues et al., 2017).

Η μείωση των αποβλήτων υλικών κατά τη διαδικασία και την ανακύκλωση είναι και τα δύο πλεονεκτήματα για τις κυκλικές οικονομίες, επομένως η βιομηχανική οικολογία ενθαρρύνει τη δημιουργία συνεργιών μεταξύ βιομηχανικών τομέων και θεωρεί τα απόβλητα ως άφθονο και δωρεάν πόρο (Wu & Wu, 2019). Η ανακύκλωση πρέπει να γίνει ανάγκη και όχι επιλογή (Giurco et al., 2014). Το πως η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να συμβάλλει στην νοοτροπία της εκμετάλλευσης της αξίας των υλικών και την διαχείριση των αποβλήτων, είναι ένα ζήτημα που ελκύει το ενδιαφέρον των ερευνητών. Καθώς η ΠΚ καθίσταται όλο και πιο δημοφιλής, είναι πιθανό να αυξηθεί η ανταλλαγή υλικών, προϊόντων και πληροφοριών που σχετίζονται με εκτυπωτές 3D. Τα επιχειρηματικά μοντέλα μπορούν να εξελιχθούν γύρω από τις διάφορες διαδικασίες στην αλυσίδα εφοδιασμού παραγωγής (Wu, 2019). Για παράδειγμα, οργανισμοί όπως ο Ethical Filament Foundation συνεργάζονται με τοπικούς συλλέκτες απορριμμάτων, βιομηχανίες και επιχειρηματίες για την εκμετάλλευση των τοπικών αποβλήτων ως πόρους υψηλής αξίας για την παραγωγή πρώτης ύλης για την ΠΚ (Garmulewicz et al., 2018). Η ανακύκλωση δεν επηρεάζει μόνο το μέγεθος και την τοποθεσία της παραγωγής, αλλά και τα κέντρα αξίας στην αλυσίδα παραγωγή – κατανάλωση. Επίσης, δίνεται ευκαιρία σε νέες μορφές παραγωγής, όπως η ΠΚ, με προοπτικές για κατανομημένη και προσαρμοσμένη παραγωγή αντί για μαζική (Giurco et al., 2014). Καθώς τα προϊόντα γίνονται όλο και περισσότερο κατασκευασμένα σε τοπική κλίμακα, η αποκεντροποιημένη διάθεση των αντικειμένων θα γίνεται πιο συχνή (Wu, 2019).

Εκτός αυτών, η ΠΚ χρησιμοποιείται ως μέθοδος ανακύκλωσης, διότι δύναται να χρησιμοποιήσει υλικά όπου αποτελούνται ή εμπεριέχουν σε ένα βαθμό ανακυκλώσιμα συστατικά, με τόσο περιβαλλοντικό όσο και οικονομικό πλεονέκτημα. (Alkadi et al., 2019). Η ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων επίσης σε νήματα τροφοδοσίας για την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένας τρόπος

για την μείωση της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και την μείωση της περιβαλλοντικής μόλυνσης (Lee et al., 2019). Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά τέτοια παραδείγματα από πρωτογενή και δευτερογενή πολυμερή, και την ανακύκλωσή τους σε τροφοδοτικό νήμα (Turku et al., 2018). Στην συνέχεια λοιπόν, ακολουθούν δύο υποκεφάλαια για την προσέγγιση του ζητήματος της ανακύκλωσης μέσω της προσθετικής κατασκευής. Στο 6.2. παραθέεται το μοντέλο της κατανεμημένης κατασκευής, και ως απόρροια αυτής, την κατανεμημένη ανακύκλωση, και στο 6.3. αναλύονται μέθοδοι και εφαρμογές της ανακύκλωσης προϊόντων διάφορων υλικών στο τέλος της ζωής τους.

5.2.2. Κατανεμημένη Κατασκευή

Η τεχνολογική εξέλιξη πρόκειται να προσθέσει νέες δυνατότητες και να αλλάξει τα δεδομένα στους κατασκευαστικούς τομείς. Στο επίπεδο των συστημάτων παραγωγής, αναγνωρίστηκε η δυνατότητα "ανακύκλωσης – upcycle " απορριμμάτων πλαστικών σε νέα τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα με την ενσωμάτωση διαδικασιών ανακύκλωσης μέσω της αποτελεσματικής χρήσης τοπικών δομών παραγωγής (Garmulewicz et al., 2018). Επομένως, πλέον υπάρχουν μεγάλες προοπτικές στην ανακύκλωση των αντικειμένων, τοπικά σε κλειστούς βρόγχους (Cunico et al., 2019).

Σε αυτή την υποενότητα λοιπόν, εξετάζονται αυτές οι δύο πτυχές της κατανεμημένης κατασκευής. Πρώτον, η νέα τάση στις βιομηχανίες για κατανεμημένη ανακύκλωση, και έπειτα οι κλειστοί βρόγχοι των αποκεντρωμένων δομών ανακύκλωσης.

5.2.2.1 Κατανεμημένη Ανακύκλωση

Πριν αναλυθεί η φιλοσοφία της κατανεμημένης ανακύκλωσης καθώς και της ωφέλειας της στην κυκλική οικονομία, είναι απαραίτητη μια σύντομη εισαγωγή στην κατανεμημένη παραγωγή, ένα βήμα δηλαδή πριν την κατανεμημένη ανακύκλωση.

Η εξέλιξη στην τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, έχει οδηγήσει στην εμφάνιση νέων ευκαιριών, αναπτύσσοντας έναν τομέα «κατανεμημένης κατασκευής» (distributed manufacturing), ιδιαίτερα ανταγωνιστικό από άποψη κόστους (Santander et al., 2020). Η κατανεμημένη κατασκευή πρόκειται ουσιαστικά για μία αποκεντρωμένη, τοπική παραγωγή, με την συμβολή των αναδυόμενων ψηφιακών δυνατοτήτων κατασκευής, τις τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών, και της «peer-production» προσέγγισης (αυτόνομη επιλογή των συμμετεχόντων για το ποιος θα αναλάβει κάθε διεργασία, αρθρωτός σχεδιασμός) (Pavlo et al., 2018). Η παραγωγή δηλαδή γίνεται απευθείας από τους καταναλωτές τοπικά, έναντι της μαζικής, κεντροποιημένης βιομηχανικής παραγωγή προϊόντων, πράγμα που έχει σημαντικά οικονομικά οφέλη (Reich et al., 2019 ; Dertinger et al., 2020).

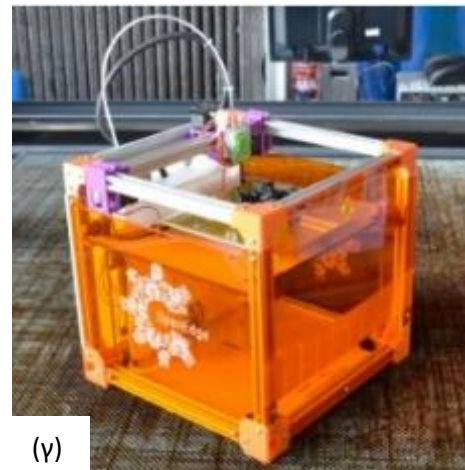
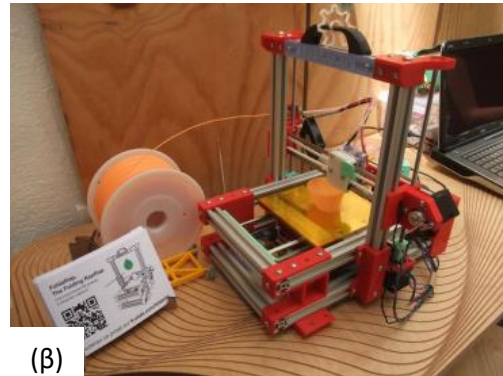
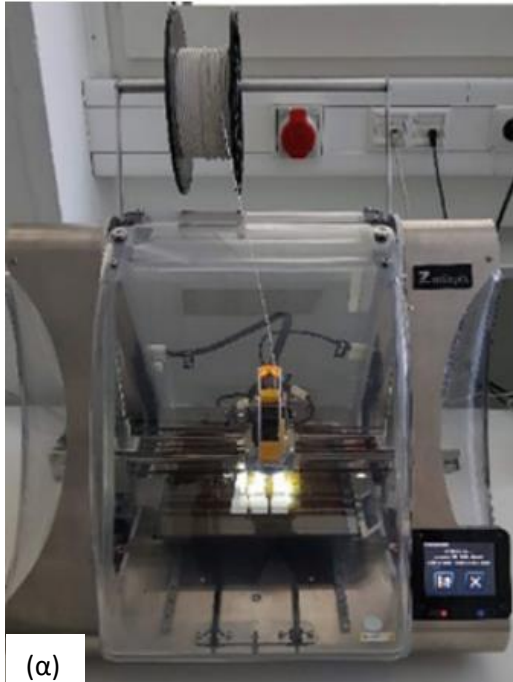
Τα κύρια πλεονεκτήματα της είναι η μεγάλη ευελιξία για την ικανοποίηση των αναγκών προσαρμοσμένα στον εκάστοτε τοπικό καταναλωτή - κατασκευαστή, τα μειωμένα κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, οι μικροί χρόνοι παράδοσης (Santander et al., 2020 ; Pavlo et al.,

2018), και σύμφωνα με τους Giurco et al. (2014), η παραμετροποίηση (customization), η αυτοματοποίηση και η εντατικοποίηση των δεδομένων (data intensive), πρόκειται να στιγματίσει την κατασκευαστική διαδικασία τον αιώνα που διανύουμε. Αυτά τα πλεονεκτήματα ωστόσο δεν είναι αποκλειστικά προς όφελος της οικονομίας, αλλά και του περιβάλλοντος, διότι αν για παράδειγμα η κατανεμημένη παραγωγή γίνει σε επίπεδο νοικοκυριών, με τη βοήθεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όχι μόνο μειώνεται η απαιτούμενη ενέργεια (καύσιμα) και τις εκπομπές των καυσαερίων (Cruz Sanchez et al., 2017) για την μετακίνηση των αγαθών, αλλά ελαττώνεται και η κατανάλωση των πόρων (Feeley et al., 2014), και περιορίζεται η περιβαλλοντική επιβάρυνση (Santander et al., 2020 ; Reich et al., 2019). Ο αντίκτυπος στο περιβάλλον θα μπορούσε να μειωθεί ακόμα περισσότερο, αν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές συνδυάζονταν με τα φωτοβολταϊκά πλέγματα (Pavlo et al., 2018). Ιδιαίτερα σε μικρότερη κλίμακα και σε μία φιλοσοφία «κατανεμημένης κατασκευής», η Προσθετική Κατασκευή θέτει μεγάλες προοπτικές για εφαρμογές στην ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση υλικών (Giurco et al., 2014).

Μπορεί προς το παρόν η κατανεμημένη παραγωγή να είναι σε πολύ πρώιμο στάδιο επομένως να μην έχει μεγάλο αντίκτυπο και ευρεία εφαρμογή παγκόσμια, όμως όσο η αξία των αλυσίδων εφοδιασμού συνεχίζει να εξελίσσεται, έχει πολλές προοπτικές και φαίνεται πως στο μέλλον θα έχει μεγάλη σπουδαιότητα (Dertinger et al., 2020). Για παράδειγμα επιχειρήσεις όπως η Shapeways Inc., δίνουν την ευκαιρία στους καταναλωτές στην κατασκευή και αγοραπωλησία τρισδιάστατων εκτυπώσεων αντικειμένων, διαδικτυακά. Επίσης, φόρμες (templates) προσχεδιασμένων αντικειμένων ενδέχεται να βοηθήσουν εξίσου στο να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ σχεδιασμού πραγματικού αντικειμένου με την ανάγκη για μοναδικά προϊόντα, δίνοντας ένα τέλος στα περιττά αποθέματα και την φιλοσοφία «ένα μέγεθος ταιριάζει σε όλους» της τρέχουσας κατάστασης στην βιομηχανία (Giurco et al., 2014).

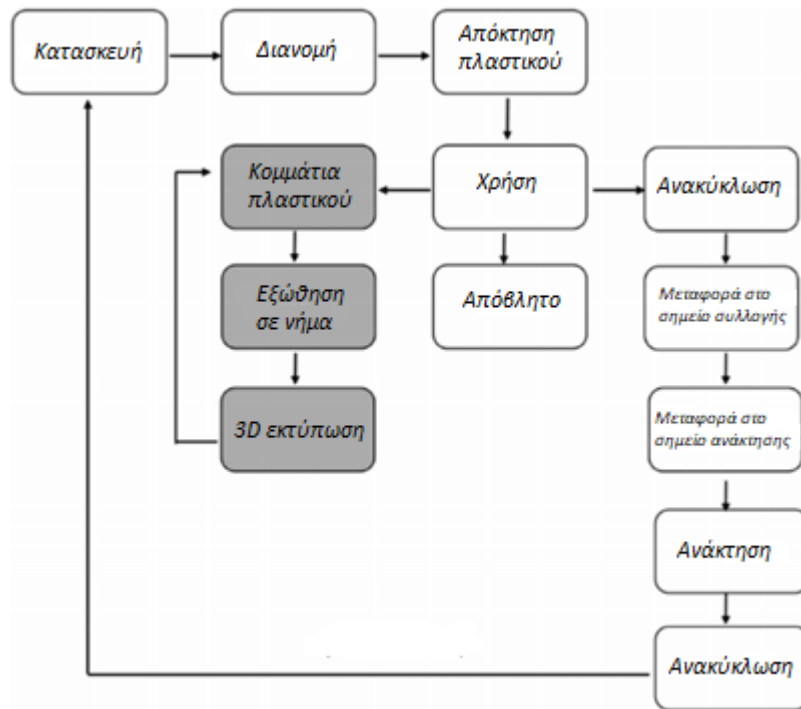
Ένας τεχνικός τομέας που έχει μεγάλες προοπτικές για την επέκταση της ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων είναι η νέα έννοια της κατανεμημένης ανακύκλωσης για την ΠΚ στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας (Dertinger et al., 2020). Είναι ενδιαφέρον να εξετάσει κανείς πως θα επηρέαζε την κυκλική οικονομία, ένα μοντέλο κατανεμημένης, τοπικής κατασκευής, μέσω τρισδιάστατων συστημάτων παραγωγής (Giurco et al., 2014). Η φιλοσοφία της κατανεμημένης κατασκευής, και ως απόρροια της η κατανεμημένη ανακύκλωση, φαίνεται να είναι από τα πιο εμφανή αποτελέσματα της ανάπτυξης της τρισδιάστατης εκτύπωσης Ανοιχτής-Πηγής (Pavlo et al., 2018 ; Santander et al., 2020). Πλέον υπάρχουν πολλά είδη τέτοιων τρισδιάστατων εκτυπωτών, όπως Lyman Filament Extruder, the Filabot, Recyclebot, RepRap Recycle Add-on, Precious plastic, Plastic Bank (βλ. Σχήμα 5-2-2) (Cruz Sanchez et al., 2017). Συγκεκριμένα το Filabot ήταν η πρώτη μηχανή ανακύκλωσης για τρισδιάστατο εκτυπωτή, κατασκευασμένη από το φοιτητή μηχανολόγο μηχανικό Tyler McNaney. Εκτός από πλαστικό, η μηχανή αυτή ανακυκλώνει και εκτυπωμένα τρισδιάστατα τεμάχια που αστόχησαν ή δεν είναι πλέον απαραίτητα (Wilkinson & Cope, 2015). Πρότζεκτ όπως το RepRap (Replicating Rapid-prototyper) και το Fab@Home είναι συστήματα εξώθησης, που χρησιμοποιούνται με την προσέγγιση της FDM μεθόδου για την παραγωγή μηχανικών εξαρτημάτων ή άλλων αντικειμένων, συμβατά με μία καλή ποικιλία θερμοπλαστικών πολυμερών, αρκετά οικονομικά για να είναι εύκολη η πρόσβαση (Cruz Sanchez et al., 2017). Για παράδειγμα, το RepRap πρότζεκτ, επιτρέπει στους χρήστες να αποκτήσουν σε πολύ οικονομική τιμή (\$200-\$500) έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή (Pavlo et al., 2018). Χαρακτηριστικά, φαίνεται πως η διαδικασία ενός recyclebot μειώνει την ενσωματωμένη ενέργεια για την κατασκευή του νήματος κατά 90% σε σχέση με την παραδοσιακή κατασκευή του (Reich et al., 2019 ; Dertinger et al., 2020).

Μέσω αυτών των μηχανημάτων επομένως καθίσταται δυνατό τα απορριπτώμενα πλαστικά αντί να μεταφέρονται μαζικά στα κέντρα ανακύκλωσης ή στις περιοχές υγειονομικής ταφής, να μετατρέπονται σε υλικό τροφοδοσίας για την τρισδιάστατη εκτύπωση και την κατασκευή νέων, συνήθων πλαστικών αντικειμένων (Cruz Sanchez et al., 2017), σε επίπεδο νοικοκυριού, μετατρέποντας ακόμα και το πιο μικρό σπίτι ή επιχείρηση σε βιομηχανικό σύστημα (Pavlo et al., 2018). Αυτή η διαδικασία ενισχύει στο έπακρο το εγχείρημα για μια κυκλική οικονομία (Reich et al., 2019), καθώς και την ελάττωση φυσικά των πλαστικών αποβλήτων και την κατανάλωση ενέργειας (Pavlo et al., 2018).



Σχήμα 5-2-2: Τρισδιάστατοι εκτυπωτές Ανοιχτής Πηγής. (α) ZMorph SX (Charles et al., 2019) (β) FoldaRap (Cruz Sanchez et al., 2017) (γ) Mondrian (Cruz Sanchez et al., 2017)

Επομένως, το μοντέλο της «κατανεμημένης ανακύκλωσης» έχει αρχίσει να υιοθετείται έναντι της «κεντροποιημένης» ανακύκλωσης (βλ. Σχήμα 5-2-3) (Lanzotti et al., 2018). Παραδοσιακά, η ανακύκλωση προσανατολίζεται σε μεγάλες, κεντροποιημένες δομές προκειμένου να επωφεληθεί από την οικονομία κλίμακας για την παραγωγή προϊόντων χαμηλής αξίας, ωστόσο, αυτή η προσέγγιση αντιμετωπίζει αρκετά μειονεκτήματα όπως η μεταφορά πλαστικών μεγάλου όγκου με μικρού βάρους με αποτέλεσμα σύνθετα και ασύμφορα logistics (Pavlo et al., 2018 ; Zhong & Pearce, 2018). Αυτή η ιστορική τάση προς κεντρικές εγκατάστασης ανακύκλωσης λοιπόν αντιστρέφεται, μέσω της νέας προσέγγισης της κατανεμημένης ανακύκλωσης για την άμεση εκμετάλλευση των απορριμμάτων και την κατανεμημένη κατασκευή αντικειμένων πρόσθετης αξίας (Kreiger et al., 2014 ; Reich et al., 2019).

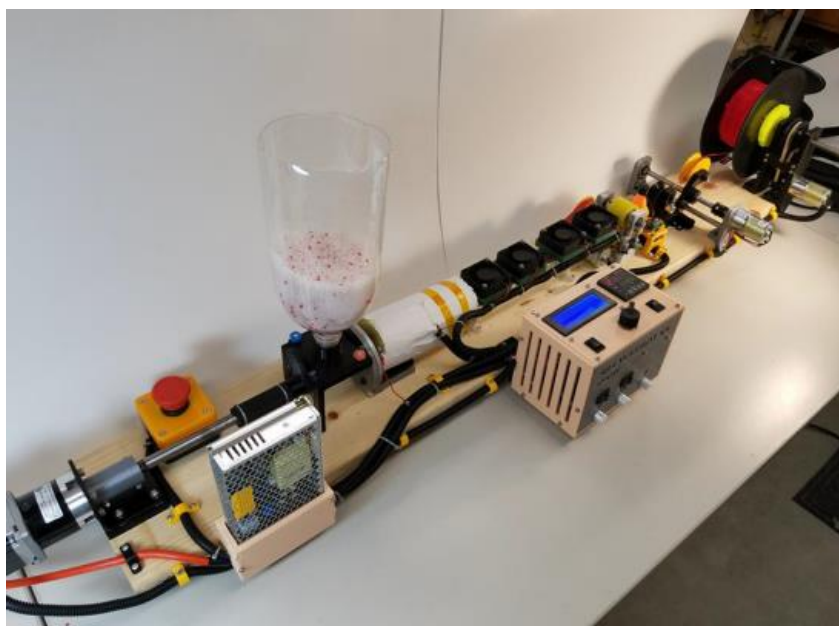


Σχήμα 5-2-3: Αναπαράσταση της συμβατικής (λευκή) και κατανεμημένης (γκρι) ανακύκλωσης, υιοθετημένη από Zander (2019)

Τα πλεονεκτήματα είναι πολυάριθμα, και αφορούν όπως είναι εύκολα αντιληπτό στην εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης των thousand million MJ ετησίως, αλλά και στην μείωση της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (Lanzotti et al., 2018) και του αποτυπώματος του άνθρακα (Zander et al., 2019), συμπεριλαμβανομένων των ευκαιριών για μια κατανεμημένη ανακύκλωση της φύρας που προκύπτει μετά από μία διαδικασία ΠΚ, όπως το νήμα που περισσεύει μετά από κάποια εργασία εκτύπωσης (Peeters et al., 2019), ή την εξ αρχής παραγωγή του νήματος από απορρίμματα (Santander et al., 2020). Στην βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά ο συνδυασμός ενός εξωθητή ανοιχτής πηγής (recyclebot) με έναν εκτυπωτή RepRap (Santander et al., 2020 ; Reich et al., 2019), για την οικιακή ανακύκλωση των απορριμμάτων (Kreiger et al., 2014). Βέβαια η κεντροποιημένη ανακύκλωση μέσω ΠΚ δεν επωφελεί μόνο μικρές δομές και κλίμακες, αλλά αποδεικνύεται εξαιρετικά απαραίτητη σε περιοχές όπου η παραγωγή αποβλήτων είναι αυξημένη, υπάρχει μεγάλη ζήτηση για κατασκευή προσαρμοσμένων εξαρτημάτων, και η επαναπρομήθεια υλικών και πρώτης ύλης είναι περιορισμένη (Hart et al., 2018), αποτελώντας ένα «game changer» για τις απομακρυσμένες περιοχές τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις υποανάπτυκτες χώρες του κόσμου (Zander et al., 2018).

Η διαδικασία κατά την οποία τα recyclebots ανακυκλώνουν τα απορρίμματα και τα μετατρέπουν σε νήμα για την ΠΚ, περιγράφηκε αναλυτικά από τους Zhong & Pearce (2018). Πρόκειται για ένα μηχάνημα ανοιχτής πηγής, δηλαδή έχουν ένα «χωνί» στο οποίο απορρίπτονται τα απόβλητα, σε μορφή σκόνης ή μικρών κομματιών (βλ. Σχήμα 5-2-4). Τα απορρίμματα πλαστικών τροφοδοτούνται λοιπόν μέσω μιας χοάνης και μεταφέρονται στον σωλήνα θέρμανσης με ένα τρυπάνι (αντικαθιστώντας την ειδική βίδα σε παραδοσιακά συστήματα εξώθησης), το οποίο οδηγείται από έναν κινητήρα. Το πλαστικό συμπιέζεται και λιώνει σε αυτόν τον σωλήνα θέρμανσης και μπορεί να εξωθηθεί μέσω του ακροφυσίου για να σχηματίσει νήμα για την εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων. Γενικά, το πλαστικό που ανακυκλώνεται για νήμα

εκτύπωσης 3-D είναι του ίδιου τύπου και η διαδικασία απλοποιείται εάν οι κωδικοί ανακύκλωσης είναι αρκετά κοκκώδεις για να αναγνωρίσουν διαφορετικά είδη πλαστικών. Μετά την ταξινόμηση του πλαστικού, καθαρίζεται και τεμαχίζεται σε μικρά κομμάτια για να βελτιωθεί η ποιότητα του νήματος διατηρώντας τη συνέπεια του ρυθμού τροφοδοσίας. Το recyclebot δημιουργεί νήματα από πλαστικά μετά την κατανάλωση έναντι πρώτων υλών, τα οποία μπορούν να μειώσουν κατά δέκα την ενσωματωμένη ενέργεια του νήματος από την εξόρυξη, την επεξεργασία φυσικών πόρων και τη σύνθεση σε σύγκριση με την παραδοσιακή μέθοδο κατασκευής. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής πλαστικών, όπως η πλαστική χύτευση με έγχυση, η κατασκευή πρόσθετων με έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή έχει δύο πλεονεκτήματα. Πρώτον, ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής επιτρέπει την ακριβή κατασκευή και τα μοντέλα κλίμακας, καθώς μπορεί να παράγει άμεσα σύνθετα μέρη κατασκευάζοντας ένα στοιχείο σε στρώματα από 3-D ψηφιακά σχέδια χωρίς ουσιαστικά υλικά απόβλητα. Δεύτερον, ο 3-D εκτυπωτής μπορεί να ελέγξει την πυκνότητα πλήρωσης ενός προϊόντος. Μειώνοντας την πυκνότητα πλήρωσης των ανταλλακτικών στο ελάχιστο απαραίτητο για τη μηχανική λειτουργικότητα, η κατασκευή με τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να εξοικονομήσει υλικά, να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, όλα αυτά που συμβάλλουν στη βιωσιμότητα. Υπάρχει επομένως σημαντική έρευνα που έχει δείξει ότι η κατανεμημένη κατασκευή και ανακύκλωση με εκτύπωση 3-D μπορεί να ωφελήσει την κυκλική οικονομία (Zhong & Pearce, 2018).



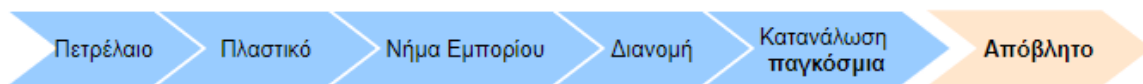
Σχήμα 5-2-4: Το Recyclebot τύπου RepRap πλήρως λειτουργικό σε παραγωγική διαδικασία, υιοθετημένο από τους Woern et al. (2018)

Στην συνέχεια θα παρατεθούν οι μελέτες στην υπάρχουσα βιβλιογραφία που έχουν ασχοληθεί με τις προοπτικές της κατανεμημένης παραγωγής και ανακύκλωσης, στο πλαίσιο της προσθετικής κατασκευής.

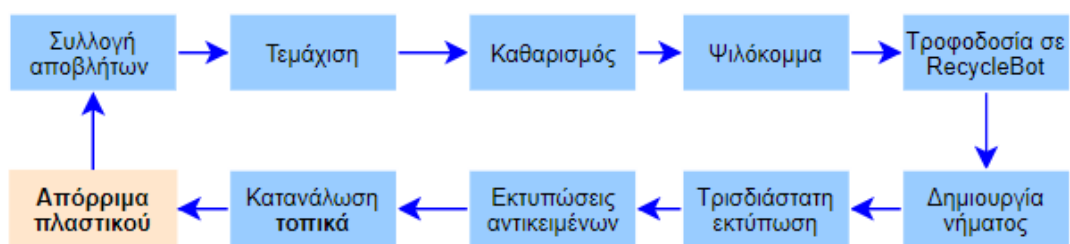
Στην έρευνα των Kreiger et al. (2014), μελετήθηκε από τεχνικής απόψεως η κατανεμημένη ανακύκλωση μέσω ενός δικτύου RecycleBots, για την παραγωγή νήματος με υλικό το HDPE. Στόχος της έρευνας ήταν να διαπιστωθεί αν όντως είναι πιο συμφέρουσα περιβαλλοντικώς αυτή η μέθοδος συγκριτικά με την παραδοσιακή ανακύκλωση του HDPE.

Όμοια κινήθηκε και η μελέτη των Zhong & Pearce (2018), όπου συνδύασαν την καταναλωμένη ανακύκλωση μέσω ενός οριζόντιου recyclebot για την δημιουργία τροφοδοτικού νήματος, με την καταναλωμένη κατασκευή και έναν delta RepRap για την εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων από απορρίμματα. Συγκεκριμένα ανακυκλώθηκε χρησιμοποιημένο ABS, και αποτέλεσε έπειτα την πρώτη ύλη για την κατασκευή αντικειμένων σε τρεις διαφορετικές μελέτες περίπτωσης. Και από τις τρεις περιπτώσεις έγινε φανερό πως η παραδοσιακή μέθοδος παραγωγής ABS καταναλώνει τουλάχιστον την διπλάσια ενέργεια από ότι αυτή η καταναλωμένη προσέγγιση. Επομένως αυτό το δίδυμο καταναλωμένης παραγωγής και ανακύκλωσης ταιριάζει απόλυτα στον στόχο υιοθέτησης της κυκλικής οικονομίας και της βιωσιμότητας. Από οικονομικής πλευράς, υπάρχει σίγουρα μεγάλο όφελος για τους καταναλωτές, πράγμα που ενισχύει το κίνητρο για στροφή σε κυκλικά μοντέλα παραγωγής.

Οι Feeley et al. (2014), ενασχολούνται με την ανάγκη που υπάρχει στην αγορά για προϊόντα περιβαλλοντικά βιώσιμα και ηθικώς κατασκευασμένα, αναπτύσσοντας ένα «πρότυπο ηθικού προϊόντος» για το τροφοδοτικό νήμα στην τρισδιάστατη εκτύπωση, με βάση τα υφιστάμενα πρότυπα δίκαιου εμπορίου, την ανάλυση του κύκλου ζωής της ενσωματωμένης ενέργειας, τις εκπομπές από την παραγωγή ανακυκλωμένων ινών και κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων, καθώς και έπειτα από διαβούλευση με συνεργάτες και ενδιαφερόμενα μέρη (βλ. Σχήμα 5-2-5). Τελικά αυτό το «πρότυπο ηθικού προϊόντος» οριοθέτησε έξι βασικούς πυλώνες, (1) ελάχιστη δυνατή τιμολόγηση, (2) εφαρμογή δίκαιου εμπορίου (3) πρότυπα εργασίας (4) περιβαλλοντικά πρότυπα (5) πρότυπα ασφάλειας και υγείας (6) κοινωνικά πρότυπα συμπεριλαμβανομένων εκείνων που καλύπτουν διακρίσεις, παρενόχληση, ελευθερία του συλλόγου, των συλλογικών διαπραγματεύσεων και της πειθαρχίας.



(α)

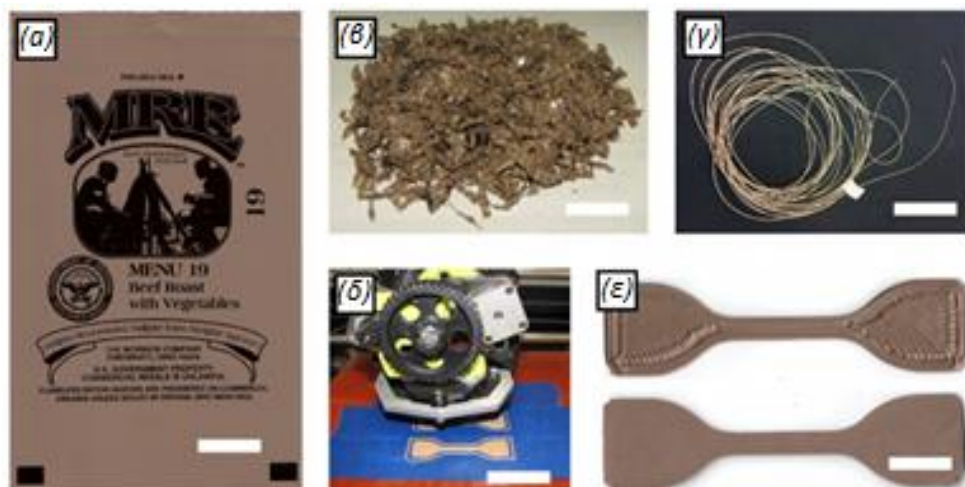


(β)

Σχήμα 5-2-5: Σχηματική αναπαράσταση υιοθετημένη από τους Feeley et al. (2014) (α) η συμβατική διαδικασία παραγωγής νήματος (β) το προτεινόμενο μοντέλο για μια «ηθική» παραγωγή νήματος μέσω καταναλωμένης κατασκευής και ανακύκλωσης

Σε πιο πρακτικό ζήτημα στράφηκαν οι Hart et al. (2018), με μία εξειδικευμένη μελέτη περίπτωσης στις στρατιωτικές υπηρεσίες της Αμερικής. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως οι στρατιώτες στην Αμερική στις βάσεις, παράγουν σχεδόν 0.56 κιλά πλαστικού ανά στρατιώτη ανά ημέρα. Εκτός αυτού, είναι συχνό φαινόμενο η συνεχής ανάγκη για νέα αντικείμενα καθώς πολλά σπάνε ή χάνονται, και η επαναπρομήθευσή τους είναι δύσκολη λόγω συνεχών μετεγκαταστάσεων ή

απομακρυσμένων περιοχών διαμονής. Έτσι, υπάρχει προοπτική για την επωφέλεια από την προσθετική κατασκευή, με την ανακύκλωση των απορριμμάτων και την ταχεία δημιουργία αναγκαιών αντικειμένων. Αυτό το κενό καλύπτει η συγκεκριμένη μελέτη, αξιοποιώντας τα πακέτα τροφίμων των στρατιωτών ως τροφοδοτικό υλικό για την διαδικασία της ΠΚ (βλ. Σχήμα 5-2-6).



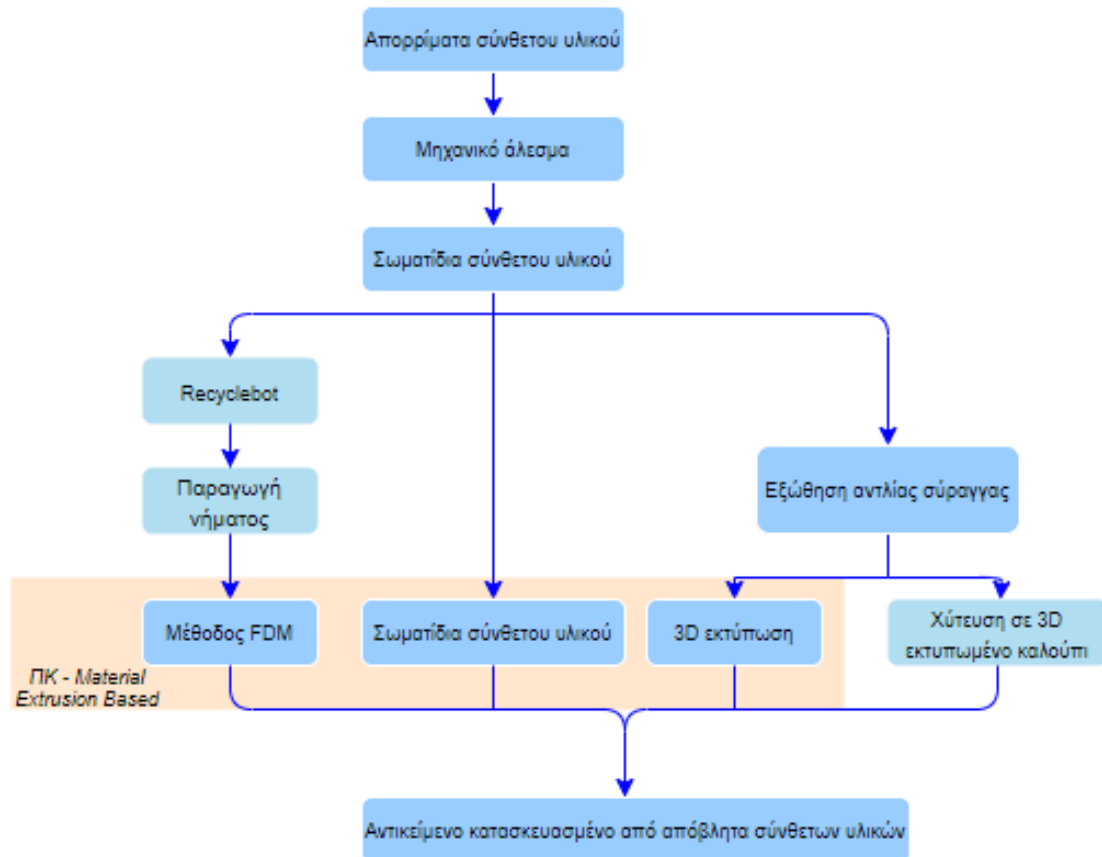
Σχήμα 5-2-6: Παράδειγμα κατανεμημένης ανακύκλωσης, σύμφωνα με την έρευνα των Hart et al. (2018) (α) Τοπικό απόρριμμα προϊόντος (β) Ψιλοκομμένα απόβλητα (γ) Τροφοδοτικό νήμα (δ) Μέθοδος FDM (ε) τελικό εκτυπωμένο δείγμα

Στην έρευνα των Santander et al., (2020), εξετάζεται το μοντέλο κατά το οποίο αποστέλλονται αρχεία τρισδιάστατων μοντέλων ψηφιακά, για την παραγωγή τους μέσω 3D εκτυπωτών. Σε αυτό το μοντέλο, το αντικείμενο κατασκευάζεται και συναρμολογείται σε αποκεντρωμένο δίκτυο εργαστηρίων εκτύπωσης ή μικρών εργοστασίων, με υψηλής απόδοσης εκτυπωτές και εξειδικευμένο προσωπικό για την τελική συναρμολόγηση και το τελείωμα. Συστήματα τύπου extrusion-based όπως το FFF (ή FDM) είναι τα πιο διαδεδομένα και αναπτυσσόμενα στην ΠΚ, με τροφοδοτικό υλικό το θερμοπλαστικό υλικό. Όσο λοιπόν η τεχνολογία ΠΚ συνεχίζει και εξελίσσεται, τα πλαστικά απόβλητα θα συνεχίζουν να ανακυκλώνονται και να χρησιμοποιούνται παντού. (Santander et al., 2020)

Οι Dertinger et al. (2020) εργάστηκαν εξαιρετικά σύνθετα απόβλητα συνθετικών πλαστικών θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στην κατανεμημένη παραγωγή και ανακύκλωση για την υιοθέτηση της κυκλικής οικονομίας. Αυτή η μελέτη διερεύνησε με επιτυχία τις τεχνικές οδούς για την κατανεμημένη ανακύκλωση σύνθετων πολυμερών αποτελούμενα από απορρίμματα υαλοκαθαριστήρων για την κατανεμημένη κατασκευή, για πληθώρα εφαρμογών, ανάμεσα τους παραγωγή νημάτων μέσω ανακύκλωσης για την μέθοδο FDM (βλ. Σχήμα 5-2-7). Με μεγάλη επιτυχία θραύσματα πτερυγίων υαλοκαθαριστήρων μετατράπηκαν σε χρήσιμα, υψηλής αξίας, ειδικά προϊόντα βιοϊατρικής, για παράδειγμα λαβή δακτύλου σε προσθετικό χεριού. Απέδειξαν επομένως πως αυτό το μοντέλο ανακύκλωσης υλικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση των εναλλακτικών της εφαρμογής της κατανεμημένης κατασκευής και ανακύκλωσης σε μια κυκλική οικονομία.

Η μελέτη των Woern et al. (2018), εστίασε στον Gigabot X, έναν εκτυπωτή ανοιχτής πηγής με δυνατότητα ανακύκλωσης πλαστικών σε μεγάλη κλίμακα, με την βοήθεια του οποίου εκτυπώθηκαν αντικείμενα και έπειτα ελέγχθηκαν όσον αφορά στις μηχανικές τους ιδιότητες. Αρχικά αναλύθηκε καθαρή πρώτη ύλη από PLA, και έπειτα έγινε σύγκριση με τέσσερα ανακυκλωμένα πλαστικά (1) ανακυκλωμένο PLA από προηγούμενες εκτυπώσεις (το πιο

διαδεδομένο πλαστικό στην ΠΚ) (2) ανακυκλωμένο ABS (το δεύτερο πιο διαδεδομένο πλαστικό στην ΠΚ) (3) ανακυκλωμένο PET (το πιο σύνηθες πλαστικό απόβλητο) και (4) ανακυκλωμένο PP (το δεύτερο πιο σύνηθες πλαστικό απόβλητο). Η αντοχή σε εφελκυσμό των εκτυπωμένων αντικειμένων συγκρίθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν και τους κύκλους τήξης/εκτύπωσης.



Σχήμα 5-2-7: Τεχνικές οδοί για την υιοθέτηση της κατανεμημένης ανακύκλωσης πολυμερών και τη χρήση τους στην κατανεμημένη παραγωγή, υιοθετημένη από τους Dertinger et al. (2020)

Οι Reich et al. (2019) στο πλαίσιο της μελέτης τους, αναφέρουν πως πολλοί τύποι πολυμερών είναι συμβατοί για την ανακύκλωσή τους σε τροφοδοτικό νήμα, συμπεριλαμβανομένων των πιο δημοφιλών (δηλαδή PLA, ABS, HDPE, PP, polystyrene (PS), PET, ελαστομερή, όπως και σύνθετα πλαστικά με ενίσχυση άνθρακα ή εμποτισμένα με απορρίμματα ξύλου). Ωστόσο λόγω των επαναλαμβανόμενων θερμικών κύκλων που επιδεινώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, προτείνουν έως και πέντε κύκλους χρήσης του ίδιου υλικού προτού αναμιχθεί με καθαρή ύλη. Έπειτα, σε μία πιο πρακτική προσέγγιση, με τη χρήση του εκτυπωτή ανοιχτής πηγής Gigabot X ανακυκλώθηκε πλαστικό polycarbonate (PC) και χρησιμοποιήθηκε για την ΠΚ αντικειμένων που έπειτα εξετάστηκαν συμφωνά με τρεις εφαρμογές – μελέτες περίπτωσης: (1) χρήση του υλικού για κατασκευή θερμοπλαστικών χαμηλού σημείου τήξης (2) εκτυπωμένα αντικείμενα για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών και (3) εκτυπωμένα εξαρτήματα για εφαρμογές υψηλής αντοχής. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης διαπίστωσαν ότι το ανακυκλωμένο PC θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως πρώτη ύλη για την ΠΚ απευθείας με ένα Gigabot X, ενώ

επίσης φάνηκε πως είναι αποτελεσματικό υλικό σε ένα ευρύ φάσμα χρήσεων που μπορούν να αντικαταστήσουν πιο ακριβές λύσεις τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τη βιομηχανία.

Στην συνέχεια παρατίθεται ο Πίνακας 5-2-1, που αναλύονται έντεκα ανακυκλωτικά συστήματα πλαστικού για τρισδιάστατους εκτυπωτές και την εξώθηση νήματος, σχετικά με τους τύπους των πλαστικών με τους οποίους είναι συμβατά, και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Πίνακας 5-2- 1: Συστήματα ανακύκλωσης για την τρισδιάστατη εκτύπωση για την εξώθηση υλικού, υιοθετημένο από Zander (2019)

Σύστημα Ανακύκλωσης Πλαστικού	Είδος πλαστικού												Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα	
	ABS	PLA	PC	HIPS	PETG	PP	PS	Nylon	HDPE	PET	PEEK	Ultem		
Filabot EX2	X	X	X	X	X									Υψηλή θερμοκρασία / Μία ζώνη θέρμανσης
Filabot EX6	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		Υψηλή θερμοκρασία, τέσσερις ζώνες θέρμανσης / Ακριβό
Recyclebot	X	X							X					Οικονομικό, Ιδανικό για «φτιάξ' το μόνος σου» / Μία ζώνη θέρμανσης, χαμηλή θερμοκρασία
Filastruder	X	X												Οικονομικό / Μία ζώνη θέρμανσης, χαμηλή θερμοκρασία
Lyman Filament Extruder	X	X												Οικονομικό, Ιδανικό για «φτιάξ' το μόνος σου» / δεν διατίθεται εμπορικά
FilaFab EX350	X	X						X	X					Οικονομικό / Μία ζώνη θέρμανσης, χαμηλή θερμοκρασία
Felfil Evo														Οικονομικό / Μία ζώνη θέρμανσης, χαμηλή θερμοκρασία
Protocycler+														Μηχανή σύνθλιψης και εξώθησης σε ένα / χαμηλή θερμοκρασία
Notzek Pro HT	X	X		X						X	X	X		Υψηλή θερμοκρασία / Μία ζώνη θέρμανσης
Notzek Xcalibur	X	X		X						X	X	X		Υψηλή θερμοκρασία, τρεις ζώνες θέρμανσης / Ακριβό
Strooder	X	X												Οικονομικό / Μία ζώνη θέρμανσης, χαμηλή θερμοκρασία

Θεωρητικά λοιπόν, η υιοθέτηση του μοντέλου καταναλωτή είναι εφικτό να γίνει. Η φιλοσοφία των συστημάτων ανοιχτής πηγής καθιστά δυνατή την δημιουργία τεχνικά ανώτερων εξαρτημάτων και μηχανών, με κατά πολύ λιγότερο κόστος. Έτσι, η αποκεντρωμένη ανακύκλωση δύναται να εξαλείψει τα εμπόδια που συνδέονται με την συμβατική ανακύκλωση, κυρίως λόγω της οικονομικά συμφέρουσας τεχνολογίας ανοιχτής πηγής, μικρές αποστάσεις, και μικρές

ποσότητες μεταφερόμενων πλαστικών απορριμμάτων (Santander et al., 2020). Ωστόσο, παραμένει ένα ζήτημα που διχάζει τους ειδήμονες. Η μία πλευρά υποστηρίζει πως οι καταναλωτές θα στραφούν στην πιο βολική προς αυτούς λύση, δηλαδή την αγορά ΠΚ προϊόντων διαδικτυακά. Από την άλλη, υποστηρίζεται πως υπάρχει μέλλον για μια μεγάλη αγορά «consumer production». Για παράδειγμα, η Microsoft υποστηρίζει πως μελλοντικά η τρισδιάστατη εκτύπωση θα είναι το ίδιο δεδομένη και εύκολη όπως η κανονική, δυσδιάστατη εκτύπωση. Πιθανότατα, το μέλλον να εμπεριέχει και τις δύο οπτικές. Πρόκειται δηλαδή για έναν συνδυασμό αποκεντρωμένης παραγωγής, σε ένα παγκόσμιο εμπόριο, οριοθετημένο από τη διαθέσιμη ενέργεια, τα υλικά τροφοδοσίας, την τεχνογνωσία του σχεδιασμού, και την πολυπλοκότητα της συναρμολόγησης, παράγοντες που ήδη παίζουν ρόλο στον τομέα της κατασκευής παγκοσμίως (Giurco et al., 2014).

5.2.2.2. Κλειστοί Βρόγχοι Παραγωγής

Ο τομέας της παραγωγής είναι από τις κυριότερες κατευθυντήριες δυνάμεις στην οικονομική ανάπτυξη. Ταυτόχρονα ωστόσο, η παραγωγική διαδικασία και οι παγκόσμιες εφοδιαστικές αλυσίδες, ευθύνονται για ένα διόλου ευκαταφρόνητο ποσοστό μόλυνσης του περιβάλλοντος (Juraschek et al., 2017). Οι δραστηριότητες επεξεργασίας και συναρμολόγησης μπορούν να είναι περιορισμένες και σε μικρές αλυσίδες εφοδιασμού, απλοποιώντας την μέτρηση της κατανάλωσης πόρων, χωρίς να χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι μεγάλες και πολύπλοκες αλυσίδες εφοδιασμού. Η κατασκευή εξαρτημάτων σε διαφορετικές φυσικές τοποθεσίες και, στη συνέχεια, η διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού για τη συγκέντρωσή τους για τελική συναρμολόγηση ενός προϊόντος θεωρείται επίσης μια μορφή καταναλωμένης κατασκευής (Wu & Wu, 2019).

Η ανακύκλωση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο μορφές δικτύων: (1) αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα (2) Εφοδιαστική Αλυσίδα κλειστού βρόχου. Στην πρώτη περίπτωση, αφορά ένα δίκτυο για την ανάκτηση των απορριφθέντων προϊόντων, για την ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίησή τους σε άλλα προϊόντα. Η δεύτερη περίπτωση, αφορά ένα δίκτυο που ενσωματώνει την ανάντη και την κατόντη εφοδιαστική αλυσίδα. Η ροή των αγαθών ακολουθεί την εμπρός-εφοδιαστική, από τον προμηθευτή στον πελάτη, ενώ έπειτα με την αντίστροφη εφοδιαστική, τα προϊόντα ανακτώνται από τον καταναλωτή για την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίησή τους. Όταν και τα δύο αυτά είδη λειτουργούν ταυτόχρονα, σχηματίζεται η εφοδιαστική αλυσίδα κλειστού βρόχου (Pavlo et al., 2018).

Τα συστήματα παραγωγής κλειστού βρόχου θεωρούνται όλο και περισσότερο μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μοχλός για την αύξηση της κερδοφορίας μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και πόρων στις διαδικασίες κατασκευής. Για παράδειγμα, η ανακύκλωση αλουμινίου συνεπάγεται εξοικονόμηση παρθένου βωξίτη, καθώς και τα βοηθητικά χημικά που απαιτούνται για την παραγωγή και την ηλεκτρική ενέργεια του. Η ίδια αρχή μπορεί να ισχύει για πλαστικά και άλλα υλικά (Juraschek et al., 2017).

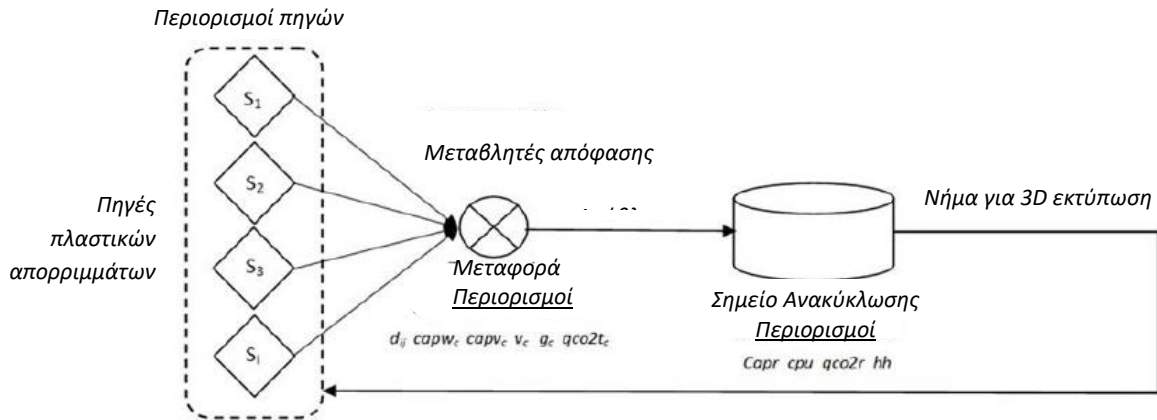
Γενικά, ένα προϊόν φτάνει στο τέλος της ζωής του όταν χάνει την αξία του. Η διάρκεια ζωής του προϊόντος καθορίζεται από τη φυσική, λειτουργική, τεχνική, οικονομική και νομική του ζωή ως διαφοροποιημένη. Υπό αυτήν την έννοια, η φύση και τα χαρακτηριστικά των αντίστροφων ροών μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: (1) Επιστροφές κατά τη φάση χρήσης, όπου προϊόντα που

ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία συνήθως χρησιμοποιούνται ελαφρώς (δηλαδή επαναχρησιμοποιούνται πριν από τον πρώτο μήνα) και συνεπώς εξακολουθούν να χρησιμοποιούν την τεχνολογία αιχμής (2) Επιστροφές μετά τη φάση χρήσης, όπου προϊόντα σε αυτήν την κατηγορία έχουν χρησιμοποιηθεί εντατικά και η τεχνολογία τους είναι συνήθως ξεπερασμένη (3) Επιστροφές μετά το τέλος της ζωής, δηλαδή προϊόντα χωρίς λειτουργικότητα, για παράδειγμα κάποιος παλιός εξοπλισμός και προϊόντα που χρειάζονται υψηλές ποσότητες ενέργειας και πόρων για να μπορούν να ανακτήσουν την προσδοθείσα αξία τους ή μέρος αυτής (Juraschek et al., 2017).

Ενώ υπάρχουν πολλές εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση υλικών και προϊόντων που έχουν φτάσει στο τέλος του διάρκειας ζωής, μόνο τρία από αυτά θα μπορούσαν να συμβάλουν στην επανεισαγωγή κάποιου μέρους της υπόλοιπης αξίας του προϊόντος σε ένα συγκεκριμένο σύστημα παραγωγής κλειστού βρόγχου: επαναχρησιμοποίηση, ανακατασκευή και ανακύκλωση. Μια περαιτέρω στρατηγική που στοχεύει στην αύξηση της αποδοτικότητας των πόρων μέσω της ενσωμάτωσης σπατάλης ενέργειας και υλικών στα συστήματα παραγωγής είναι η έννοια της βιομηχανικής συμβίωσης. Η βιομηχανική συμβίωση στοχεύει στη δημιουργία ενός φυσικού δεσμού μεταξύ των εταιρειών με την ανταλλαγή υλικών, ενέργειας, νερού και υποπροϊόντων. Σύμφωνα με την ιδέα αυτή, ξεχωριστές εταιρείες συμμετέχουν εθελοντικά στη φυσική ανταλλαγή υλικών ή / και ροών ενέργειας δημιουργώντας ένα δίκτυο στο οποίο τα απόβλητα μιας εταιρείας χρησιμοποιούνται ως πόροι από άλλη εταιρεία (Juraschek et al., 2017).

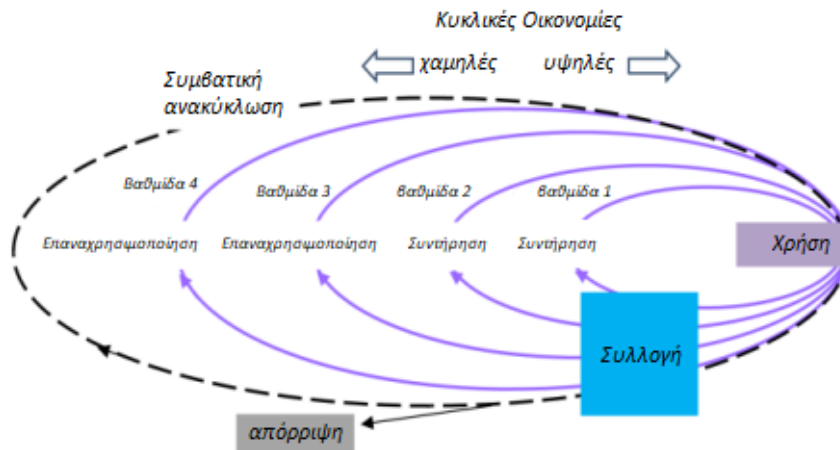
Η κυκλική οικονομία αναπαριστά ένα σύστημα όπου οι ροές των πόρων είναι κλειστοί βρόγχοι. Η καρδιά λοιπόν του κυκλικού αυτού μοντέλου, είναι να κλείσουν οι βρόγχοι ροής των υλικών (Sauerwein & Doubrovski, 2018). Η βελτιστοποίηση των ροών των αποβλήτων είναι από τις πιο αποδοτικές στρατηγικές για μια περιβαλλοντικά βιώσιμη παραγωγή (Juraschek et al., 2017). Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε η έρευνα των Pavlo et al., 2018, που προτείνουν ένα μοντέλο κλειστού βρόγχου ανακύκλωσης, το οποίο έχει προοπτικές με την βοήθεια της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Σε αυτό το μοντέλο, συλλέγεται ένα είδος πλαστικού τοπικά από διαφορετικές πηγές απορριμμάτων, και έπειτα μεταφέρεται για ανακύκλωση σε ένα σημείο ανακύκλωσης, ώστε να παραχθεί το νήμα πλαστικού για την ΠΚ και να επαναχρησιμοποιηθεί. Το πλάνο είναι μια βέλτιστη εφοδιαστική αλυσίδα κλειστού βρόγχου για το πλαστικό, σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, εννοώντας ένα σύνολο γεωγραφικά κατανομημένων πηγών πολυμερούς προς ανάκτηση και ανακύκλωση, σύμφωνα πάντα με περιορισμούς όπως η δυναμικότητα των σημείων ανάκτησης – ανακύκλωσης, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το οικονομικό συμφέρον και να ελαχιστοποιηθεί το οικολογικό αντίκτυπο. Η ελαχιστοποίηση του οικολογικού αντίκτυπου, δηλαδή η μεγιστοποίηση του οικολογικού οφέλους, είναι και ο παράγοντας της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης (Pavlo et al., 2018). Η περεταίρω ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου δεν κρίνεται σκόπιμη στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ωστόσο ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται για πιο λεπτομερή ανάλυση στην έρευνα των Pavlo et al. (2018).



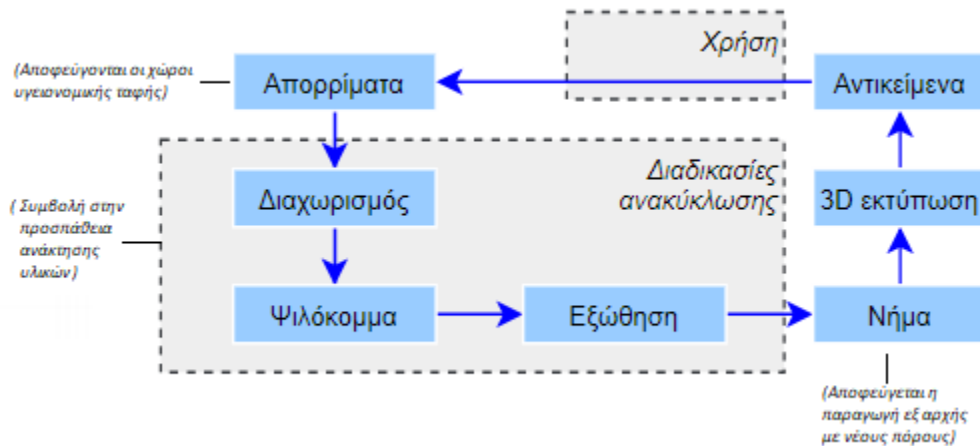
Σχήμα 5-2-8: Προτεινόμενο μοντέλο παραγωγής κλειστού βρόγχου από τους Pavlo et al. (2018).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να διευκολύνει συνδυασμούς κυκλικής οικονομίας που επιτρέπουν επιχειρηματικά μοντέλα με αλληλεπιδράσεις καταναλωτών-κατασκευαστών που επιδιώκουν το στόχο της μεγιστοποίησης της ενεργειακής και της αποδοτικότητας των υλικών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-2-9, η συμβατική διαδικασία ανακύκλωσης δεν έχει σημαντική επίπτωση στην προστασία του περιβάλλοντος και στις οικονομίες, αντίθετα, η βαθμίδα 1 και η βαθμίδα 2 (συντήρηση) επιτυγχάνουν τις πιο ευνοϊκές κυκλικές οικονομίες και τα δύο επίπεδα 3 και 4 είναι τυπικά παραδείγματα ανάγκης για εκσυγχρονισμό της διαδικασίας ανακύκλωσης για να επιτευχθούν κυκλικές οικονομίες (Wu & Wu, 2019).



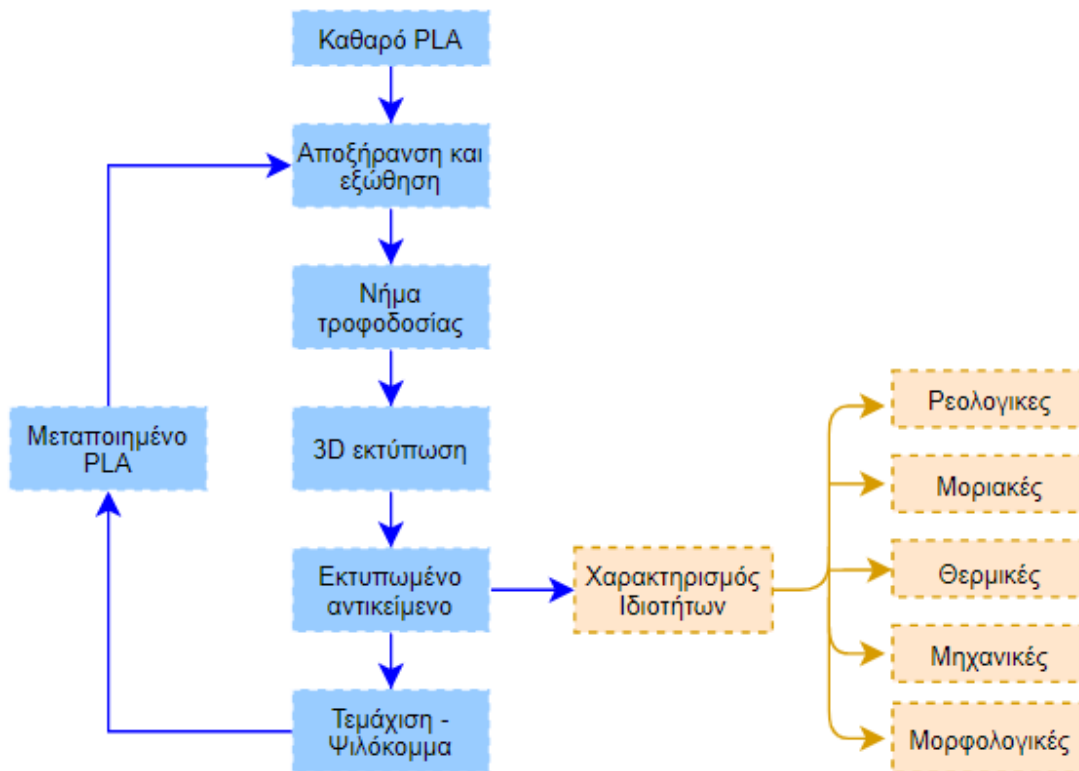
Σχήμα 5-2- 92: Κλειστοί βρόχοι αλληλεπίδρασης καταναλωτών - κατασκευαστών, σύμφωνα με τους Wu & Wu (2019)

Για την πιο συχνή εφαρμογή της παραγωγής κλειστού βρόγχου, χρειάζονται περισσότερες γνώσεις και ικανότητες σχετικά με την στρατηγική αυτή. Οι Juraschek et al. (2017) δημιούργησαν μια αλυσίδα διεργασίας κλειστού βρόγχου για τη συνεχή χρήση υλικού (βλ. Σχήμα 5-2-10), στο εργοστάσιο εκμάθησης Die Lernfabrik ούτως ώστε να δοθεί η ευκαιρία για πρακτική εμπειρία και μάθηση σε συστήματα παραγωγής κλειστού βρόγχου σε μηχανικούς. Η αλυσίδα διεργασιών που αναπτύχθηκε, ενσωματώνεται σε ένα σύστημα παραγωγής το οποίο είναι σε θέση να παράγει τα κομμάτια εργασίας για τη γραμμή παραγωγής και να ανακυκλώνει τα κατασκευασμένα προϊόντα στο τέλος της ζωής μετά τη φάση χρήσης. Αναπτύχθηκαν αρκετές ενότητες μάθησης για την άμεση ψηφιακή κατασκευή, την Προσθετική Κατασκευή και την περιβαλλοντική ευαισθησία της παραγωγικής διαδικασίας σε σχέση με τον κύκλο ζωής του προϊόντος.



Σχήμα 5-2-10: Βήματα διαδικασίας παραγωγής κλειστού βρόγχου μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, υιοθετημένο από τους Juraschek et al. (2017)

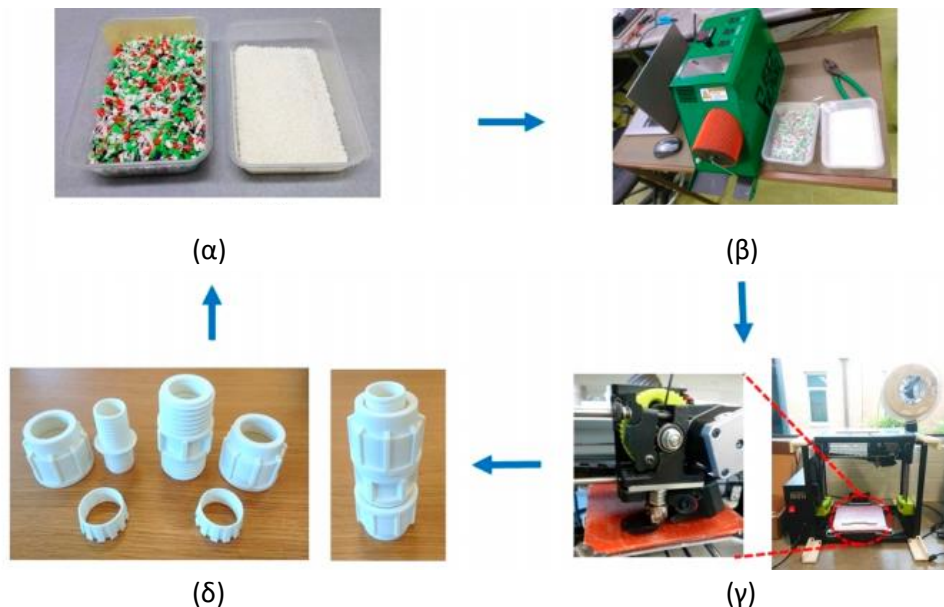
Την ανάγκη για επαρκείς γνώσεις υποστηρίζουν και οι Zhao et al. (2018), καθότι αναφέρεται πως τα δεδομένα στον τομέα των υλικών είναι ελλιπή ή ακόμη και ανύπαρκτα, καθώς οι μελέτες για την ανακύκλωση τρισδιάστατων υλικών εκτύπωσης είναι επίσης εξαιρετικά περιορισμένες. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το κενό γνώσης, ο κύριος στόχος της μελέτης τους είναι να διερευνήσει τις δυνατότητες του κλειστού βρόγχου ανακύκλωσης PLA που χρησιμοποιείται στην εκτύπωση 3D, όσον αφορά τις αλλαγές στις ιδιότητες και τις σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (βλ. Σχήμα 5-2-11). Συγκεκριμένα, το PLA εξωθήθηκε σε νήμα και τροφοδοτήθηκε σε έναν εκτυπωτή 3D FDM



Σχήμα 5-2- 31: Αναπαράσταση ανακύκλωσης PLA κλειστού βρόγχου για την τρισδιάστατη εκτύπωση, από τους Zhao et al. (2018)

και τα τυπωμένα προϊόντα τεμαχίστηκαν, μετατράπηκαν σε νήμα και υποβλήθηκαν ξανά στη διαδικασία εκτύπωσης 3D. Ο κύκλος επαναλήφθηκε έως ότου το υλικό δεν μπορεί να υποβληθεί σε περαιτέρω τρισδιάστατη εκτύπωση. Κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου, μια συγκεκριμένη ποσότητα δείγματος εξήχθη για λεπτομερή ανάλυση με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών αλλαγών στις ιδιότητές του. Το καθαρό PLA στη συνέχεια αναμίχθηκε με ανακυκλωμένο PLA σε διαφορετικές αναλογίες, καθώς η ανάμιξη ανακυκλωμένων πλαστικών με γνήσια, είναι μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος για τη βελτίωση των επιθυμητών ιδιοτήτων και την αναβάθμιση της ποιότητας και της απόδοσης του τελικού προϊόντος.

Οι Mohammed et al. (2019) στη μελέτη τους, διερεύνησαν την αναμόρφωση 100% ανακυκλωμένου 3D τυπωμένου υλικού ABS σε νήματα για επαναλαμβανόμενη Προσθετική Κατασκευή σε δύο κύκλους κλειστού βρόχου. Ερευνήθηκαν οι παράμετροι που σχετίζονται με την παραγωγή νημάτων χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές καταστάσεις υλικού ABS: (1) καθαρή πρώτη ύλη (2) μετά από μία ανακύκλωση (3) μετά από δύο φορές ανακύκλωση. Η μεθοδολογία που περιγράφεται σε αυτή τη μελέτη μπορεί να παρέχει μια βιώσιμη επιλογή για τη διαχείριση του ανακυκλώσιμου πολυμερούς ABS από απορρίμματα μετά τον καταναλωτή, όπως πλαστικά από ηλεκτρονικά απόβλητα ή από το εσωτερικό των αυτοκινήτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της παραγωγής είτε νημάτων για τροφοδοτικό του τρισδιάστατου εκτυπωτή είτε για την άμεση τρισδιάστατη εκτύπωση ανταλλακτικών και προϊόντων από ανακυκλωμένο ABS (βλ. Σχήμα 5-2-12). Επίσης, χρησιμοποιώντας παραγωγή ηλιακής ενέργειας, και συνδυάζοντας αυτό με τη προαναφερθείσα μέθοδο, φαίνεται ότι ένα παράδειγμα κατασκευής κλειστού βρόχου και αποτυπώματος χαμηλού άνθρακα είναι βιώσιμο σε πολλούς κύκλους. Ως εκ τούτου, η FFF διαθέτει σημαντικές δυνατότητες για αειφόρο διαχείριση των πλαστικών ABS μέσω της επανεισαγωγής της σε εκ νέου βιομηχανική διεργασία, δημιουργώντας δυνητικά αξία από μια κατά τ' άλλα αυξανόμενη επιβάρυνση για τους χώρους υγειονομικής ταφής.



Σχήμα 5-2- 42: Ανακύκλωση ABS σε διαδικασία παραγωγής κλειστού βρόχου, από τους Mohammed et al. (2019), (α) Ανάκτηση και κοκκοποίηση του ABS (β) Εξώθηση του σε νήμα (γ) Διαδικασία εκτύπωσης (δ) Τελικά εκτυπωμένα αντικείμενα. Μετά την χρήση τους, τα αντικείμενα μπορούν να εισέλθουν πάλι στον κύκλο από το θήμα (α) για ανακύκλωση και κοκκοποίηση

Στο τέλος του κύκλου ζωής (EoL) τα προϊόντα συλλέγονται ως απόβλητα. Για την αντιμετώπιση πιθανών μεικτών ή μολυσμένων υλικών, πρέπει να πραγματοποιηθεί διαδικασία διαχωρισμού. Μετά τον διαχωρισμό των απορριμμάτων, τα χρησιμοποιήσιμα μεμονωμένα τεμάχια «ψιλοκόβονται» . Έπειτα εισέρχονται ξανά στην κατασκευή ως υλικό τροφοδοσίας για τη διαδικασία εκτύπωσης 3D. Με τη δημιουργία νέων προϊόντων στη διαδικασία εκτύπωσης 3D ο βρόχος υλικού κλείνει (Pavlo et al., 2018 ; Juraschek et al., 2017). Σε αυτόν τον κύκλο, προστίθεται αξία στα προϊόντα, καθώς μετά την χρήση τους, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων προϊόντων καθώς και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (Pavlo et al., 2018). Εν ολίγοις, οι πρακτικές κλειστού βρόχου μπορούν να είναι μια εφικτή λύση για την διαχείριση των αποβλήτων, πράγμα που έχει εξαιρετικά πλεονεκτήματα από περιβαλλοντική άποψη και συμβάλλουν στην υιοθέτηση της Κυκλικής Οικονομίας (Zhao et al., 2018).

5.2.3. Ανακύκλωση αποβλήτων και αντικειμένων στο τέλος της ζωής τους

Στην συνέχεια θα αναλυθεί η διαδικασία της ανακύκλωσης σε διάφορα υλικά, συγκεκριμένα το 5.2.3.1 πραγματεύεται το πλαστικό, το 5.2.3.2 τα ηλεκτρονικά απόβλητα και τους μαγνήτες, το 5.2.3.3 το γυαλί, την άμμο και το σκυρόδεμα, το 5.2.3.4 το χαρτί και τέλος, το 5.2.3.5 τα ελαστικά.

5.2.3.1. Πλαστικό

Με την αύξηση του πληθυσμού παγκοσμίως, υπάρχει μεγάλη ανησυχία στην βιομηχανία πλαστικού, τόσο για την παραγωγή όσο και για την ανακύκλωση των πλαστικών αποβλήτων (Domingues et al., 2017). Η αύξηση της χρήσης των τρισδιάστατων εκτυπωτών οδηγεί και στην ζήτηση για περισσότερη ποσότητα θερμοπλαστικών, άρα και στην αύξηση των αποβλήτων (Lee et al., 2019). Η ανακύκλωση των πλαστικών αποβλήτων είναι από τα πιο ουσιαστικά στοιχεία για την υιοθέτηση της κυκλικής οικονομίας (Pavlo et al., 2018). Τα απορρίμματα πλαστικών είναι ανακτήσιμοι πόροι που μπορούν να δημιουργήσουν ξανά προϊόντα εμπορικής αξίας. Το πλαστικό, όταν γίνεται απόβλητο, μπορεί να αξιοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί (Domingues et al., 2017). Κάθε είδος ανακυκλώσιμου πλαστικού, από περιτυλίγματα συσκευασιών μέχρι παιδικά παιχνίδια, μπορεί να ανακυκλωθεί σε νήμα (Wilkinson & Core, 2015). Για την αξιοποίηση των προϊόντων που έχουν απορριφθεί και είναι πλέον απόβλητα, υπάρχουν πολλές τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν. Η ανακύκλωση πλαστικών μπορεί να γίνει με τέσσερις τρόπους, εκ νέου εξώθηση, μηχανική ανακύκλωση, χημική ανακύκλωση, και ανάκτηση θερμότητας μέσω της καύσης (Singh et al., 2016).

Εκτός από τα κλασσικά πλαστικά απόβλητα, ακόμα και οι ίδιοι οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές παράγουν απορρίμματα. Για παράδειγμα αποτυχημένες ή/και δοκιμαστικές εκτυπώσεις, σπασμένα εξαρτήματα, παραγωγή πρωτότυπων αντικειμένων που δεν χρησιμεύουν κάπου έπειτα (Lee et al., 2019), δευτερεύουσες δομές όπως στηρίγματα και βάσεις, που μετά την χρήση τους απορρίπτονται ως απόβλητα (Charles et al., 2019), είναι κλασσικές περιπτώσεις παραγωγής φύρας. Ωστόσο ορισμένα βασικά υλικά σε εκτυπωμένα προϊόντα μπορούν να επεξεργασθούν και

να έρθουν στην αρχική μορφή νήματος και να χρησιμοποιηθούν ως ανακυκλωμένο υλικό (Wilkinson & Core, 2015). Στην προσθετική κατασκευή λοιπόν δίνεται μεγάλη προσοχή στην ανακύκλωση αυτών των αποβλήτων για την επαναχρησιμοποίηση τους ως πρώτη ύλη για την τροφοδοσία των τρισδιάστατων εκτυπωτών (Lee et al., 2019). Ορισμένοι οργανισμοί όπως Plastic Bank, Perpetual Plastics Project, και ProjectSeafood, έχουν αφιερωθεί αποκλειστικά σε αυτό το εγχείρημα, δηλαδή στην ανακύκλωση πλαστικών για την παραγωγή νήματος για την τρισδιάστατη εκτύπωση (Charles et al., 2019). Υπάρχουν μηχανές που αναπτύχθηκαν από την Coca Cola και το Will.i.am's που ανακυκλώνουν πλαστικά δοχεία παράγοντας νήμα. Αυτά τα μηχανήματα αλέθουν το πλαστικό, το λιώνουν και έπειτα αυτό εξωθείται ως υλικό τροφοδοσίας για τον τρισδιάστατο εκτυπωτή (Wilkinson & Core, 2015).

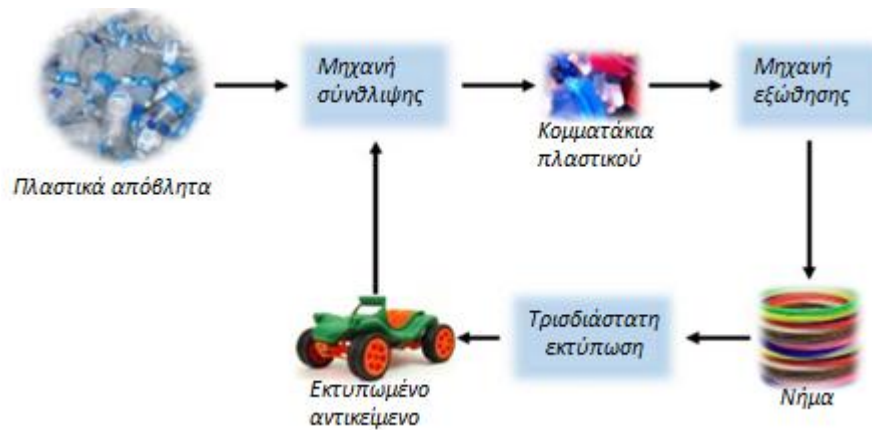
Οι Mohammed et al. (2019) στην έρευνα τους ανέλυσαν την μέθοδο που ακολουθείται για την προετοιμασία των πλαστικών αποβλήτων ώστε να γίνουν τροφοδοτικό νήμα. Πρώτο βήμα λοιπόν είναι ο διαχωρισμός των πλαστικών αντικειμένων από τα μεταλλικά και τα μη-πλαστικά. Έπειτα, πρέπει να πλυθούν ελαφρώς για να φύγει η σκόνη, οι ρύποι και οι ακαθαρσίες, και να στεγνώσουν στον ήλιο για να είναι έτοιμα να κοκκοποιηθούν (βλ. Σχήμα 5-2-13). Η κοκκοποίηση πραγματοποιήθηκε με διάσπαση των πλαστικών τμημάτων σε θραύσματα που ήταν περίπου 150x300mm, και στη συνέχεια τροφοδοτήθηκαν σε ένα χειροκίνητο μύλο για να χωριστούν σε μικρούς σβόλους. Η διαδικασία λείανσης πραγματοποιήθηκε σε πολλαπλούς κύκλους, προτού τα προκύπτοντα θραύσματα διαχωριστούν χρησιμοποιώντας μια προσαρμοσμένη συσκευή πλέγματος, με μέγεθος πλέγματος 4 mm.



Σχήμα 5-2-13: Η διαδικασία ανάκτησης πλαστικού και προετοιμασίας του για κοκκοποίηση, από το πείραμα των Mohammed et al. (2019), (α) Συλλογή πλαστικών (β) αποσυναρμολόγηση τους στα επιμέρους κομμάτια (γ) σύνθλιψη (δ) αφυδάτωση και ξήρανση τους

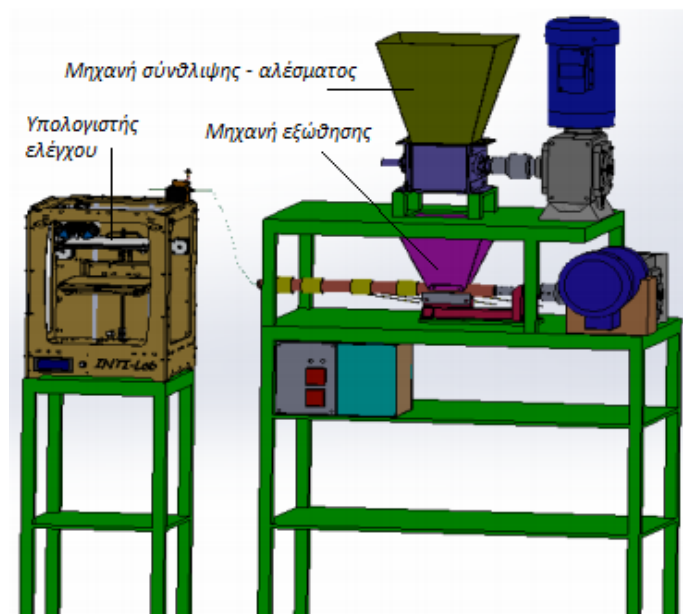
Σε αυτό το πλαίσιο κινήθηκε η έρευνα των Romero-Alva et al., (2018), που σε γενικές γραμμές συλλέγονται πλαστικά μπουκάλια, οδηγούνται σε μία μηχανή σύνθλιψης όπου και κομματιάζονται σε μικρά ίσα πλαστικά κομματάκια, έπειτα λιώνουν και περνάνε στο εξωθητή, όπου τέλος δημιουργείται το νήμα τροφοδοσίας του τρισδιάστατου εκτυπωτή (βλ. Σχήμα 5-2-14). Αυτό το μοντέλο εργασίας είναι τεχνολογικά βιώσιμο και πλήρως φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς όχι μόνο διαχειρίζεται μεγάλο όγκο μη χρήσιμων πλαστικών αλλά επίσης αν το προϊόν που εκτυπωθεί για τον οποιοδήποτε λόγο έχει κάποιο ελάττωμα, μπορεί επιτόπου να ξαναεισαχθεί στο δοχείο συνθλίψεως και να επαναχρησιμοποιηθεί.

Οι Lee et al. (2019) εξίσου μελέτησαν λεπτομερώς αυτό το μοντέλο ανακύκλωσης για την δημιουργία τροφοδοτικού νήματος για τους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Το προτεινόμενο τους σύστημα αποτελείται από ξεχωριστά μηχανήματα, για το άλεσμα του υλικού (μηχάνημα σύνθλιψης), την εξώθηση του σε μορφή νήματος (μηχάνημα εξώθησης) και την προσαρμογή του

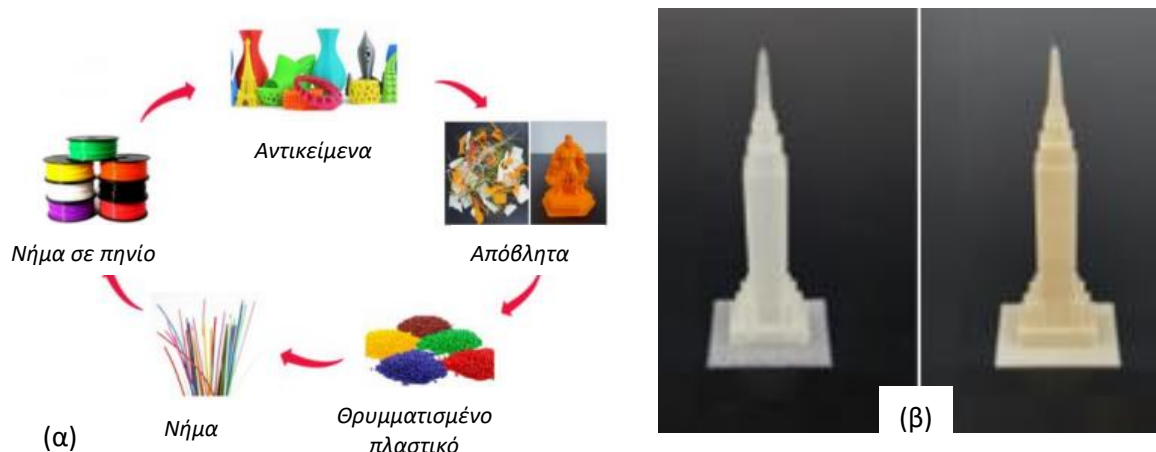


Σχήμα 5-2- 54: Το σύστημα ανακύκλωσης, εξώθησης νήματος και τρισδιάστατης εκτύπωσης, από τους Romero-Alva et al. (2018)

στην επιθυμητή διάμετρο (υπολογιστής ελέγχου) (βλ. Σχήμα 5-2-15). Έγινε χρήση σε απόβλητα ABS και PLA, και δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα αντικείμενα, στα οποία έπειτα πραγματοποιήθηκαν μηχανικά τεστ και έγινε σύγκριση με τα αντίστοιχα από γνήσια, καθαρή πρώτη ύλη (βλ. Σχήμα 5-2-16). Από άποψη εμφάνισης και διαστασιολογικής ακρίβειας, τα αντικείμενα δεν είχαν καμία σημαντική διαφορά, ωστόσο το ανακυκλωμένο προϊόν είχε μία αλλοίωση στο χρώμα, καθώς ήταν πιο κιτρινωπό. Από άποψη μηχανικής απόδοσης, η μέγιστη τάση πριν τη θραύση μειώθηκε περίπου κατά 11% στο ανακυκλωμένο αντικείμενο, ενώ επίσης παρατηρήθηκε αύξηση στην ακαμψία και την ευθραυστότητα του. Η προσθήκη κάποιου πρόσθετου όπως σταθεροποιητής ή προαγωγός προσκόλλησης μπορεί να αποτρέψει αυτή την υποβάθμιση των ιδιοτήτων που προκύπτει λόγω της θερμικής και μηχανικής καταπόνησης κατά τη διαδικασία.



Σχήμα 5-2-15: Η διάταξη μηχανής σύνθλιψης – εξώθησης – ελέγχου για την παραγωγή νήματος, από τους Romero-Alva et al. (2018)



Σχήμα 5-2-16: Η έρευνα των Lee et al. (2019). (α) Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανακύκλωση πλαστικού (β) Η σύγκριση των τεμαχίων εκτυπωμένων από γνήσιο υλικό (αριστερά) και από ανακυκλωμένο (δεξιά)

Η έρευνα των Chong et al. (2017), αναλύει ανακυκλωμένο HDPE και ABS στην μορφή νιφάδων και σφαιριδίων, με εκτεταμένο έλεγχο των ιδιοτήτων του για να διαπιστωθεί αν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τροφοδοτικού νήματος για τους οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Το HDPE θεωρείται από τα πιο δημοφιλή πλαστικά υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν σε τροφοδοτικό νήμα, διότι βρίσκεται εύκολα στα απορρίμματα των νοικοκυριών, για παράδειγμα στα πλαστικά δοχεία, ενώ επίσης έχει μεγαλύτερη αντοχή και ολκιμότητα συγκριτικά με τα χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένια. Το ABS επίσης, είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές, το δημοφιλέστερο για επαναχρησιμοποίηση. Αυτή η διαδικασία απαιτεί μία μηχανή σύνθλιψης και έναν εξωθητή, εξοπλισμό που βρίσκεται εύκολα σε ερευνητικά κέντρα και εργαστήρια, έτσι τα απορρίμματα μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη σε μορφή νήματος για την ΠΚ. Η έρευνα αυτή αποτελεί έναν οδηγό αναφοράς για μελλοντικές μελέτες στην αξιοποίηση των πλαστικών απόβλητων στην 3D εκτύπωση, στο πλαίσιο πάντα της δημιουργίας πράσινης βιομηχανίας προσθετικής κατασκευής. Στον πίνακα 5-2-2, γίνεται μία ποιοτική σύγκριση στα νήματα πολυμερούς από κομμάτια και νιφάδες HDPE, και ABS.

Πίνακας 5-2- 2: Ποιοτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων τριών διαφορετικών νημάτων ανακυκλωμένου πλαστικού, κατά την έρευνα και την πειραματική διαδικασία των Chong et al. (2017)

Υλικό νήματος (ανακυκλωμένο)	Κομμάτια	Νιφάδες	
	HDPE	HDPE	ABS
Φυσικές ιδιότητες			
Κινητικότητα	★★★★☆	★☆☆☆☆	★★★★☆
Αντοχή στο νερό	★★★★☆	★★★★★	★★☆☆☆
Θερμική σταθερότητα	★★★★☆	★★☆☆☆	★★★★☆
Φιλικό προς το περιβάλλον	★★★★☆	★★★★☆	☆☆☆☆☆
Ωριμότητα της τεχνολογίας και υιοθέτηση από το κοινό	★★☆☆☆	★☆☆☆☆	★★★★☆
Ασφάλεια	★★★★☆	★★★★☆	★★☆☆☆

Στο πείραμα των Lanzotti et al. (2018), σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες ανακυκλώσιμου PLA για την Προσθετική Κατασκευή, εξήχθη το συμπέρασμα πως η ανακύκλωση μία και δύο φορές ενός νήματος δεν επηρέασε σημαντικά τις ιδιότητες του, πράγμα που άλλαξε δραματικά σε περαιτέρω κύκλους ανακύκλωσης. Τα αποτελέσματα την τρίτη φορά ανακύκλωσης, είχαν αυξημένη τυπική απόκλιση, δηλαδή μεγάλη μεταβλητότητα (βλ. Πίνακα 5-2-3). Η μείωση στην αντοχή καθώς και η μεγάλη μεταβλητότητα μπορούν να αποδοθούν σε διάφορους παράγοντες, και είναι πιθανό να αντιμετωπισθούν με την βελτιστοποίηση της διαδικασίας εκτύπωσης και ανακύκλωσης. Όπως και να 'χει, κατέληξαν στο ότι το ανακυκλωμένο PLA στην τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία αξιοσημείωτη επιλογή, καθώς η ανακύκλωση δεν άλλαξε σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή (Lanzotti et al., 2018).

Πίνακας 5-2- 3: Τα αποτελέσματα της μελέτης των (Lanzotti et al., 2018) για τη σύγκριση της αντοχής νήματος PLA, γνήσιο και έως τέσσερις φορές ανακυκλωμένο

Νήμα PLA	Αντοχή (MPa)
Καθαρό	119,1 ± 6,6
Μία φορά ανακυκλωμένο	106,8 ± 9,0
Δύο φορές ανακυκλωμένο	108,5 ± 9,9
Τρεις φορές ανακυκλωμένο	75,0 ± 16,2

Οι Czyżewski et al. (2018) εξέτασαν το υλικό ABS ανακυκλωμένο, για τη δημιουργία πλαστικού νήματος. Θεωρείται ότι η ποιότητα του νήματος από δευτερογενές υλικό, εξαρτάται από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μηχανική ανακύκλωση (δηλαδή το αλέθισμα και την εκ νέου «κόκκωση») καθώς και από την σύνθεση των κόκκων του ανακυκλωμένου υλικού. Απώτερος σκοπός της έρευνας είναι η μεγιστοποίηση της ποιότητας και της ακρίβειας διαστασιολόγησης των παραγόμενων αντικειμένων από ανακυκλωμένο ABS.

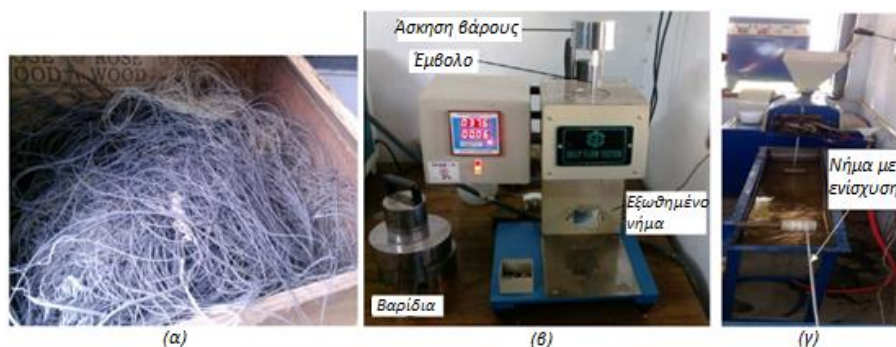
Στην έρευνα των Singh et al. (2018) επιχειρήθηκε η ανάπτυξη τροφοδοτικού νήματος με βάση ανακυκλωμένο πολυμερές ενισχυμένο με SiC/Al₂O₃ για μεγαλύτερη βιωσιμότητα. Πρώτο βήμα είναι η συλλογή πλαστικών απορριμμάτων, ιδιαίτερα HDPE για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, από την τοπική βιομηχανία. Έπειτα, η διαλογή των απορριμμάτων έγινε χειροκίνητα, και ελέγχθηκαν οι ρεολογικές και θερμικές τους ιδιότητες. Αφότου έγινε η ενίσχυση του πολυμερούς, παρατηρήθηκε ότι οι ρεολογικές και θερμικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού δεν είχαν μεγάλη διαφορά από το γνήσιο, επομένως μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως νήμα για την τρισδιάστατη εκτύπωση και την μέθοδο FDM. Μετά από έλεγχο των μηχανικών του ιδιοτήτων, διαπιστώθηκε πως θα έδινε καλά και ποιοτικά αποτελέσματα στην εκτύπωση αντικειμένων, πράγμα που αποδεικνύει ότι αυτή η τεχνική ανακύκλωσης απορριπτόμενων πολυμερών μεγαλώνει την διάρκεια της ωφέλιμης ζωής των αντικειμένων και θα παρακινήσει τους ερευνητές να την υιοθετήσουν στην προσθετική κατασκευή.

Κατά τη μελέτη των Anderson et al. (2017), υπολογίσθηκαν και έπειτα συγκρίθηκαν οι ιδιότητες αντοχής, σκληρότητας και εφελκυσμού δειγμάτων από καθαρό νήμα PLA και από ανακυκλωμένο. Για την ακρίβεια αφότου εκτυπώθηκε ένα αντικείμενο από ατόφια πρώτη ύλη, το ίδιο ανακυκλώθηκε και επαναχρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του ίδιου αντικειμένου, και οι

ιδιότητες του συγκρίθηκαν με τις ιδιότητες του πρώτου. Επιλέχθηκε το PLA γιατί ανακυκλώνεται με μεγάλη ευκολία σε σχέση με τα υπόλοιπα πλαστικά στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το ανακυκλωμένο υλικό που μετατράπηκε σε νήμα πρώτης ύλης δημιούργησε ένα αντικείμενο με παρόμοιες ιδιότητες με το γνήσιο, ενισχύοντας έτσι τις προοπτικές αυτής της μεθόδου για μείωση των καταναλισκόμενων πόρων, ενέργειας, κόστους, και της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

Στην έρευνα των Cunico et al. (2019), έγινε χρήση ανακυκλωμένων υλικών με σκοπό την βελτίωση των χαρακτηριστικών συναρμολογημένων αντικειμένων, παραδείγματος χάριν στην επιδιόρθωση ή την συγκόλληση τους, και επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα υιοθέτησής της διαδικασίας σε πολλές εφαρμογές. Από πλευρά οικολογικής ενσυναίσθησης, με αυτή τη διαδικασία το λιγότερο 9% των παραγόμενων απόβλητων επιστρέφει ξανά ως είσοδος στην παραγωγή, ενώ θέτει προοπτικές για επιστροφή στην παραγωγή μεγαλύτερου πλήθους αποβλήτων απ' ότι τελικά θα απορριφθεί ως πλέον μη χρήσιμο. Όσον αφορά στην απόδοση, η μηχανική αντοχή ενός αντικειμένου από σύνθετο υλικό, τμήματα του οποίου είναι πάστα ανακυκλωμένου πλαστικού, είναι αυξημένη συγκριτικά με την αντοχή του αντίστοιχου αντικειμένου που κατασκευάστηκε από υλικό μη επεξεργασμένο.

Στην μελέτη των Singh et al. (2016) η εστίαση στράφηκε στα βιομηχανικά απόβλητα Nylon-6, και την επιτυχημένη ανακύκλωση τους ως ενισχυμένο νήμα τροφοδοσίας για την μέθοδο FDM (βλ. Σχήμα 5-2-17).



Σχήμα 5-2-17: Σύμφωνα με τους Singh et al. (2016) (α) Απόβλητα Nylon-6 (β) Εξώθηση νήματος (γ) Ενισχυμένο νήμα για αυξημένη απόδοση

Οι Herianto et al. (2020), μελέτησαν την διαδικασία παραγωγής νήματος για τροφοδοσία FDM από ανακυκλωμένο PP (πολυπροπυλένιο), και την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας για το βέλτιστο αποτέλεσμα. Κατέληξαν σε ταχύτητα περιστροφής του spooler 4rpm, ταχύτητα εξώθησης 40 rpm και θερμοκρασία εξώθησης 200°C, για την παραγωγή ενός απλού νήματος διαμέτρου 1.6 χιλιοστών. Ωστόσο, η ποιότητα της επιφανείας του παραγόμενου αντικειμένου ήταν τραχιά και με μεγάλη καμπυλότητα, επομένως κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω έρευνα.

Στην έρευνα των Paciorek-Sadowska et al. (2019), αναπτύχθηκε μία μέθοδος κατά την οποία διαχειρίστηκαν με γρήγορο, οικονομικό και οικολογικό τρόπο απόβλητα PLA με την προοπτική επαναχρησιμοποίησής τους σε άλλη μορφή, όπως για παράδειγμα θερμομονωτικό polyurethane material (βλ. Σχήμα 5-2-18).



Σχήμα 5-2- 68: Απόβλητο PLA κατά τους Paciorek-Sadowska et al. (2019) (α) μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση (β) αφότου περάσει από την μηχανή σύνθλιψης

Στην μελέτη των Mosaddek et al. (2018), έγινε μια προσπάθεια για διαχείριση της πλαστικής μόλυνσης μέσω της σύγχρονης τάσης για παραγωγή αυτόνομων οχημάτων για την ικανοποίηση πληθώρας απαιτήσεων, συγκεκριμένα δηλαδή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα drone με τρισδιάστατη εκτύπωση, χρησιμοποιώντας απόβλητα και συγκεκριμένα ανακυκλωμένα πλαστικά δοχεία. Έγινε πλήρης ανάλυση του σχεδιασμού και της κατασκευής, καθώς και πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένοι έλεγχοι που έκριναν επιτυχημένο αυτό το εγχείρημα για την χαμηλού κόστους παραγωγή οχήματος από πλαστικά μπουκάλια. Η βασική διαδικασία που ακολουθήθηκε, ήταν ο καθαρισμός των πεταμένων μπουκαλιών, και έπειτα ο τεμαχισμός τους σε μικρά πλαστικά κομματάκια. Τα κομματάκια έπειτα φιλτραρίστηκαν και μετά από μια διαδικασία «spooling» σχημάτισαν χορδές διαμέτρου 1.75 και 2.85 χιλιοστών. Ως αποτέλεσμα, το τροφοδοτικό νήμα για τον τρισδιάστατο εκτυπωτή αποτελούνταν κατά 90% από ανακυκλωμένο υλικό. Χοντρικά, 22 πλαστικά δοχεία με βάρος περίπου 35 γραμμαρίων δημιούργησαν νήμα διαμέτρου 1.75 χιλιοστών και 750 γραμμαρίων. Αυτή η τεχνολογία εξελίχθηκε σε εμπορικό προϊόν που μπορεί να διατεθεί για αγορά από καταναλωτές σε προσιτή τιμή.

Οι Cruz Sanchez et al. (2017), ασχολήθηκε με το ανακυκλωμένο PLA για τη χρήση του στην μέθοδο FDM. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν εξαιρετικές προοπτικές για την υιοθέτηση του ανακυκλωμένου υλικού στους τρισδιάστατους εκτυπωτές ανοιχτής πηγής. Ωστόσο, το βασικότερο συμπέρασμα επιβεβαίωσε πως η ανακύκλωση του υλικού μειώνει τις μηχανικές του ιδιότητες, και κατ' επέκταση την απόδοση του παραγόμενου αντικειμένου.

Στην μελέτη των Exconde et al. (2019), εξετάστηκαν διάφοροι τύποι αγνού και ανακυκλωμένου πλαστικού (LDPE, HDPE, PET και PP), μέσω μίας πολυκριτηριακής διαδικασίας λήψης αποφάσεων για τη δημιουργία τροφοδοτικού νήματος. Το κύριο συμπέρασμα ήταν πως το ανακυκλωμένο PET έχει καλύτερες ιδιότητες και απόδοση από το αγνό. Έτσι, θέτει γερές βάσεις για την χρήση και την υιοθέτηση του από την Προσθετική Κατασκευή ως εναλλακτικό νήμα πολυμερούς, για την τρισδιάστατη εκτύπωση.

Η έρευνα των Peeters et al. (2019), στοχεύει στην ανάλυση των εμποδίων που αναδύονται στο εγχείρημα της ανακύκλωσης πλαστικού για τη μετέπειτα χρήση του στην Προσθετική Μέθοδο, πραγματοποιώντας συνεντεύξεις με ειδήμονες του πεδίου της βιομηχανίας. Συνολικά εντοπίζονται 22 εμπόδια, τα οποία ταξινομούνται σε 5 γενικούς άξονες: τεχνικά, οικονομικά, κοινωνικά, οργανωτικά, και κανονιστικά. Έπειτα από εκτενή ανάλυση με την βοήθεια της μεθόδου ISM, τα κυριότερα εμπόδια είναι ονομαστικά «γραμμική οικονομία και καταναλωτική κοινωνία» και «απαίτηση υψηλής ποιότητας από τους καταναλωτές». Είναι τα κυριότερα, διότι από αυτά

προκύπτουν όλα τα επόμενα, δηλαδή αν αυτά καταπολεμηθούν, αυτομάτως θα περιοριστούν και τα επακόλουθά τους. Εξετάζοντας επομένως αυτούς τους περιορισμούς, φαίνεται η αξία υιοθέτησης της κυκλικής οικονομίας.

Επομένως, η διαδικασία της ανακύκλωσης πρέπει να μελετηθεί με γνώμονα περισσότερα στάδια, παρά απλά την συλλογή των πλαστικών απορριμμάτων (Pavlo et al., 2018), και η βιομηχανία πλαστικών έδειξε ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι να εκμεταλλευθεί η φύρα των απορριφθέντων αντικειμένων (Singh et al., 2018), σε μία πληθώρα εφαρμογών και πεδίων (Singh et al., 2016). Η πιο συνηθισμένη διαδικασία είναι η σύνθλιψη των απορριμμάτων και η τεμάχιση τους σε πολλά μικρά κομμάτια, και έπειτα η εξώθηση τους σε μορφή νήματος (Fateri et al., 2018). Ένας άλλος τρόπος να αξιοποιηθεί το αποβληθέν υλικό είναι η ανάμειξη του με καινούριο (Mohammed et al., 2019). Αυτή η ενίσχυση του ανακυκλωμένου πλαστικού με νέο υλικό, ακόμα και μεταλλικό (Singh et al., 2019), βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τις τελικές του μηχανικές ιδιότητες (Mohammed et al., 2019).

Δυστυχώς, κάθε φορά που ένα πολυμερές υπόκειται στον θερμικό κύκλο που προϋποθέτει η ανακύκλωση του, οι μηχανικές του ιδιότητες μειώνονται (Woern et al., 2018), για παράδειγμα η αντοχή στον εφελκυσμό των ανακυκλωμένων υλικών, είναι πολύ μικρότερη από αυτή των καθαρών υλικών (Turku et al., 2018). Αυτό δεν σημαίνει μόνο ότι το παραγόμενο αντικείμενο δεν θα έχει την αναμενόμενη αντοχή, αλλά ότι οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού δεν θα μπορούν να ανακτηθούν και να επαναληφθούν (Poron et al., 2018). Αυτή η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να αποδοθεί σε θερμομηχανικές αντιδράσεις κατά την επανεπεξεργασία, γήρανση του υλικού κατά τη χρήση και παρουσία προσθέτων, μη χρήσιμων ουσιών (Turku et al., 2018). Γενικά, το ίδιο υλικό μπορεί να υποστεί έως και 5 κύκλους ανακύκλωσης χωρίς να χρειαστεί περεταίρω προσθήκη γνήσιας πρώτης ύλης ή άλλων πρόσθετων για την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων (Woern et al., 2018). Ένας άλλος τρόπος να αποφευχθεί η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των συσκευών που κατασκευάζονται από ανακυκλωμένα πολυμερή, είναι βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους της διαδικασίας (Lanzotti et al., 2018).

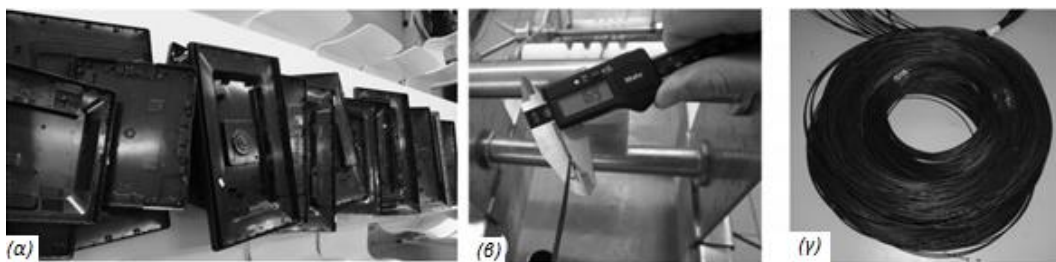
5.2.3.2. Ηλεκτρονικά απόβλητα και μαγνήτες

Η ορατή και συνεχής ανάπτυξη της ηλεκτρονικής βιομηχανίας αποδεικνύεται συνεχώς μέσω της συνεχόμενης παραγωγής νέων και καινοτόμων προϊόντων. Μετά από μία σύντομη περίοδο χρήσης, συνήθως έως πέντε χρόνια, τα περισσότερα εξ αυτών χάνουν τις λειτουργικές τους ιδιότητες και απορρίπτονται ως απόβλητο προϊόν (Czyzewski et al., 2018). Ένα από τα σοβαρότερα και πιο επίμονα προβλήματα των τελευταίων δεκαετιών λοιπόν, είναι η ραγδαία αύξηση των ηλεκτρονικών αποβλήτων (Czyzewski et al., 2018 ; Gaikwad et al., 2018), ενώ οι χαμηλοί βαθμοί ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης τους, δυσχεραίνουν ακόμα περισσότερο την κατάσταση (Gaikwad et al., 2018).

Μία αναφορά από την United Nation αναφέρει πως τα πλαστικά απόβλητα θα φτάσουν 52.2 εκατομμύρια τόνους μέχρι το 2021, με μία ετήσια αύξηση 3-4% (Gaikwad et al., 2018). Αν και η ανακύκλωση ηλεκτρονικών αποβλήτων ξεκίνησε τη δεκαετία του 2000 και ενισχύεται με τη νομοθεσία περί διαχείρισης προϊόντων που στοχεύει τηλεοράσεις και υπολογιστές (Giurco et al., 2014), το ποσοστό ανακύκλωσης των ηλεκτρονικών αποβλήτων είναι αρκετά χαμηλό, της τάξης

του 15%, και αυτό οφείλεται στη σύνθετη φύση των αποβλήτων αυτών, καθώς αποτελούνται από διάφορα υλικά συμπεριλαμβανομένου μέταλλο, γυαλί και πλαστικό. Το υλικό που αποτελεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα ηλεκτρονικά απόβλητα είναι το πλαστικό, όπου αντιπροσωπεύει περίπου το 40-58% κατά βάρος των κινητών τηλεφώνων, και 70% κατά βάρος των εκτυπωτών. Στο σύνολο των ηλεκτρονικών αποβλήτων όλων των συσκευών, το πλαστικό αποτελεί σχεδόν το 20% (Gaikwad et al., 2018).

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες για την διαχείριση των ηλεκτρονικών αποβλήτων. Οι Czyżewski et al. (2018) πρότειναν μια διαδικασία για την δευτερεύουσα χρήση του περιβλήματος ηλεκτρονικών συσκευών για την παραγωγή τροφοδοτικού νήματος μεθόδου FDM. Τα περιβλήματα καθαρίστηκαν χρησιμοποιώντας πίεση αέρα χωρίς απορρυπαντικά και χωρίς να βλάψουν το άνω στρώμα του περιβλήματος αυτών των εξαρτημάτων. Τα τμήματα που περιείχαν κόλλα, ετικέτες ή μεταλλικά καλούπια διαχωρίστηκαν. Τα περιβλήματα έπειτα κόπηκαν αρχικά με χειροκίνητη εργαστηριακή γκιλοτίνα για την ανάλυση της κατανομής του πάχους του τοιχώματος. Στη συνέχεια, το υλικό τεμαχίστηκε και κοσκινίστηκε με ανοίγματα διαμέτρου $\varnothing 8$ mm (βλ. Σχήμα 5-2-19). Μετά πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι στο υλικό, και επιβεβαιώθηκε η πιθανότητα αξιοποίησης του για την εξώθηση νήματος που χρησιμοποιείται στην ΠΚ. Οι μηχανικές ιδιότητες του εξαρτώνται από την τεχνολογία κατασκευής και τις παραμέτρους της διαδικασίας, κυρίως από τη θερμοκρασία και την πίεση. Η κύρια αιτία της σημαντικής επιδείνωσης των μηχανικών ιδιοτήτων είναι η εμφάνιση περιοχών ασυνέχειας στα δείγματα.



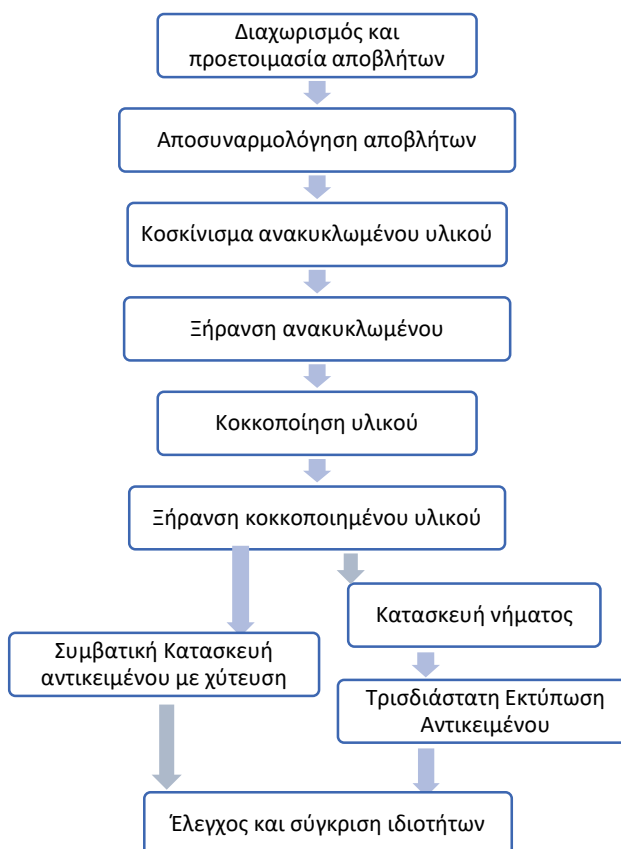
Σχήμα 5-2- 197: Ανακύκλωση ηλεκτρονικών αποβλήτων, κατά τους Czyżewski et al. (2018) (α) απορρίμματα οθονών υπολογιστών (β) μέτρηση της διαμέτρου του νήματος (γ) το τελικό νήμα ABS

Οι Gaikwad et al. (2018) μελέτησαν επίσης την ανάκτηση του πλαστικού (πολυανθρακικό) από ηλεκτρονικά απόβλητα, συγκεκριμένα από εκτυπωτές στο τέλος του κύκλου ζωής τους, για την ανακύκλωση και μετατροπή σε βιώσιμο τροφοδοτικό νήμα. Μελετήθηκαν τα αποτελέσματα της επαναλαμβανόμενης ανακύκλωσης, έως και τέσσερις κύκλους εξώθησης. Οι τρισδιάστατες εκτυπώσεις από πλαστικά ηλεκτρονικά απόβλητα αποδείχθηκαν πιο ευέλικτες σε σύγκριση με αυτές από καθαρό πλαστικό. Επιπλέον, οι μελέτες LCA σχετικά με τη διαδικασία παραγωγής νήματος δείχνουν μείωση κατά 28% των εκπομπών CO₂ των πλαστικών από ηλεκτρονικά απόβλητα συγκριτικά με την καθαρή πρώτη ύλη.



Σχήμα 5-2- 8: Σχηματική αναπαράσταση μετατροπής ηλεκτρονικών αποβλήτων σε πλαστικό νήμα για ΠΚ, από τους Gaikwad et al. (2018)

Στο σχήμα 5-2-21 που ακολουθεί, φαίνεται η διαδικασία που ακολουθείται συνήθως για την αξιοποίηση των ηλεκτρονικών αποβλήτων και την παραγωγή τροφοδοτικού νήματος για την Προσθετική Κατασκευή, όπως προτάθηκε από τους Czyżewski et al. (2018).

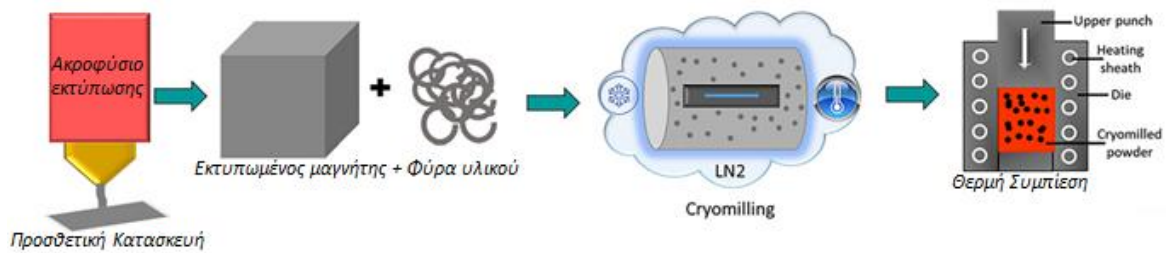


Σχήμα 5-2-21: Τα στάδια επεξεργασίας των ηλεκτρονικών αποβλήτων για την παραγωγή νήματος ΠΚ, υιοθετημένο από τους Czyżewski et al. (2018)

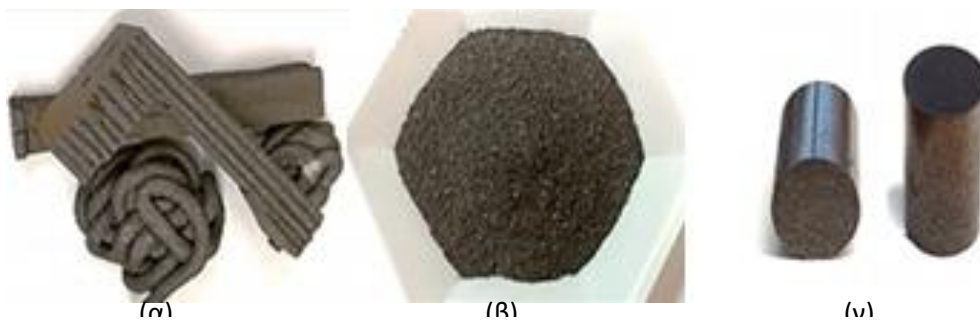
Επομένως, αποδεικνύεται πως τα ηλεκτρονικά απόβλητα αποτελούν μία εξαιρετική πηγή για υποψήφια ανακυκλώσιμα υλικά και την αξιοποίησή τους στην τρισδιάστατη εκτύπωση (Mohammed et al., 2019).

Η ανακύκλωση μαγνητών, καθότι εμπεριέχουν ακριβά και σπάνια στοιχεία του εδάφους, έχει τραβήξει την προσοχή των ερευνητών λόγω της ανησυχίας για πιθανές διαταράξεις ή και διακοπές της εφοδιαστικής αλυσίδας αυτών των στοιχείων (Gandha et al., 2019).

Στην έρευνα των Gandha et al. (2019), χρησιμοποιήθηκαν μαγνήτες Nd-Fe-B, για την ανάπτυξη μιας διαδικασίας ανακύκλωσης μαγνητών, με με κρυογονική κονιοποίηση (cryomilling) και μετέπειτα ανακατασκευή των συνδεδεμένων μαγνητών (βλ. Σχήμα 5-2-22). Έτσι, φαίνεται η προοπτική για προηγμένη κατασκευή ανακυκλωμένων μαγνητών, ενώ όπως αποδείχθηκε, βελτιώθηκε τη πυκνότητα και η απόδοση τους, συγκριτικά με τους αρχικούς μαγνήτες.



Σχήμα 5-2- 92: Διαδικασία για την ανακύκλωση μαγνητών μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, υιοθετημένο από τους Gandha et al. (2019)



Σχήμα 5-2-23: Μαγνήτες κατασκευασμένοι μέσω Προσθετικής Κατασκευής (α) Αρχικός μαγνήτης (β) Πούδρα έπειτα από κρυογονική κονιοποίηση (γ) ανακυκλωμένος μαγνήτης, υιοθετημένο από Gandha et al. (2019)

Στην έρευνα των Khazdozian et al. (2018) περιγράφεται η προετοιμασία νημάτων μόνιμου μαγνήτη που προορίζονται για τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιώντας πούδρα Sm-Co που ανακτάται από ανακυκλωμένο πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Μετά από τεστ, δεν μειώθηκαν οι μαγνητικές ιδιότητες, αλλά αντιθέτως βελτιώθηκαν, πιθανώς λόγω ελαχιστοποιημένης περιστροφής σωματιδίων κατά τη φόρτωση της ανακυκλωμένης σκόνης Sm-Co σε PLA, σε σύγκριση με την αρχική σκόνη.

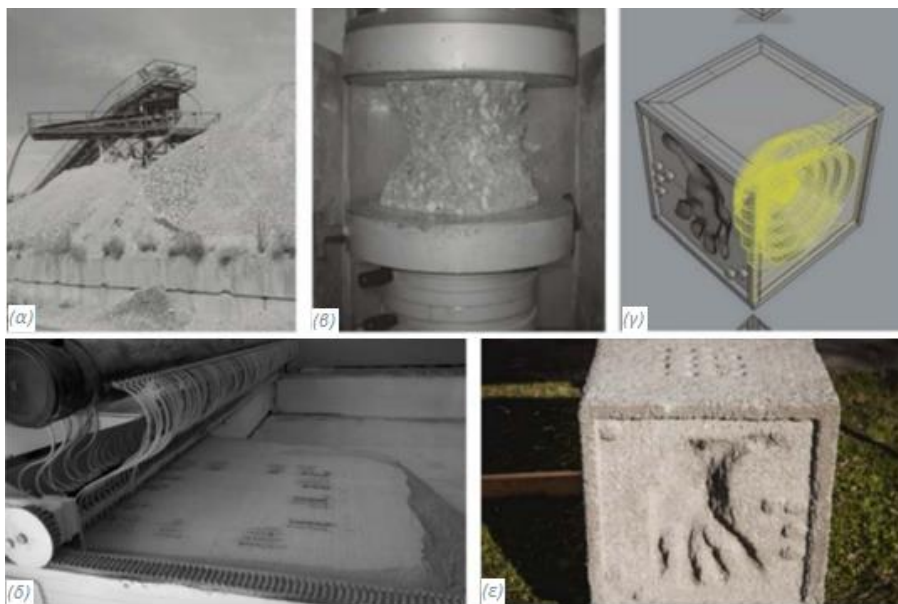
5.2.3.3. Γυαλί, άμμος και σκυρόδεμα

Όσον αφορά στον κατασκευαστικό τομέα, το κατά κόρον υλικό που είναι το τσιμέντο, είναι γνωστό πως συνδέεται με εκπομπές μεγάλης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα, γι' αυτό γίνονται προσπάθειες για εύρεση ανανεώσιμων υλικών (Stolz & Mühlaupt, 2020). Το γυαλί είναι 100% ανακυκλώσιμο υλικό, επομένως είναι δυνατό να ανακτηθεί από τα απόβλητα και να ανακυκλωθεί για άλλες χρήσεις. Μία δυνατή εφαρμογή του θα ήταν στον κατασκευαστικό τομέα, ως αντικαταστάτης των απαραίτητων πρόσθετων στο σκυρόδεμα. Γενικά ο τομέας των κτηρίων και της κατασκευής αποτελεί μία καλή διέξοδο για το ανακυκλωμένο γυαλί, καθώς το σκυρόδεμα είναι το πιο ευρέως καταναλισκόμενο υλικό μετά το νερό (Andrew et al., 2018). Έτσι, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αρχίσει να προσελκύει το ενδιαφέρον του κατασκευαστικού τομέα για την δυνατότητα που παρέχει να αξιοποιεί μέσω ανακύκλωσης τα απόβλητα γυαλιού (Ting et al., 2019).

Στην έρευνα των Andrew et al. (2018) λοιπόν, εξετάζεται η δυνατότητα να αντικατασταθούν τα απαραίτητα πρόσθετα στα υλικά με βάση το σκυρόδεμα που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, με ανακυκλωμένο γυαλί, καθώς και η επίδραση που έχει τελικά στο σκυρόδεμα τόσο στην υγρή μορφή του κατά την κατασκευή όσο και όταν σταθεροποιηθεί. Εξίσου με το ίδιο θέμα ασχολείται η έρευνα των Apparreddy et al. (2018), μία μελέτη περίπτωσης για την κατάσταση

στην Σιγκαπούρη, όπου μεγάλη ποσότητα άμμου μένει αχρησιμοποίητη, ως απόβλητο μετά από κατασκευές ή κατεδαφίσεις. Έτσι, εξετάζεται το ενδεχόμενο αξιοποίησης της ως πρόσθετο ανακυκλωμένου γυαλιού σε υλικό σκυροδέματος για την αντικατάσταση των απαραίτητων πρόσθετων. Εξετάσθηκαν δύο είδη σκυροδέματος σε αυτή τη διαδικασία, το OPC (Ordinary Portland Cement) και ένα γεοπολυμερές. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλύτερη συμπεριφορά του OPC. Στο ίδιο πλαίσιο κυμαίνεται και η μελέτη από τους Ting et al. (2019), εξετάζοντας εξίσου αυτή την νέα διέξοδο απόβλητων γυαλιών ως πρόσθετα σε υλικό σκυροδέματος.

Η μελέτη των Baiani & Altamura (2018) ασχολείται με δύο εφαρμογές για την αξιοποίηση ανακυκλωμένης άμμου και γυαλιού. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν ανακυκλωμένα πρόσθετα, άμμος και ορυκτά συνδετικά για την παραγωγή μονολιθικών υλικών με βάση το τσιμέντο για την τρισδιάστατη εκτύπωση (βλ. Σχήμα 5-2-24), και έπειτα με το ίδιο υλικό, παραγωγή αντικειμένων όπως έπιπλα. Αυτή η διαδικασία δίνει την δυνατότητα για την δημιουργία σύνθετων δομών και λειτουργικών αντικειμένων στον κατασκευαστικό τομέα όπως καλαίσθητα αστικά έπιπλα, χωρίς την σπατάλη υλικού και την παραγωγή αποβλήτων. Έπειτα πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της μηχανικής απόδοσης, και η σύγκριση του με τα αντίστοιχα συμβατικώς κατασκευασμένα αντικείμενα έδειξε ότι πρόκειται για ένα υλικό με καλές προοπτικές, τόσο σχετικά με την απόδοση του όσο και από άποψη αισθητικής.

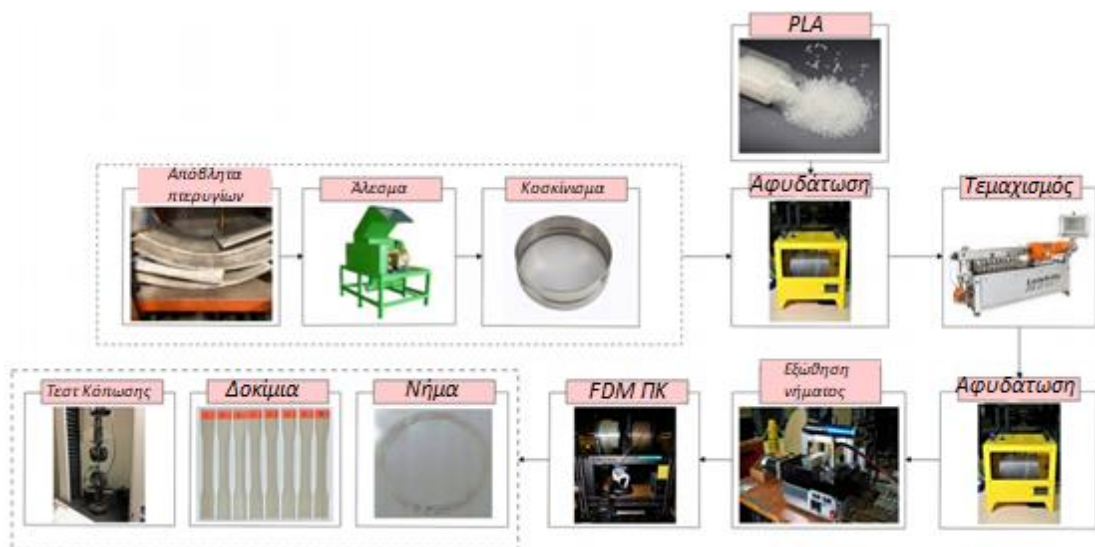


Σχήμα 5-2-24: Αξιοποίηση απόβλητης άμμου, κατά τους Altamura & Baiani (2019) (α) Αρχικά απόβλητα (β) Έλεγχος υλικού (γ) Σχεδιασμός και τρισδιάστατη μοντελοποίηση (δ) Τρισδιάστατη εκτύπωση (ε) Πρωτότυπο αντικείμενο από 100% ανακυκλωμένη άμμο

Ωστόσο, η διαδικασία αυτή παρουσίασε ορισμένους περιορισμούς σχετικά με την εφαρμογή της σε προσθετική κατασκευή μεγάλης κλίμακας. Η διάρκεια και το κόστος της διαδικασίας αποδείχθηκαν σχετικά μεγάλα, γεγονός που αποδίδεται κυρίως σε τεχνικά ζητήματα όπως όχι αρκετά εξελιγμένο εξοπλισμό που να καλύπτει όλες τις παραμέτρους, και την συνεχή ανάγκη για εποπτεία από εξειδικευμένους εργάτες. Το κόστος θα μπορούσε να μειωθεί έμμεσα, αν για παράδειγμα η διαδικασία ανακύκλωσης και 3D εκτύπωσης πραγματοποιούνταν απευθείας στο σημείο ενδιαφέροντος, για την αξιοποίηση σύνθετων αντικειμένων ακόμα και μεγάλων διαστάσεων, περιορίζοντας τα μεταφορικά κόστη και τις εκπομπές αερίων, με οικονομικό όφελος και φυσικά και περιβαλλοντικό. Εκτός αυτού, θα μπορούσε να αλλάξει όλη η φιλοσοφία στο βήμα

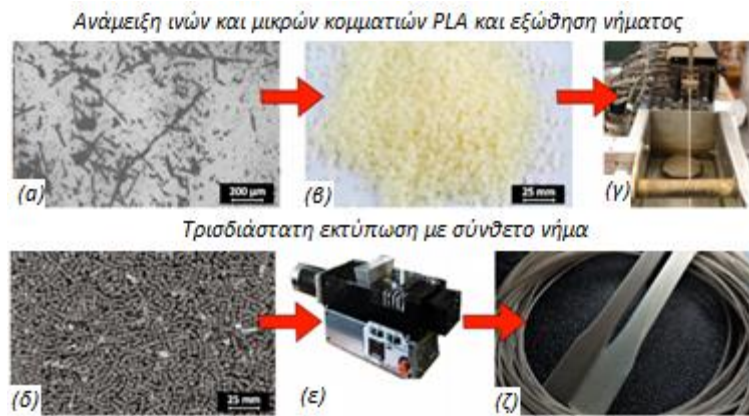
του σχεδιασμού, ούτως ώστε να παράγονται αντικείμενα με συμβατότητα σε διαφορετικές εφαρμογές στην αρχιτεκτονική, φυσικά μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αν και ομολογουμένως, αυτός ο πειραματισμός προϋποθέτει καλή ανάλυση της οικονομικής σκοπιμότητας, και πάντα με το προαναφερθέν μέτρο, δηλαδή την εγκατάσταση των μονάδων ανακύκλωσης κοντά στα σημεία ενδιαφέροντος (Baiani & Altamura, 2018).

Μία εντελώς διαφορετική προσέγγιση για την αξιοποίηση του γυαλιού, δίνεται στην συνέχεια. Οι Rahimizadeh et al. (2019) στην μελέτη τους αποσκοπούν στην αξιοποίηση των ινών γυαλιού από απόβλητα πτερύγια στροβίλων, ως ενισχυτικό πρόσθετο σε θερμοπλαστικό νήμα για τρισδιάστατη εκτύπωση (βλ. Σχήμα 5-2-25). Έτσι αντιμετωπίζεται το πρόβλημα των αυξανόμενων αποβλήτων



Σχήμα 5-2- 105: Προτεινόμενη μεθοδολογία για την ανακύκλωση πτερυγίων από στροβίλους, κατά τους Rahimizadeh et al. (2019)

από τους στροβίλους, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού τροφοδοσίας άρα και του παραγόμενου αντικειμένου στην τρισδιάστατη εκτύπωση χωρίς να προστεθούν υψηλού κόστους καθαρές ίνες. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την αξιοποίηση των πτερυγίων, είναι (βλ. Σχήμα 5-2-26): (1) Μηχανική ανακύκλωση για την ανάκτηση των ινών γυαλιού από τα απορριπτώμενα πτερύγια, με μια διαδικασία συνδυασμού τεμάχησης και διπλού κόσκινου (2) Ανάμειξη των ινών που ανακτήθηκαν με υλικό PLA και τοποθέτηση τους σε μηχανή αφυδάτωσης, για να ξηρανθούν, έτσι μειώνεται η υγρασία που εμπεριέχει το PLA και περιορίζεται η ασυνέχεια του υλικού κατά την εξώθηση (3) Τοποθέτηση του υλικού σε έναν εξωθητή για την αρχική σφαιροποίηση του, και έπειτα από αυτό επανατοποθετείται σε δεύτερο εξωθητή, για την δημιουργία του νήματος, διαμέτρου 1.75 χιλιοστά. (4) Τέλος, έλεγχος των ιδιοτήτων του παραγόμενου νήματος, σε σύγκριση με νήμα από καθαρό PLA, και αντίστοιχα μηχανικές δοκιμές σε δοκίμια που παράχθηκαν από το ενισχυμένο υλικό συγκριτικά με αυτά από απλό PLA.

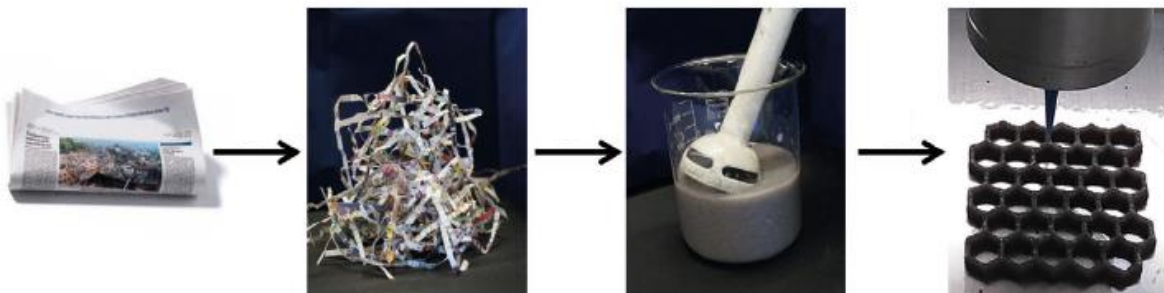


Σχήμα 5-2-26: Η διαδικασία διπλής εξώθησης για την κατασκευή νήματος για ΠΚ, από τους Rahimizadeh et al. (2019) (α) Το ανακυκλώσιμο υλικό (β) Νιφάδες PLA (γ) Τεμαχισμός (δ) Οπτικές ίνες σε μορφή κομματιών (ε) Εξωθητής νήματος (ζ) Το τελικό νήμα από ανακυκλωμένες ίνες γυαλιού και τα δοκίμια για τους ελέγχους κόπωσης

5.2.3.4. Χαρτί

Η ανακύκλωση απορριμμάτων χαρτιού είναι καλά εδραιωμένη στην βιομηχανία χαρτιού, και έχει υψηλή απαίτηση σε χημικά για την από-μελάνωση του, όπως επιφανειοδραστικά, υποχλωριώδες, όζον, οξυγόνο ή διάφορα υπεροξειδία. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για να απομακρυνθούν τα περιττά στοιχεία του χαρτιού, όπως το μελάνι, οι επιστρώσεις και λοιπά. Ωστόσο, είναι προφανές πως αυτή η προεργασία για την ανακύκλωση έρχεται σε αντίθεση με την φιλοσοφία της βιωσιμότητας και οικολογίας που διέπει την χρήση του χαρτιού ως πρώτη ύλη, συν του κοστοβόρου της διαδικασίας (Stolz & Mühlaupt, 2020).

Η έρευνα των Stolz & Mühlaupt (2020) εμπεριέχει μια πρακτική εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης κυψελικών δομών με πρώτη ύλη εκτύπωσης ανακυκλωμένο χαρτί (βλ. Σχήμα 5-2-27).



Σχήμα 5-2-27: Η διαδικασία ανακύκλωσης χαρτιού για την αξιοποίηση τους ως υλικό στην ΠΚ, από τους Stolz & Mühlaupt (2020)

5.2.3.5. Ελαστικά

Σχετικά με τα μη χρήσιμα πλέον λάστιχα, οριακά το 10% αξιοποιείται για την δημιουργία νέων προϊόντων. Αυτός ο χαμηλός βαθμός οφείλεται κυρίως στο ότι δεν υπάρχουν κατάλληλοι τρόποι ανακύκλωσής τους, και σε γενικές γραμμές η ικανότητα για κατασκευή νέων αντικειμένων από

απορριπτόμενα υλικά, είναι περιορισμένη. Η πούδρα καουτσούκ είναι πλήρως οικολογική, καθώς μπορεί να δημιουργηθεί μηχανικά χωρίς να απελευθερώνονται επιβλαβείς ουσίες στην ατμόσφαιρα. Παρά του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για αυτό το υλικό, πολλοί τομείς της βιομηχανίας δεν έχουν ακόμα εκμεταλλευτεί την κατάσταση χρησιμοποιώντας το υλικό σε άλλες εφαρμογές και σε πολύ μικρό βαθμό (Quetzeri-Santiago et al., 2019).

Η έρευνα των Quetzeri-Santiago et al. (2019), επικεντρώθηκε στην χρήση της ελαστομερούς πούδρας από ανακυκλωμένα λάστιχα για χρήση της στην ΠΚ σαν καουτσούκ, επειδή παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον λόγω της προοπτικής της στον τομέα της ανακύκλωσης. Η εκτύπωση επίπεδο ανά επίπεδο με υλικό το λάτεξ όπως έδειξαν τα αποτελέσματα, δεν επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, ωστόσο σίγουρα έχει σημασία το πάχος του δείγματος σχετικά με την τάση εφελκυσμού. Αποδεικνύεται λοιπόν πως μελλοντικά, θα είναι δυνατό να εκτυπώνονται τρισδιάστατα αντικείμενα με απορριπτόμενο ελαστικό παλιών λάστιχων, διευρύνοντας τους ορίζοντες της ανακύκλωσης και των περιορισμένων μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων.

Στο ίδιο πλαίσιο κινήθηκε και η έρευνα των Domingues et al. (2017). Μέσω της πρακτικής εφαρμογής λοιπόν, οι Domingues et al. (2017), απέδειξαν πως είναι δυνατή η τρισδιάστατη εκτύπωση μεγάλων αντικειμένων (παραδείγματος χάρη επίπλων) φιλικών προς το περιβάλλον, με υλικό μία σύνθεση παλιών λάστιχων με πλαστικά απόβλητα. Συγκεκριμένα το υλικό ήταν ένα σύνθετο μείγμα ουσιαστικά αποτελούμενο από 60% απόβλητα λάστιχων σε μορφή κόκκων, και 40% ανακυκλωμένο πολυπροπυλένιο. Η χρήση ΠΚ για την διαδικασία αυτή έδωσε ιδιαίτερα προστιθέμενη αξία στο τελικό προϊόν, καθώς πρόκειται για αντικείμενα μεγάλων διαστάσεων με πλήρη ελευθερία σχετικά με τα σχήματα και τα μεγέθη.

Επίσης μια λύση προς την ανακύκλωση των πεταμένων λάστιχων, είναι η παραγωγή ground tire rubber (GTR) για την τρισδιάστατη εκτύπωση, συνδεδεμένη με τόσο οικολογικά όσο και οικονομικά πλεονεκτήματα. Η διαδικασία παραγωγής του είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς δεν προκαλεί μόλυνση, ενώ επίσης είναι πλήρως ανακυκλώσιμο υλικό και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Από οικονομικής άποψης, η χρήση του ως πληρωτικό σε άλλες πρώτες ύλες, μπορεί να μειώσει το κόστος των κατασκευασμένων αντικειμένων. (Alkadi et al., 2019)

Συμπερασματικά λοιπόν, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, ένας πολύ ευφυής τρόπος ανακύκλωσης και έχει μεγάλες προοπτικές και ευκαιρίες. Για παράδειγμα, η χρήση έστω και λίγου ποσοστού πούδρας ελαστικού για την κατασκευή προϊόντων όπως οι θήκες τηλεφώνων, που κατακλύζουν την αγορά, δίνουν μεγάλο περιθώριο για αύξηση στη ζήτηση αυτής της ανακυκλωμένης πούδρας. Το ίδιο και με τα θερμομονωτικά για ηλεκτρικά κυκλώματα ή προστατευτικά επιχρίσματα σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Όλα αυτά τα παραδείγματα αποδεικνύουν ότι υπάρχει χώρος για αύξηση στην ανακύκλωση των χρησιμοποιημένων ελαστικών (Quetzeri-Santiago et al., 2019).

5.3. Επαναχρησιμοποίηση

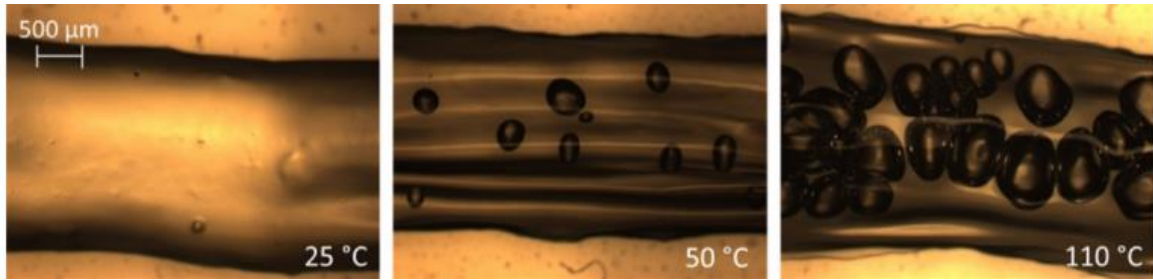
Η παρούσα ενότητα, δομείται ως εξής: στο κεφάλαιο 5.3.1 αναλύεται η προοπτική ανάκτησης χρησιμοποιημένης πούδρας για την προσθετική κατασκευή και την επαναχρησιμοποίηση της, και στο κεφάλαιο 5.3.2 εξετάζεται η απευθείας επαναχρησιμοποίηση προϊόντων χωρίς το ενδιάμεσο στάδιο της ανάκτησης / ανακύκλωσης.

5.3.1. Ανάκτηση χρησιμοποιημένης πρώτης ύλης μέσω ανακύκλωσης

Η ΠΚ μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή μεγάλων όγκων παραγγελιών προϊόντων. Βέβαια εξακολουθεί να μην είναι απολύτως σαφές το αν αυτό όντως θα αντιμετωπίσει το φαινόμενο παραγωγής περιττών, περισσότερων από το αναγκαίο, προϊόντων (Giurco et al., 2014). Όσο η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής γίνεται πιο γνωστή, τόσο περισσότερη πούδρα θα χρειάζεται ως πρώτη ύλη άρα αναδύεται η ανάγκη για την ανακύκλωση της (Melugiri-Shankaramurthy et al., 2019). Ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό των προϊόντων, είναι η χρήση του υλικού και η μετέπειτα διάθεση του, στο πλαίσιο της φιλοσοφίας ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης του. Με άλλα λόγια, η χρήση του να γίνει με γνώμονα τη προστιθέμενη αξία του ως απόβλητο για την μετέπειτα αξιοποίηση του ως τροφοδοτικό για την κατασκευή νέων προϊόντων. (Giurco et al., 2014)

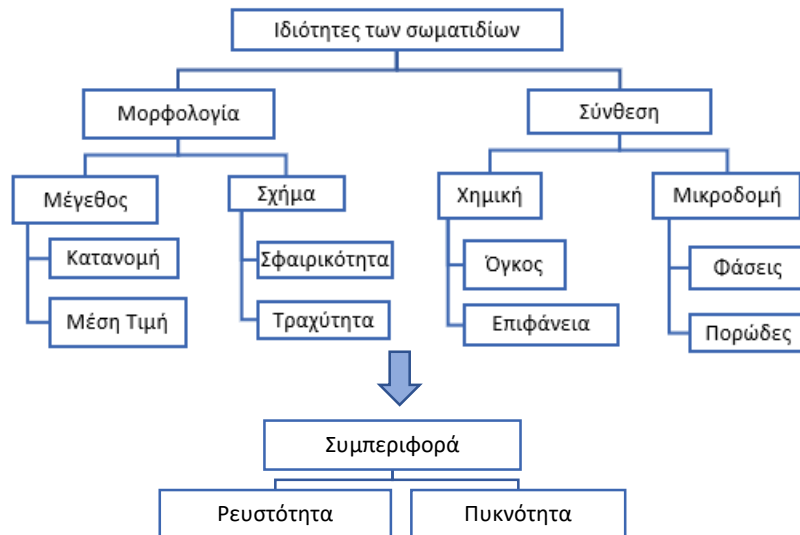
Η παραγωγή τεμαχίων από ανακυκλωμένη πούδρα μετάλλου με χρήση προσθετικών μεθόδων κατασκευής, αποτελεί ένα αναδυόμενο μοντέλο που ελκύει το ενδιαφέρον για έρευνα και ανάπτυξη (Gorji et al., 2020). Τα υπολείμματα υλικών είναι βιώσιμοι πόροι με προστιθέμενη αξία για την τρισδιάστατη εκτύπωση (Idrees et al., 2018 ; Turner et al., 2019). Στις τεχνικές προσθετικής κατασκευής με υλικό τροφοδοσίας την πούδρα, το υπόλειμμα αχρησιμοποίητης πούδρας μετά το πέρας της διαδικασίας μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στην επόμενη κατασκευή, το οποίο έχει τεράστιες προοπτικές για την αποδοτικότητα των πόρων και την βιωσιμότητα (Lutter-Günther et al., 2018 ; Gorji et al., 2019;2020 ; Turner et al., 2019 ; Sutton et al., 2020). Για παράδειγμα, το υπόλειμμα πούδρας είναι αρκετά συχνό φαινόμενο σε τεχνικές powder bed όπως η SLM, όπου μια σημαντική ποσότητα πούδρας στην πλατφόρμα εργασίας δεν τήκεται και μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί (Zarico et al., 2019 ; Gorji et al., 2019). Προσεγγιστικά, το 80 – 90% κατά τους Wang et al. (2018), ή ακόμα και έως το 95 – 97% κατά τους Lutter-Günther et al. (2018) της χρησιμοποιημένης πούδρας δεν τήκεται κατά τη διαδικασία όποτε μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Επομένως, αν και η ανακύκλωση της χρησιμοποιούμενης μεταλλικής πούδρας στις διαδικασίες ΠΚ είναι απαραίτητη για την μείωση του κόστους, του χρόνου κατεργασίας, της κατανάλωσης ενέργειας, και της σπατάλης μετάλλου (Gorji et al., 2020), το κύριο ερώτημα επομένως είναι πως η ανακύκλωση της πούδρας επηρεάζει την ποιότητα της, και κατά συνέπεια τις μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων αντικειμένων (Poron et al., 2018). Ιδανικά, η αχρησιμοποίητη πούδρα θα μπορούσε να ανακυκλώνεται και να επαναχρησιμοποιείται άπειρες φορές (Peeters et al., 2019). Ωστόσο η μορφολογία και η σύσταση της αλλάζει με κάθε κύκλο ανακύκλωσης, και η ποιότητα του υλικού μειώνεται, για παράδειγμα εμφανίζονται μικρορωγμές ή πορώδες (βλ. Σχήμα 5-3-1)



Σχήμα 5-3-1: Σχηματισμός φουσκαλών στο υλικό εκτύπωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες, υιοθετημένο από τους Fateri et al. (2018)

(Antonov et al., 2019 ; Gorji et al., 2020), και τραχιά υφή επιφανείας (Wang et al., 2018). Αυτό συμβαίνει διότι το μοριακό βάρος του υπολείμματος αυξάνεται μετά την διεργασία, οδηγώντας σε αρνητική επίπτωση στις μορφολογικές της ιδιότητες (Wang et al., 2018). Οι μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων τεμαχίων εξίσου ελαττώνονται, όπως η αντοχή (Peeters et al., 2019), και η σκληρότητα (Antonov et al., 2019). Αυτό διότι η επαναλαμβανόμενη οξείδωση της ανακυκλωμένης

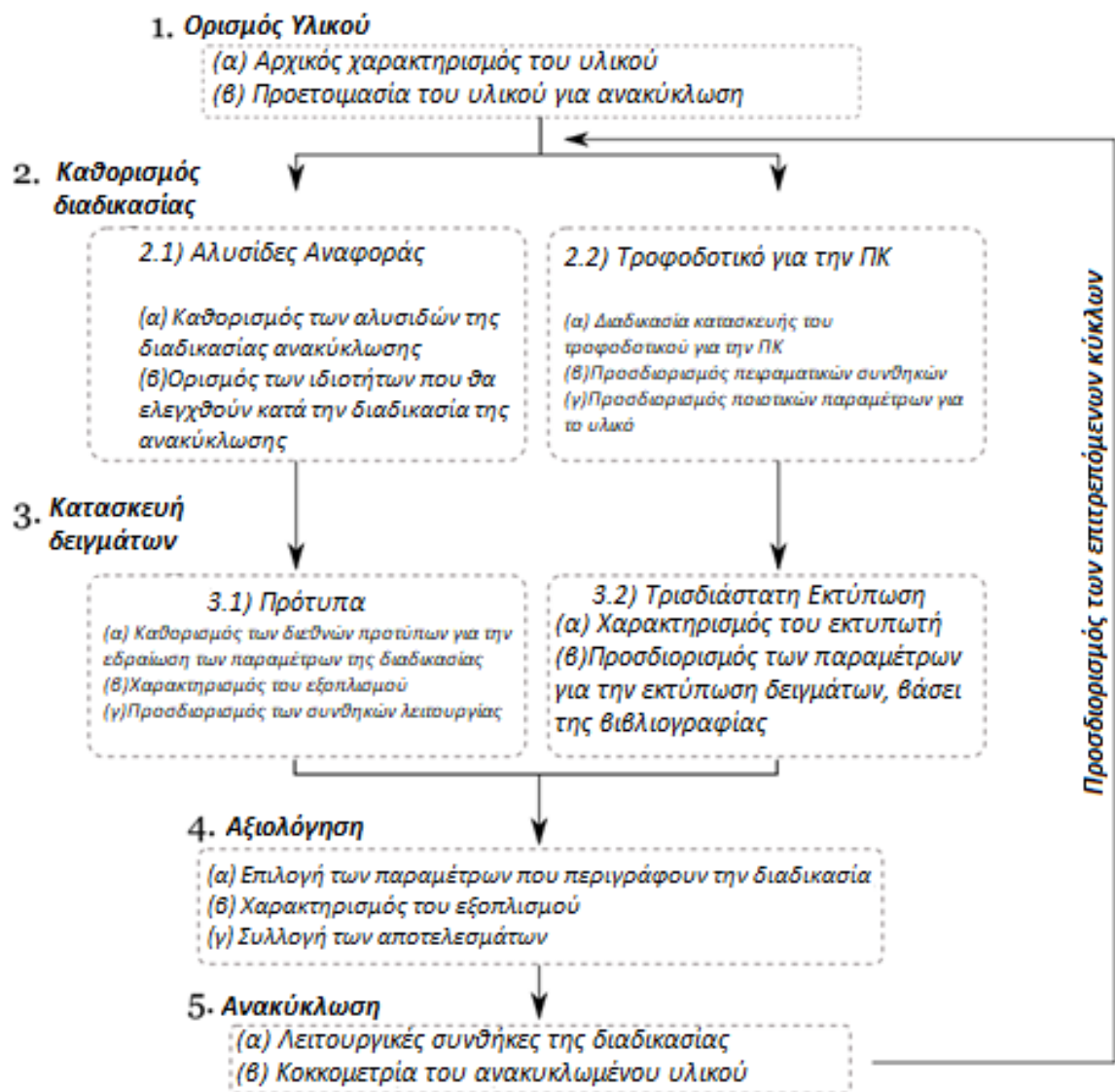


Σχήμα 5-3-2: Προτεινόμενη μεθοδολογία χαρακτηρισμού της πούδρας για την ΠΚ, υιοθετημένο από τους Cordova et al. (2019)

πούδρας, αλλάζει την κατανομή μεγέθους σωματιδίων, και η πούδρα γίνεται πιο αραιή, επομένως ο ενδεικνυόμενος αριθμός ανακυκλώσεων είναι περιορισμένος (Gorji et al., 2020), . Αυτός ο περιορισμός είναι ακριβώς για να μην ρισκάρεται η ποιότητα του τελικού αντικειμένου άρα και η αξιοπιστία της ΠΚ (βλ. Σχήμα 5-3-3) (Melugiri-Shankaramurthy et al., 2019). Στην βιβλιογραφία υπάρχουν έρευνες με πληθώρα στρατηγικών ανακύκλωσης, όπου η ίδια πούδρα χρησιμοποιείται επανειλημμένα από πέντε έως πάνω από τριάντα φορές. (Gorji et al., 2020).

Μια υποβιβασμένης ποιότητας πούδρα τροφοδοσίας, φυσικά θα οδηγήσει σε κατασκευή τεμαχίου με μειωμένες μηχανικές ιδιότητες, γι' αυτό απαιτείται μία τεχνική για την διατήρηση της ποιότητας της πούδρας σε όλη την διάρκεια ζωής της (Peeters et al., 2019 ; Gorji et al., 2020). Υπάρχουν τρόποι για την ανακύκλωση της, πράγμα που αποφέρει και οικονομικό όφελος καθώς είναι λιγότερο κοστοβόρα διαδικασία από την προμήθεια καθαρής πρώτης ύλης (Melugiri-Shankaramurthy et al., 2019). Το υλικό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί αφού αναμειχθεί με

ποσότητες καθαρής, αχρησιμοποίητης πούδρας (Sillani et al., 2019), τουλάχιστον κατά 30% - 50% (Kumar & Czekanski, 2017; Peeters et al., 2019 ; Kozlovsky et al., 2018 ; Wang et al., 2018), για την



Σχήμα 5-3-3: Προτεινόμενη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της διαδικασίας ανακύκλωσης στην ΠΚ, από τους Cruz Sanchez et al. (2017)

κατασκευή υψηλής ποιότητας τελικών προϊόντων (Peeters et al., 2019), και έτσι αξιοποιείται για ακόμα μερικές φορές πριν γίνει πλήρες απόβλητο χωρίς περαιτέρω τρόπο αξιοποίησης (Kumar & Czekanski, 2017). Στην βιβλιογραφία έχει μελετηθεί διεξοδικά η αυτή η διαδικασία ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των υπολειμμάτων πούδρας από διαδικασίες προσθετικής παραγωγής σε επόμενες, αποσκοπώντας στην μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος, το οικονομικό όφελος, και φυσικά την προσέγγιση ενός κυκλικού μοντέλου οικονομίας που τα απόβλητα δεν απορρίπτονται αλλά γίνονται η είσοδος σε μια νέα παραγωγική διαδικασία (Melugiri-Shankaramurthy et al., 2019).

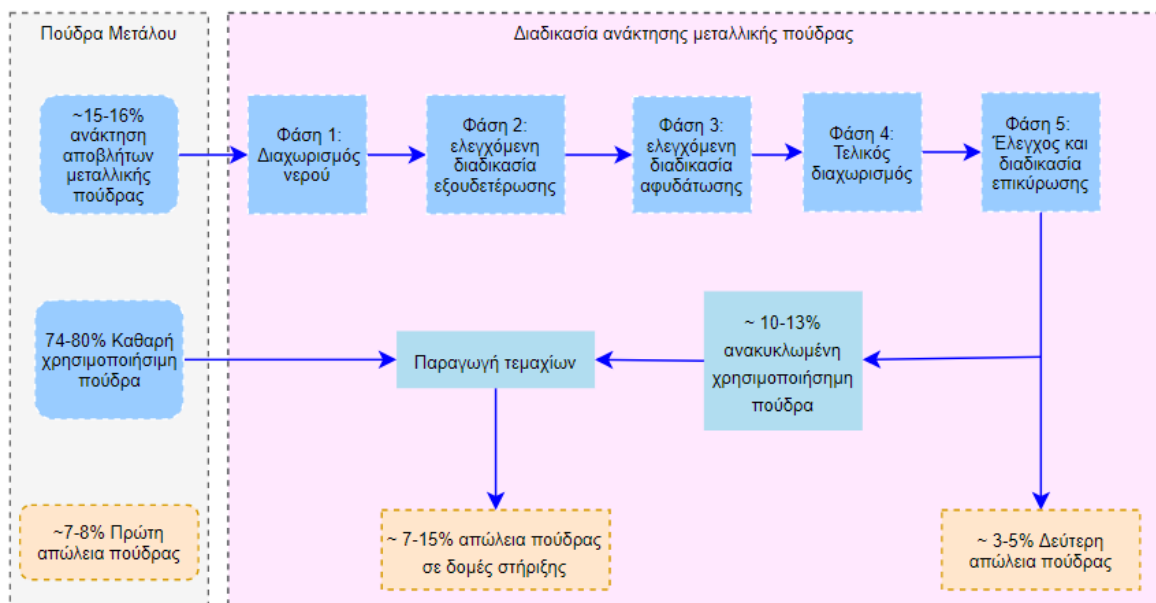
Στην μελέτη των Daraban et al. (2019) προσεγγίσθηκε η μέθοδος που ακολουθείται για την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση της μεταλλικής πούδρας (βλ. Σχήμα 5-3-4). Σε πρώτη φάση, η πούδρα διαχωρίζεται από το νερό μέσω ενός συστήματος φυγόκεντρων δυνάμεων σε πολύ καλά ελεγχόμενο περιβάλλον. Στην δεύτερη φάση εφαρμόζονται διαδικασίες εξουδετέρωσης

διάφορων συσσωματώσεων, όπως για παράδειγμα η οξείδωση, ή γενικά οποιουδήποτε είδους ακαθαρσίες. Η τρίτη και η τέταρτη φάση είναι μια διαδικασία αφυδάτωσης σε ένα ελεγχόμενο κλιματολογικό περιβάλλον, ακολουθούμενη από μια θεραπεία κατά της απόφραξης και τον τελικό



Σχήμα 5-3-4: Η διαδικασία ανάκτησης πούδρας, φάση 1^η, 2^η, και 3^η αντίστοιχα, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019)

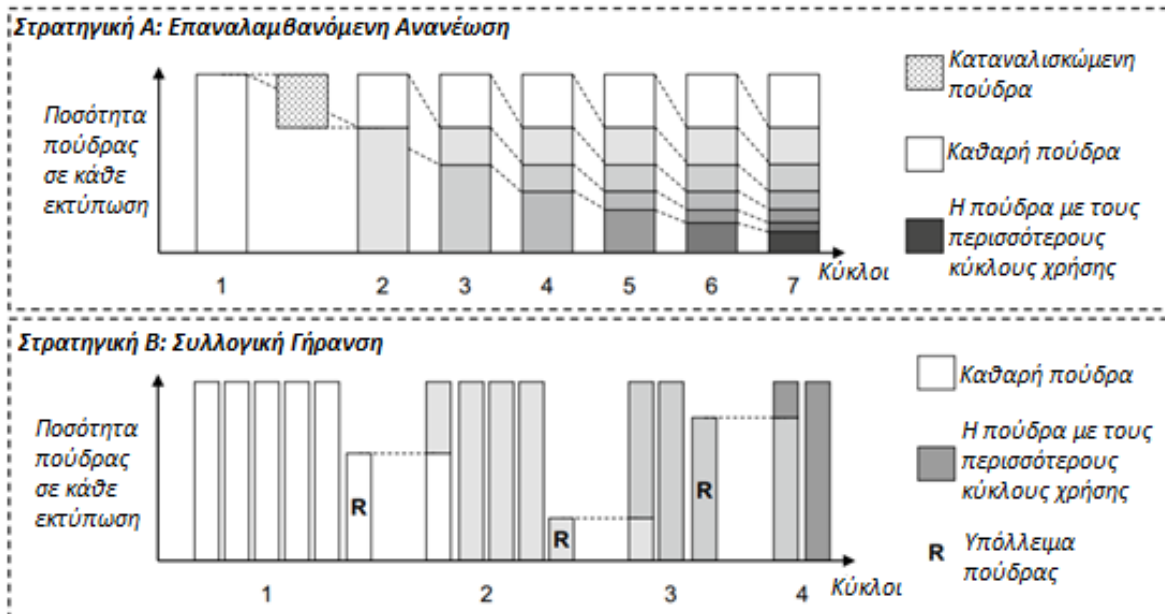
διαχωρισμό, χρησιμοποιώντας βαθμονομημένες μηχανικές συσκευές κοσκινίσματος. Στην συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία τα αποτελέσματα έδειξαν ότι από το 10-13% της πούδρας που ήταν υπόλειμμα στο τέλος μιας προηγούμενης εκτύπωσης, το 87 – 90% αυτής (συγκεκριμένα υλικού CoCr) μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε νέα κατασκευή ή σε κάποια επιδιορθωτική διαδικασία, που αποδεικνύει ότι είναι μία μέθοδος που βελτιστοποιεί εξαιρετικά την διαδικασία ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης υλικού (βλ. Σχήμα 5-3-5).



Σχήμα 5-3-5: Οι φάσεις και τα αποτελέσματα της ανάκτησης πούδρας μετάλλου από κράμα CoCr, υιοθετημένο από Daraban et al. (2019)

Οι Lutter-Günther et al. (2018), πρότειναν δύο πιθανές στρατηγικές για την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση της πούδρας. Στην πρώτη στρατηγική, η χρησιμοποιημένη πούδρα μπορεί να ανανεώνεται συνεχώς όταν προστίθεται φρέσκια πούδρα έπειτα από κάθε κύκλο κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται ο ρυθμός με τον οποίο υποβιβάζεται η ποιότητα της πούδρας. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος οδηγεί σε ένα συνολικό ποσό πούδρας σε διαφορετικές καταστάσεις με διαφορετικές ιδιότητες, δηλαδή «απειλείται» η ποιότητα του τελικού εξαρτήματος. Επίσης, η ανάμειξη πολλών διαφορετικών παρτίδων υπολειμματικής πούδρας, δυσχεραίνει την διαδικασία

ελέγχου ποιότητας διότι είναι δύσκολο να ιχνηλατηθεί η παρτίδα από την οποία προήλθε η ελαττωματική πούδρα. Η δεύτερη στρατηγική, επιδιώκει την ανάμειξη πούδρων μόνο ίδιας ποιότητας, που δηλαδή βρίσκονται στην ίδια κατάσταση όσον αφορά στον αριθμό των κύκλων επαναχρησιμοποίησης τους. Για κάθε κύκλο, η παρτίδα πούδρας κατανέμεται σε όσο το δυνατόν περισσότερες εργασίες κατασκευής, αφήνοντας ένα υπόλειμμα (R), το οποίο διατηρείται για τον επόμενο κύκλο (βλ. Σχήμα 5-3-6). Αυτή η στρατηγική οδηγεί σε συλλογική αποικοδόμηση της πούδρας και σχετικά λίγες παραλλαγές υλικού σε μία παρτίδα. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο, εάν δημιουργούνται υψηλές απαιτήσεις σχετικά με την ιχνηλασιμότητα και την πιστοποίηση της ποιότητας.



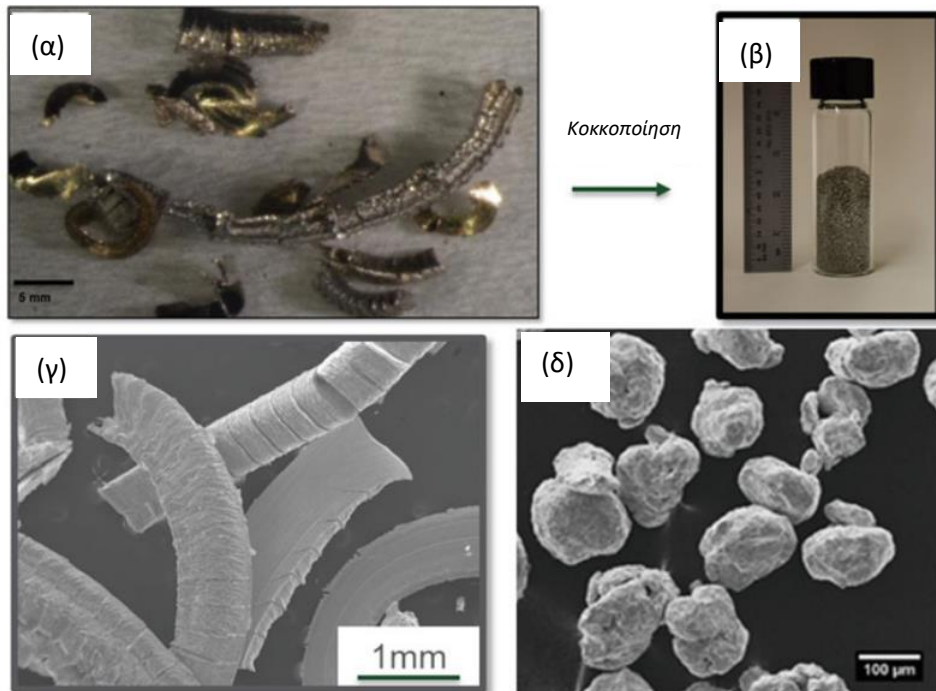
Σχήμα 5-3- 6 : Οι δύο στρατηγικές επαναχρησιμοποίησης πούδρας, σύμφωνα με τους Lutter-Günther et al. (2018)

5.3.1.1 Μέταλλο

Στην έρευνα των Quintana et al. (2018), ερευνήθηκαν (1) η επίδραση των κύκλων επαναχρησιμοποίησης στα χαρακτηριστικά της πούδρας από το υλικό Ti-6Al-4V ELI πριν και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης, και (2) το αντίκτυπο των κύκλων επαναχρησιμοποίησης στις ιδιότητες και την αντοχή υλικού για την SLM. Η ρευστότητα του υλικού βελτιώθηκε όσο αυξάνονταν οι φορές επανάχρησιμοποίησης, ενώ έπειτα από 31 διαδικασίες άρα και χρήσεις της ίδιας πούδρας επανηλειμένα, αυξήθηκε και η αντοχή σε εφελκυσμό. Με την μέθοδο SLM ασχολήθηκαν και οι Sillani et al. (2019), συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά της καθαρής και της ανακυκλωμένης πούδρας καθώς και τα αντίστοιχα παραγόμενα αντικείμενα σε βιομηχανικά συστήματα. Με το ίδιο υλικό (Ti-6Al-4V) ενασχολήθηκαν οι Sibisi et al. (2020), εξετάζοντας την πιθανότητα επαναχρησιμοποίησης της πούδρας για την αξιοποίηση της σε εφαρμογές όπως η αεροδιαστημική.

Στην μελέτη των Ahmed et al. (2020), πραγματοποιήθηκαν δέκα επιτυχημένες επαναχρησιμοποιήσεις τις ίδιας πούδρας, και σημειώθηκαν πολύ μικρές διαφοροποιήσεις στην χημική σύσταση και στις κρυσταλλογραφικές φάσεις μεταξύ της ανακυκλωμένης και της καθαρής πούδρας μετάλλου, άρα και του παραγόμενου αντικειμένου. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να

γενικευτούν για όλες τις ΠΚ μεθόδους με βάση το μέταλλο. Φυσικά οι συγγραφείς τονίζουν πως σε περισσότερους κύκλους ανακύκλωσης θα φέρουν ως αποτέλεσμα περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την εξέλιξη της πούδρας και την ποιότητα του τελικού αντικειμένου.



Σχήμα 5-3-7: (α) Φύρα μετάλλου (β) Μεταλλικοί κόκκοι παραγόμενοι από το απόβλητο (γ) Εικόνα από ηλεκτρικό μικροσκόπιο της μεταλλικής φύρας (δ) Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο των μεταλλικών κόκκων, υιοθετημένο από τους Fullenwider et al. (2019)

Οι Zarico et al. (2019) εξέτασαν πούδρα 17-4PH από διαδικασία SLM σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις: (1) αρχική, καθαρή μορφή (2) μετά από 10 ανακυκλώσεις (3) μετά από 20 ανακυκλώσεις. Η διαδικασία της ανακύκλωσης αφορά στο «κοσκίνισμα» της πούδρας που δεν έχει χρησιμοποιηθεί - λιώσει μετά την δημιουργία του αντικειμένου, και την επανατροφοδοσία της στην κλίνη της κατασκευής. Ο σκοπός της μελέτης ήταν να διαπιστωθούν οι αλλαγές στις ιδιότητες της πούδρας προκειμένου να αποφασισθεί ο μέγιστος αριθμός κύκλων επαναχρησιμοποίησης για την βέλτιστη απόδοση του παραγόμενου αντικειμένου. Συνίσταται επομένως η επαναχρησιμοποίηση να μην γίνεται ατέρμονα αλλά ελεγχόμενα.

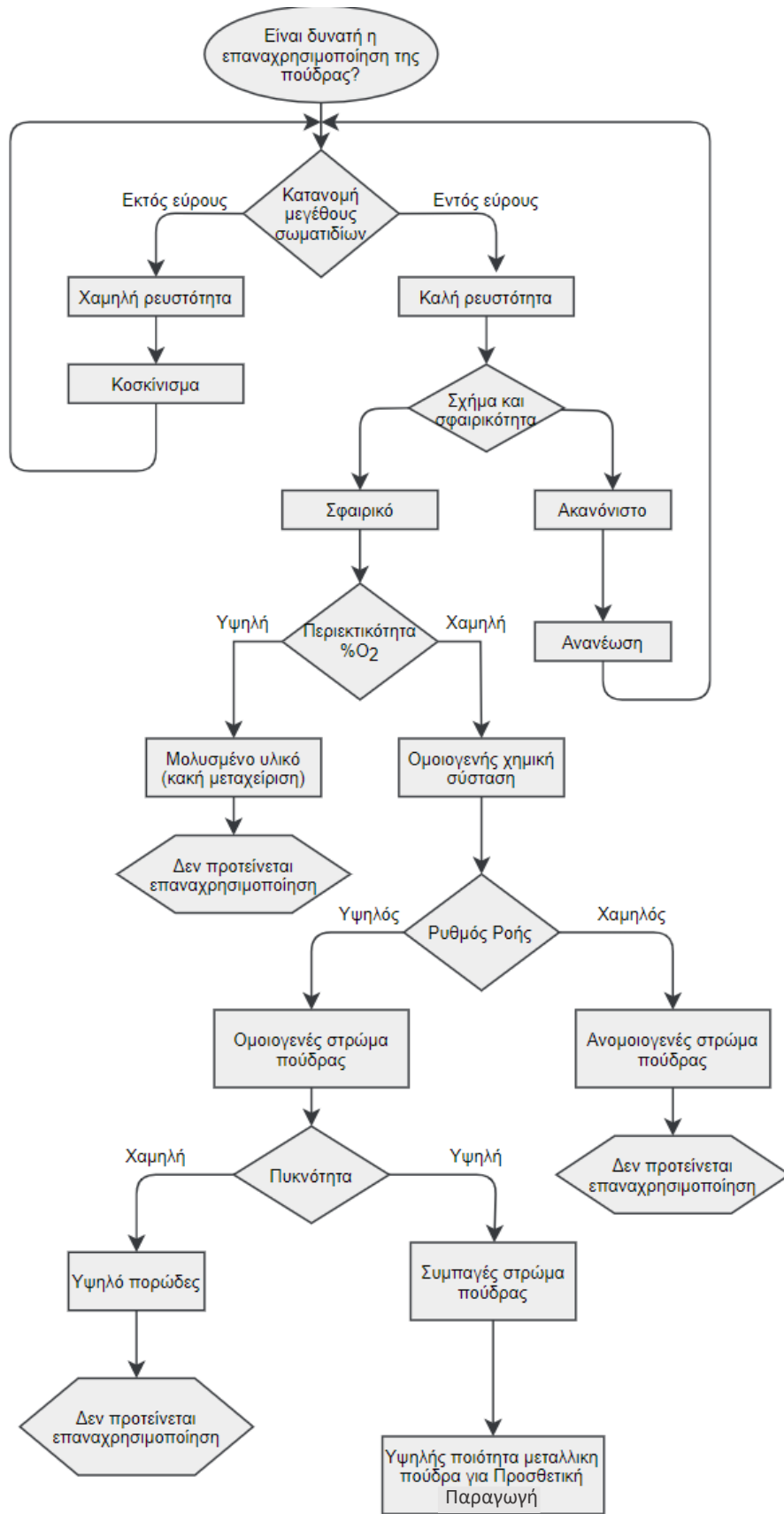
Στην έρευνα των Sutton et al. (2020) μελετήθηκε πούδρα ατσάλιου 304 L που ανακυκλώθηκε και επαναχρησιμοποιήθηκε επτά φορές σε μέθοδο L-PBF, ώστε να ελεγχθεί το αντίκτυπο που έχει σε αυτήν η συνεχής θερμική έκθεση της στο θάλαμο της κατασκευής. Το πείραμα έγινε με σταθερή την αρχική ποσότητα του υλικού δηλαδή χωρίς περεταίρω ανάμειξη καθαρής πούδρας στους επόμενους κύκλους, ώστε να ελεγχθεί το χειρότερο σενάριο, άρα κάθε επόμενο τεμάχιο εκτυπώνονταν με χαμηλότερο ύψος, για να έρχεται σε συμφωνία με την ποσότητα πούδρας που είχε χαθεί και δεν αναπληρώθηκε από την προηγούμενη εκτύπωση. Συνολικά χρησιμοποιήθηκε μία αρχική δόση πούδρας 80 κιλών και πραγματοποιήθηκαν 7 κύκλοι εκτυπώσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η σκόνη 304 L αλλάζει μορφολογικά, χημικά και μικροδομικά με συνεχή επαναχρησιμοποίηση στη διαδικασία L-PBF. Τα πειράματα με το χειρότερο σενάριο επέτρεψαν την κατανόηση των διαφορών μεταξύ σκέτης ανακυκλωμένης πούδρας, με πούδρα που αναμειγνύεται συνεχώς με νέα, καθαρή, πράγμα που δεν είχε γίνει σε προηγούμενες μελέτες. Τα συμπεράσματα της μελέτης είναι εξαιρετικής σημασίας για την κατανόηση της εξέλιξης των

ιδιοτήτων της επαναχρησιμοποιημένης πούδρας, η οποία είναι ζωτικής σημασίας προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της επαναχρησιμοποίησης για εξοικονόμηση του κόστους του υλικού και την προστασία του περιβάλλοντος διατηρώντας ταυτόχρονα την ποιότητα του εξαρτήματος.

οι Heiden et al. (2019) ενασχολήθηκαν με την πούδρα ατσάλιού 316L, συμπεραίνοντας πως μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για πολλαπλούς κατασκευαστικούς κύκλους με ελάχιστες διαφορές στις μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου αντικειμένου. Ομοίως με το ίδιο υλικό, η έρευνα των Gorji et al. (2019) πραγματεύεται τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και την μικροδομή της πούδρας ατσάλιού 316L στην μέθοδο SLM, τόσο σε γνήσια όσο και σε ανακυκλωμένη μορφή. Η σύγκριση της επιφανειακής σύνθεσης και της παραλλαγής της μικροδομής της καθαρής πούδρας κατά τη διάρκεια της παρασκευής προσθέτων δίνει χρήσιμα συμπεράσματα για το εάν η ανακυκλωμένη πούδρα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση των εξαρτημάτων και εάν αυτό θα διασφαλίσει τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες των εκτυπώσεων. Επίσης αποτελεί έναν οδηγό για το εάν πρέπει να προστεθεί καθαρή πούδρα στην ανακυκλωμένη πριν την επαναχρησιμοποιηθεί καθώς έτσι η μηχανική αντοχή του τυπωμένου εξαρτήματος παραμένει σε αποδεκτό επίπεδο.

Σε παρόμοιο πλαίσιο κινήθηκαν οι Cordova et al. (2019), όπου ανέπτυξαν μια απλοποιημένη μέθοδο για την αξιολόγηση των αλλαγών στην μορφοποίηση, την χημική σύσταση και την ρευστότητα της πούδρας που χρησιμοποιείται στην SLM. Το γενικό συμπέρασμα ήταν πως τα ελαφριά κράματα λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας, επηρεάζονται πιο εύκολα από την επαναχρησιμοποίησή τους. Στην συνέχεια μελετήθηκαν και έγιναν συγκρίσεις σε διάφορα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως στην ΠΚ. Από όλα τα πειράματα, το AlSi10Mg αποδείχθηκε το πιο ευαίσθητο στην επαναχρησιμοποίηση, με δεύτερο πιο επηρεασμένο το Inconel 718. Αντίθετα, το Ti6Al4V σημείωσε την μικρότερη επίδραση από την επαναχρησιμοποίηση. Στην συνέχεια στο σχήμα 5-3-8 παρουσιάζεται διαγραμματικά η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για να προσδιορίσει ο χρήστης αν μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει την πούδρα ή όχι.

Οι Poron et al. (2018), εξέτασαν εξίσου το κράμα Ti-6Al-4 V και την ανακύκλωση του για την τεχνική powder-bed fusion, EBM. Αποδείχθηκε ότι η ανακύκλωση της πούδρας είχε αρνητικά αποτελέσματα στην διάρκεια ζωής του παραγόμενου αντικειμένου, δηλαδή χρειάστηκαν αρκετά λιγότεροι κύκλοι θραύσης για την αστοχία του, συγκριτικά με το ίδιο αντικείμενο από καθαρή πούδρα. Πιθανότατα αυτό να οφείλεται στην θερμική καταπόνηση στην οποία υπόκειται το υλικό κατά τη διάρκεια των προηγούμενων χρήσεων του, όπως και η οξειδωση του που συνεπάγεται ανεπιτυχή σύντηξη του στην διαδικασία της εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, επαναχρησιμοποιήθηκε η ίδια πούδρα για εικοσιένα φορές και εκτός των άλλων (αριθμητικά αποτελέσματα που δεν κρίνεται σκόπιμο να ενταχθούν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας) εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα: (1) όσο αυξανόταν ο αριθμός επαναχρησιμοποίησης, αυξανόταν και η περιεκτικότητα σε οξυγόνο (2) Οι κόκκοι της πούδρας έχαναν την σφαιρικότητά τους όσο αυξάνονταν οι κύκλοι επαναχρησιμοποίησης, ενώ κάποια σωματίδια είχαν αξιοσημείωτη τραχύτητα μετά από δεκαέξι κύκλους (3) Η ανακυκλωμένη πούδρα είχε καλύτερη ρευστότητα (4) Η ανακυκλωμένη πούδρα δεν είχε καμία ανεπιθύμητη επίδραση στην διαδικασία ΠΚ και τα παραγόμενα δείγματα τεμαχίων έδειξαν καλές και σταθερές μηχανικές ιδιότητες (βλ. Πίνακας 5-3-1).



Σχήμα 5-3-8: Απλοποιημένη μέθοδος για την αξιολόγηση των αλλαγών στην μορφοποίηση, την χημική σύσταση και την ρευστότητα της πούδρας για την SLM, ώστε να κρίνει ο χρήστης την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της, υιοθετημένο από τους Cordova et al. (2019)

Πίνακας 5-3- 1: Ποσοτική ανάλυση της σύστασης της πούδρας έως και 69 κύκλους επαναχρησιμοποίησης, και σύγκριση της σύστασης αντικειμένων που εκτυπώθηκαν με καθαρή πούδρα και με 69 φορές επαναχρησιμοποιημένη, υιοθετημένο από τους Poron et al. (2018)

%	Καθαρή πούδρα	11 ^{ος} κύκλος χρήσης	26 ^{ος} κύκλος χρήσης	69 ^{ος} κύκλος χρήσης	Δείγμα εκτύπωσης από καθαρή πούδρα	Δείγμα εκτύπωσης από πούδρα 69 ^{ου} κύκλου χρήσης	Απαιτήσεις σύμφωνα με ASTM
Al	6,44	6,47	6,53	6,42	5,86	5,76	5,60-6,75
Fe	0,20	0,21	0,20	0,22	0,20	0,21	0,30 μέγιστο
V	4,01	4,03	4,00	4,10	4,06	4,17	3,50-4,50
Y	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005 μέγιστο
C	0,015	0,015	0,015	0,022	0,016	0,024	0,08 μέγιστο
H	0,0012	0,0018	0,0012	0,0013	0,0018	0,0021	0,015 μέγιστο
O	0,124	0,132	0,167	0,324	0,116	0,336	0,20 μέγιστο
N	0,015	0,016	0,018	0,017	0,021	0,022	0,05 μέγιστο

Στο πλαίσιο της μελέτης των Gong et al. (2018) μελετήθηκαν δύο μεταλλικές πούδρες, η ανακυκλωμένη FS 316L και η γνήσια, αχρησιμοποίητη MetcoAddTM 316L-A, και διαπιστώθηκε ότι η ανάμειξη τους οδήγησε σε μία συμβατή και εξαιρετικής ποιότητας πρώτη ύλη για επαναχρησιμοποίηση. Οι Gruber et al. (2019) επίσης εξέτασαν την καθαρή και την ανακυκλωμένη πρώτη ύλη, για το κράμα Alloy 718 και τις επιδράσεις που έχει κατά την χρήση του στη μέθοδο EBM.

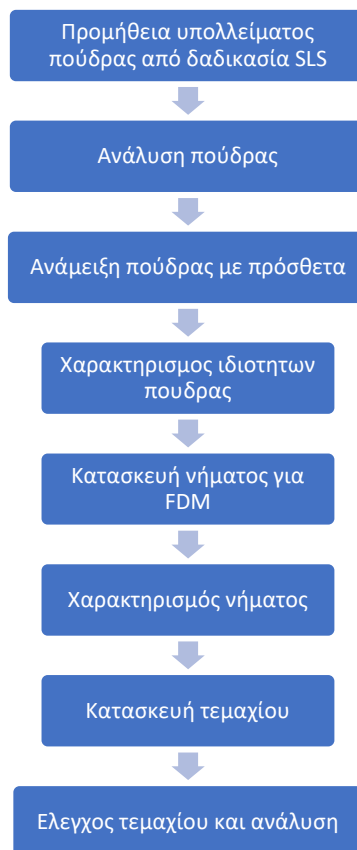
Οι Xu et al. (2018) αναπτύξαν ένα φιλικό προς το περιβάλλον και επαναχρησιμοποιήσιμο μεταλλικό μελάνι για τρισδιάστατη εκτύπωση πολύ πυκνών μεταλλικών κατασκευών. Το μεταλλικό μελάνι περιέχει χάλυβα, ένα βιοαποικοδομήσιμο πολυμερές που ονομάζεται χιτοζάνη, οξικό οξύ και απιονισμένο νερό. Μπορεί να εφαρμοστεί με μια χαμηλού κόστους μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή μεταλλικών κατασκευών. Το μελάνι έπειτα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, πράγμα που βελτιστοποιεί την αξιοποίηση των μεταλλικών υλικών.

5.3.1.2. Ελαστικό

Οι Feng et al. (2019) και οι Kumar & Czekanski (2018) επικεντρώθηκαν στην ανακύκλωση της πούδρας μετά από τη διαδικασία SLS, σε τροφοδοτικό νήμα για την FDM, με τους πρώτους να πραγματεύονται κυρίως το υλικό PA12. Οι ιδιότητες και η απόδοση της ανακυκλωμένης πούδρας PA12 είναι παρόμοιες με αυτές της καθαρής, φρέσκιας πούδρας, έτσι μπορεί με επιτυχία να χρησιμοποιηθεί στην μέθοδο FDM. Έτσι με αυτό τον τρόπο λύνονται επιτυχώς δύο ζητήματα, αρχικά μειώνεται το κόστος για την προμήθεια ανόθευτης πρώτης ύλης, και αξιοποιείται η φύρα

που απομένει μετά από μια κατασκευή μέσω SLS, επωφελώντας την βιομηχανία της προσθετικής παραγωγής στο σύνολο (Feng et al., 2019).

Ωστόσο, οι Kumar & Czekanski (2018) πρότειναν ένα πιο γενικευμένο μοντέλο μεθοδολογίας για αυτή τη διαδικασία (βλ. Σχήμα 5-3-9). Αρχικά, λόγω της θερμικής και μηχανικής καταπόνησης που έχει υποστεί η πούδρα, πρέπει να αναλυθεί για την εύρεση του σημείου τήξης και των κρυσταλλικών της φάσεων. Για την βελτίωση των μηχανικών της ιδιοτήτων, της θερμικής και ηλεκτρικής της αγωγιμότητας, προτείνεται η ανάμιξη της με πρόσθετα από κεραμικό ή μέταλλο, και για την ενίσχυση της πλαστικότητας της, είναι επιθυμητή η προσθήκη πλαστικοποιητών ή άλλων ειδικών πρόσθετων. Αυτή η μίξη των υλικών έπειτα πρέπει να εξετασθεί για να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορούν να δημιουργήσουν νήμα για την συμβατότητα με εκτυπωτές FDM. Αυτό συμβαίνει συνήθως με τη σύγκριση των ανακυκλωμένων νημάτων με τα γνήσια, καθαρά νήματα, και αν υπάρχουν αποκλίσεις στις ιδιότητες, το ανακυκλωμένο νήμα πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα με διάφορες πρόσθετα ώστε να είναι εφικτή η χρήση του. Από οικονομικής απόψεως, η χρήση ανακυκλωμένης πούδρας είναι πλήρως πιο συμφέρουσα.



Σχήμα 5-3-9: Μεθοδολογία για την επαναχρησιμοποίηση υπολείματος πούδρας από την διαδικασία SLS, υιοθετημένη από την έρευνα των Kumar & Czekanski (2018)

Στην έρευνα των Gu et al. (2019) αξιολογήθηκε η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης πούδρας PET αφότου έχει εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Φάνηκε ότι η έκθεση της σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εκτύπωσης σε κλίνη μέχρι και εκατό ώρες, δεν αποτελεί πρόβλημα, και η πούδρα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί χωρίς ανανέωση της με καθαρή πρώτη ύλη. Αντίθετα, πούδρα από PA12 ακόμα και με έκθεση μόλις μίας ώρας, παρουσίασε ταχεία αύξηση του μοριακού της

βάρους, προκαλώντας σημαντικό μειονέκτημα στην ρεολογία και την ρευστότητα της. Επομένως, χρειάζεται ανάμειξη με καθαρή πούδρα με ποσοστό 30 – 70%. Το ίδιο διαπιστώθηκε και στην έρευνα των Zander et al. (2018), όπου φάνηκε η ανακυκλωμένη πούδρα από PET να είναι πλήρως συμβατή κυρίως με τη μέθοδο FDM, αφότου βέβαια το υλικό καθαριστεί διεξοδικά και αφυδατωθεί, χωρίς να αλλοιώνεται η μηχανική αντοχή του τελικού προϊόντος.



(α)



(β)

Σχήμα 5-3-10: (α) Δείγμα εκτυπωμένο από καθαρή πολυμερές PA12 (β) Δείγμα εκτυπωμένο από ανακυκλωμένο πολυμερές PA12, υιοθετημένο από τους Feng et al. (2019)

Οι Kozlovsky et al. (2018) στην έρευνα τους εξετάζουν το ηγίση, και μετά από ελέγχους στα κατασκευαζόμενα δείγματα, φαίνεται ότι μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί με επιτυχία χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα του τελικού προϊόντος.

5.3.1.3 Άμμος και σκυρόδεμα

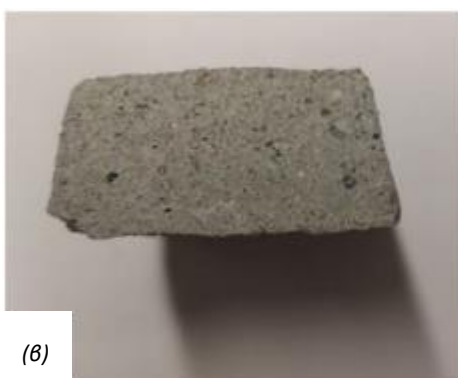
Οι Baiani & Altamura (2018), αναφέρθηκαν σε απόβλητα που μπορούν να αξιοποιηθούν αποδοτικά για χρήση στην αρχιτεκτονική και στον κατασκευαστικό τομέα (υποπροϊόντα, ελαττωματικά προϊόντα, νεκρά αποθέματα, υπολείμματα, απόβλητα επεξεργασίας, απόβλητα C&D και λοιπά). Προτείνεται μία στρατηγική για την διαμόρφωση ενός «χάρτη» αποβλήτων. Η συστηματοποίηση αυτής της φάσης θα βελτιστοποιήσει την διαχείριση των αποβλήτων τοπικά μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού, και άρα θα οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, πόρων, και εκπομπών αερίων, ενώ επίσης θα ενεργοποιηθούν μικρής κλίμακας μοντέλα κυκλικής οικονομίας τοπικά. Η έρευνα των Melugiri-Shankaramurthy et al. (2019) επίσης ασχολείται με τον κατασκευαστικό τομέα, και συγκεκριμένα πραγματεύεται το τσιμέντο και τις δυνατότητες ανάμειξης του με χρησιμοποιημένη πούδρα μετάλλου, τόσο για την βελτίωση της ποιότητας του και την ποιότητα της κατασκευής, όσο και για την οικολογική προσέγγιση του ζητήματος.

Οι Ting et al. (2019) εξετάζουν την δυνατότητα αντικατάστασης της άμμου στην κατασκευή με ανακυκλωμένο γυαλί. Στο πλαίσιο της έρευνας γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων της ψιλής άμμου με εκείνη από ανακυκλωμένο γυαλί, με την διαβάθμιση της δεύτερης να ελέγχεται ώστε να είναι ίδια με της πρώτης και να είναι επομένως δίκαια η σύγκριση και ορθά τα συμπεράσματα. Το υλικό με ανακυκλωμένα υάλινα αδρανή παρουσίασε καλύτερες ιδιότητες ροής σε σύγκριση με την ψιλή

άμμο. Ωστόσο, η ψιλή άμμος υπερέχει του ανακυκλωμένου γυαλιού στην δυνατότητα κατασκευής και στις μηχανικές ιδιότητες, καθώς στο γυαλί είναι χαμηλότερες.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5-3- 21: (α) Εκτυπωμένο αντικείμενο από σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο γυαλί (β) Διατομή αντικειμένου από καθαρή άμμο (γ) Διατομή αντικειμένου από ανακυκλωμένο γυαλί, υιοθετημένο από τους Ting et al. (2019)

Ένα άλλο ιδιαίτερο υλικό στην αρχιτεκτονική είναι το πέτρωμα «Lecce», ένα φυσικό υλικό που προκαλεί την έμπνευση, την δημιουργικότητα και την καινοτομία σε πολλές αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Οι Esposito Corcione et al. (2018) προτείνουν την επαναχρησιμοποίηση της φύρας αυτού του υλικού για την δημιουργία τροφοδοτικού νήματος για την ΠΚ (βλ. Σχήμα 5-3-12 & Σχήμα 5-3-13). Έτσι, όχι μόνο προάγεται η κυκλική οικονομία και η ορθή διαχείριση των αποβλήτων, αλλά δίνεται η ευκαιρία σε τεχνίτες να δημιουργήσουν υψηλής αισθητικής καινοτόμα αντικείμενα. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει την πλήρη ανακύκλωση της σκόνης από πέτρα, αποφεύγοντας τη σύνθετη διαδικασία απόρριψης με το υψηλό κόστος και το αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον λόγω της διασποράς λεπτών στερεών σωματιδίων στον αέρα, το νερό και το έδαφος.



Σχήμα 5-3- 32: Προετοιμασία του πετρώματος “Lecce” στην αρχιτεκτονική, (α) Φύρα πετρώματος (β) Σύνθλιψη του (γ) Κοσκίνισμα της πούδρας, υιοθετημένο από τους Esposito Corcione et al. (2018)



Σχήμα 5-3- 43: (α) Εξώθηση νήματος (β) Καθαρό νήμα PLA (γ) Ενισχυμένο νήμα PLA με φύρα πετρώματος Leece, υιοθετημένο από τους Esposito Corcione et al. (2018)

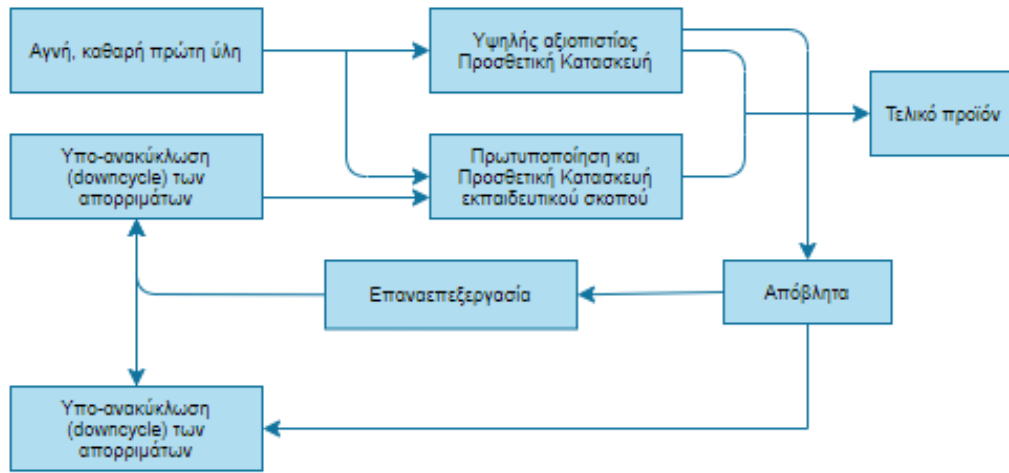
Συμπερασματικά λοιπόν, η ανακύκλωση της χρησιμοποιημένης πούδρας έχει μεγάλο όφελος, τόσο οικονομικά όσο και στην μείωση κατανάλωσης των πόρων (Lutter-Günther et al., 2018), και πολλές έρευνες έχουν αφοσιωθεί στην υπογράμμιση της ως ένα σπουδαίο τρόπο προς την βιωσιμότητα της παραγωγής μέσω ΠΚ (Gong et al., 2018). Η μείωση του κόστους του τροφοδοτικού υλικού (Baumers et al., 2016), μέσω της επαναχρησιμοποίησης της μη λιωμένης πούδρας αναμειγμένης σε καθαρή πρώτη ύλη και άρα την μείωση της ποσότητας της γνήσιας πρώτης ύλης που απαιτείται (Ahmed et al., 2020), ενισχύει την τάση όλο και περισσότερων βιομηχανιών να υιοθετήσουν την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής (Baumers et al., 2016). Ωστόσο, αυτή η φιλοσοφία δεν χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, κυρίως λόγω της μειωμένης ποιότητας που ενδέχεται να προκύψει από μία τέτοια πρώτη ύλη, για παράδειγμα στα κράματα Ti και Al (Lutter-Günther et al., 2018). Αυτές οι βιομηχανίες αφορούν κυρίως πεδία που είναι πλήρως μη ανεκτά στο ρίσκο, όπως αερόπλοια και βιοϊατρικές εφαρμογές (Gorji et al., 2019). Οι συνεχείς θερμικές εναλλαγές, το περιβάλλον της διεργασίας, η αλληλεπίδραση με το λέιζερ ή με ισχυρές δέσμες ηλεκτρονίων σε ορισμένες μεθόδους, επηρεάζει την πούδρα και ίσως οδηγήσει σε αντικείμενα με αλλαγμένη χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες (Santecchia et al., 2020 ; Kozlovsky et al., 2018).

Έτσι, απαιτείται μία βαθύτερη ανάλυση και γνώση στις ιδιότητες της πούδρας, προκειμένου να μπορεί να προσδιορισθεί η ποιότητα της και ο εκάστοτε χρήστης να έχει επαρκή στοιχεία πριν πάρει την απόφαση για την απόρριψη ή την επαναχρησιμοποίηση της, με απώτερο σκοπό πάντα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης πόρων (Gong et al., 2018). Η προσθήκη σωματιδίων αποτελεί μία λύση για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων και της βελτιστοποίηση λόγου χάρη της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, δυσκαμψία ή ελαστικότητα μιας δομής. Για παράδειγμα, η επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενων ελαστικών υλικών τύπου καουτσούκ στην μορφή πούδρας, λειτουργεί ως τέτοιο πρόσθετο για την κατασκευή νέων αντικειμένων (Quetzeri-Santiago et al., 2019). Άλλος τρόπος να βελτιωθεί με κάποιο τρόπο η δυναμική της ΠΚ στο θέμα της πούδρας, είναι για παράδειγμα by improving the gas atomization process or preventing out gassing of the melt pool (Gorji et al., 2020).

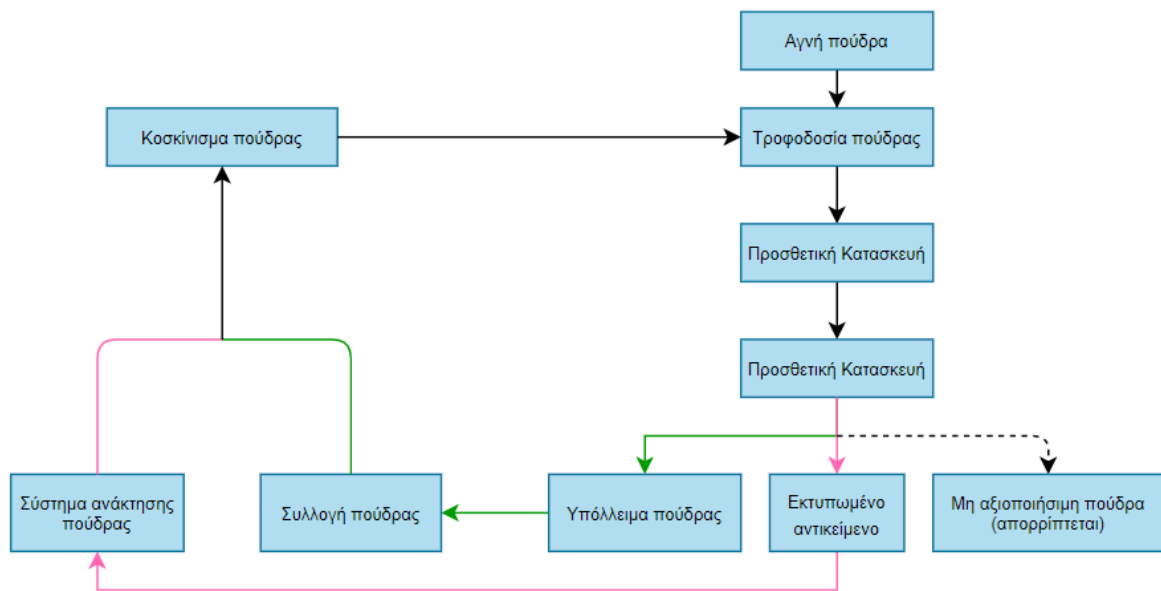
Στην βιβλιογραφία έχει αποδειχθεί πως οι ιδιότητες των αντικειμένων από επαναχρησιμοποιημένη πρώτη ύλη μπορούν μεν να είναι μειωμένες, αλλά πιθανόν να είναι και πλήρως ανεπηρέαστες από την πούδρα ή ακόμη και καλύτερες συγκριτικά με ίδια τεμάχια κατασκευασμένα από το ίδιο κράμα και με τις ίδιες παραμέτρους της διαδικασίας (Santecchia et al., 2020). Η πούδρα υλικού, ακόμα και ανακυκλωμένη, είναι πρώτη ύλη υψηλής ποιότητας σε σχέση για παράδειγμα με τα απόβλητα πλαστικών χαμηλής ποιότητας (μπουκάλια, σακούλες και λοιπά), επομένως είναι ευφυής κίνηση η αξιοποίηση της. Διαφορετικά, κρίνεται μη εφικτή η ενεργειακή αποδοτικότητα και βιωσιμότητα της ΠΚ. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η χρήση της πλαστικής πούδρας στο τέλος της διαδικασίας SLS, παράγει σκληρότερες και ισχυρότερες ίνες

νήματος για την FDM. Αυτό αποτελεί ένα τρανταχτό παράδειγμα που δύο διαφορετικές μέθοδοι ενώνονται, τα απόβλητα της μίας είναι υψηλής αξίας πόροι για την άλλη, και η ΠΚ πλέον καθίσταται σε μεγάλο βαθμό αυτόνομη και αειφόρος (Kumar & Czekanski, 2018 ; Wang et al., 2018).

Στην συνέχεια, για το κλείσιμο της υποενότητας ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης πούδρας στο τέλος μιας διαδικασίας προσθετικής κατασκευής, παραθέτονται δύο διαγράμματα. Στο σχήμα 5-3-14 απεικονίζονται τα μονοπάτια της γνήσιας και της ανακυκλωμένης πρώτης ύλης, και στο σχήμα 5-3-15 απεικονίζεται η διαδικασία του κύκλου επαναχρησιμοποίησης του υπολείμματος πούδρας σε νέα κατασκευαστική εργασία.



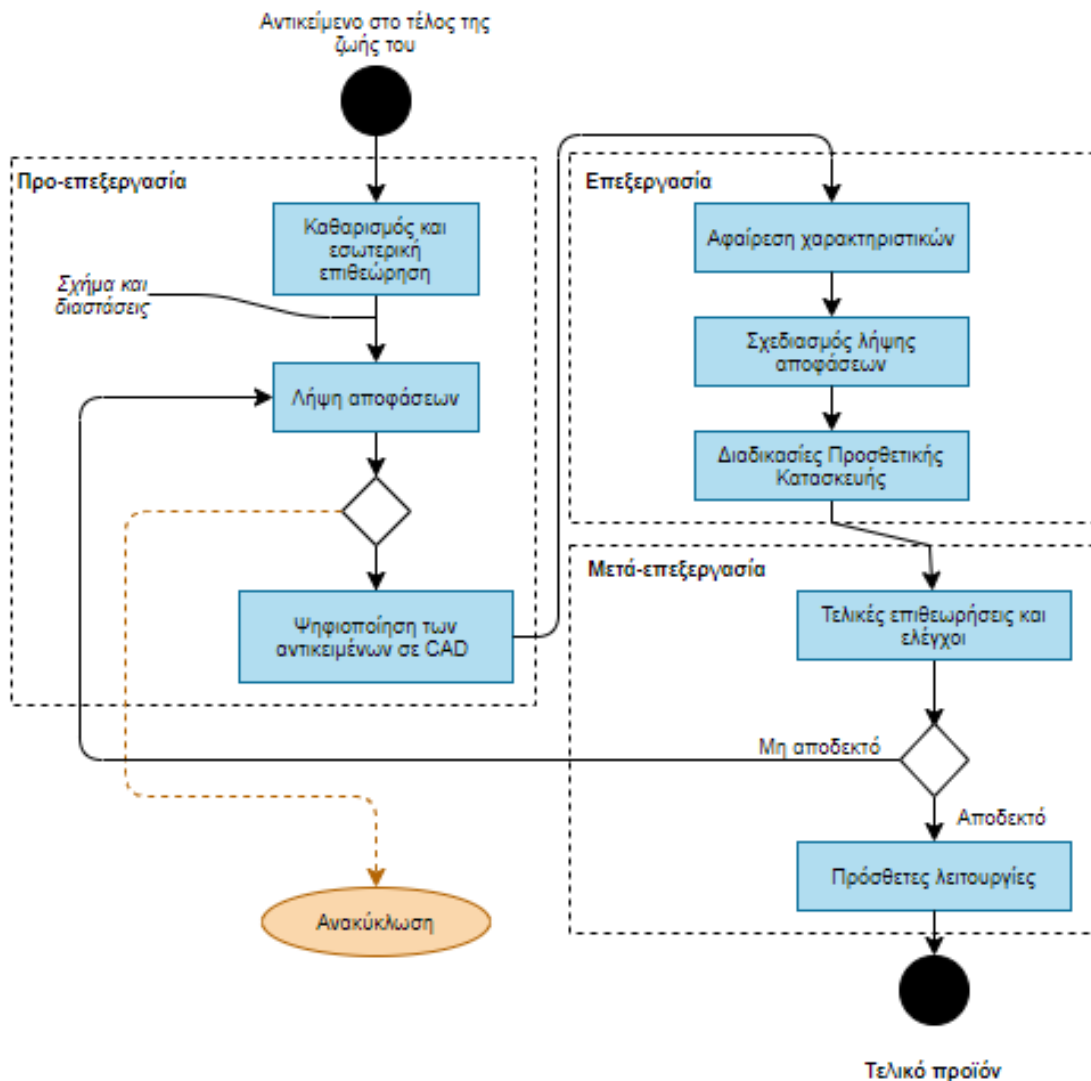
Σχήμα 5-3- 54: Διάγραμμα για τα μονοπάτια γνήσιας και ανακυκλωμένης πρώτης ύλης στην Προσθετική κατασκευή, υιοθετημένο από τους Clemon & Zohdi (2018)



Σχήμα 5-3- 65: Διάγραμμα αναπαράστασης της διαδικασίας επαναχρησιμοποίησης πούδρας στην Προσθετική Κατασκευή, υιοθετημένο από τους Chandrasekat et. (2020)

5.3.2. Επαναχρησιμοποίηση χωρίς το στάδιο της ανακύκλωσης

Οι Le et al (2018) εργάστηκαν στο ζήτημα της επαναχρησιμοποίησης των υλικών στο τέλος της ζωής τους, χωρίς όμως να απαιτείται η διαδικασία της ανακύκλωσης (βλ. Σχήμα 5-3-16). Συγκεκριμένα, στην μελέτη τους ερευνήθηκε ο συνδυασμός μεθόδου προσθετικής κατασκευής (EBM, SLM, DMD), με αφαιρετική (κατεργασία CNC), μία στρατηγική που οδηγεί σε δημιουργία μεταλλικών εξαρτημάτων απευθείας από αντικείμενα στο τέλος της ζωής τους, δίνοντας τους καινούρια ζωή και χρήση. Η στρατηγική αυτή χρησιμοποιεί πλήρως αποδοτικά τους πόρους και μειώνει την παραγωγή αποβλήτων, όπως και την απαιτούμενη ενέργεια άρα συμβάλλει γενικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου κατά την διαδικασία κατασκευής.



Σχήμα 5-3- 76: Προτεινόμενη μεθοδολογία για επαναχρησιμοποίηση αντικειμένων στο τέλος της ζωής τους χωρίς να μεσολαβήσει η διαδικασία ανάκτησης – ανακύκλωσης, υιοθετημένο από τους Le et al. (2018)

Οι Teixeira et al. (2018) ανέπτυξαν ένα πρότζεκτ με όνομα EDUCABOT3D για την ευαισθητοποίηση των μαθητών πρωτίστως αλλά και συνολικά της κοινωνίας για την μείωση των ηλεκτρονικών αποβλήτων και την επαναχρησιμοποίηση τους μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πειραματικά,

έγινε προσπάθεια για αξιοποίηση των μελών που απαρτίζουν διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές που δεν χρησιμοποιούνται πια, για τη δημιουργία μιας ρομποτικής πλατφόρμας. Καθότι ήταν πιθανό να μη βρεθούν όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα, η τρισδιάστατη εκτύπωση συνέβαλλε για την κατασκευή όσων δεν ήταν διαθέσιμα. Έτσι, αναπτύχθηκαν ορισμένα μοντέλα 3D που ταιριάζουν στους κινητήρες, αισθητήρες και άλλα εξαρτήματα, σε διαφορετικά μεγέθη και διαμορφώσεις, τα οποία διατίθενται στα σχολεία για συναρμολόγηση ρομπότ, ως ανταλλακτικών και για μελλοντικές προσαρμογές.

Επίσης, ενδεδειγμένη έρευνα στην επαναχρησιμοποίηση των αντικειμένων χωρίς απαραίτητα να έχουν πρώτα ανακυκλωθεί, έκαναν οι Sauerwein et al. (2019). Συγκεκριμένα, το «Project RE_», διερευνά την ΠΚ ως εργαλείο «do-it-yourself» για την επαναχρησιμοποίηση προϊόντων (βλ. Σχήμα 5-3-17). Η λειτουργικότητα των χρησιμοποιημένων κουτιών και των βάζων μετατρέπεται, για παράδειγμα, σε μια βάση μολυβίων ή σε κουμπάρα, μέσω της προσθήκης προσαρμοσμένων καπακιών. Το έργο είναι Ανοιχτής Πηγής και οι χρήστες μπορούν να κατεβάσουν τα αρχεία στο διαδίκτυο για να εκτυπώσουν τα ίδια τα καπάκια. Το 2012, αυτό το έργο ήταν ένα από τα πρώτα εμπνευσμένα παραδείγματα ΠΚ και, ως εκ τούτου, εξακολουθεί να εκτίθεται συχνά σε όλο τον κόσμο.



Σχήμα 5-3-17: «Πρότζεκτ Re_», προτεινόμενο για επαναχρησιμοποίηση αντικειμένων σε νέους κύκλους ζωής από τον Samuel Bernier, υιοθετημένο από τους Sauerwein et al. (2019)

5.4. Ανακατασκευή και επιδιόρθωση

Οι έννοιες της ανακατασκευής και της επιδιόρθωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους, για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο, σύμφωνα πάντα με τη γνώμη της συγγραφέως της παρούσας έρευνας, να αποτελέσουν την ίδια ενότητα. Επομένως, στην υποενότητα 5.4.1 εστιάζει στην ανακατασκευή και σε παραδείγματα της βιβλιογραφίας που αποδεικνύουν την αξία της, και η υποενότητα 5.4.2 με όμοιο τρόπο, πραγματεύεται την έννοια της επιδιόρθωσης.

5.4.1. Ανακατασκευή

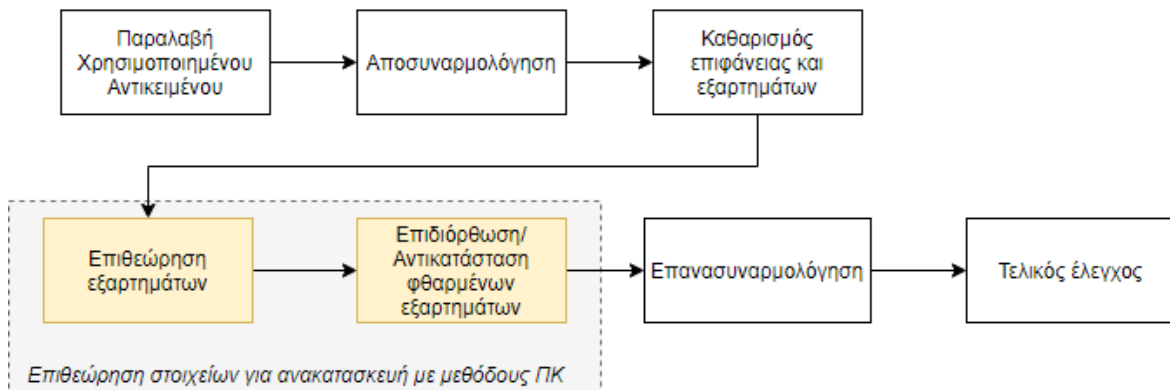
Ένας από τους βασικούς πυλώνες της Κυκλικής Οικονομίας είναι η συνειδητοποίηση της αξίας των προϊόντων στο τέλος της ζωής τους, και η ανάκτηση της αρχικής αξίας που είχε το προϊόν όταν πρωτοκατασκευάστηκε (Lahrou & Brissaud, 2018). Η ανακατασκευή, ούσα μία τέτοια μέθοδος, ορίζεται ως «η επαναδημιουργία ενός προϊόντος σύμφωνα με τις προδιαγραφές του γνήσιου αντικειμένου, μέσω ενός συνδυασμού επαναχρησιμοποίησης, επιδιόρθωσης, και νέων εξαρτημάτων» (Lahrou & Brissaud, 2018). Δηλαδή ένα αντικείμενο αποσυναρμολογείται, καθαρίζεται, ελέγχεται, επιδιορθώνεται, αντικαθίσταται σε ορισμένα εξαρτήματα, επανασυναρμολογείται και ελέγχεται από εξειδικευμένους εργάτες (βλ. Σχήμα 5-4-1) (Rahito et al., 2019), με το τελικό αποτέλεσμα να είναι σαν καινούριο (Lahrou & Brissaud, 2018 ; Rahito et al., 2019).

Η ανακατασκευή θεωρείται από τις βέλτιστες λύσεις διαχείρισης των προϊόντων στο τέλος της ζωής τους, διότι επιτρέπει την μετατροπή φθαρμένων, φαινομενικά μη χρήσιμων πλέον αντικειμένων, σε μία κατάσταση «like-new» (με εγγύηση) (Le et al., 2017 ; Liu et al., 2019). Ουσιαστικά προσεγγίζει αποτελεσματικά την φιλοσοφία της επέκτασης της ζωής ενός εξαρτήματος, ή και στην αλλαγή/πρόσθεση λειτουργιών σε ένα υπάρχον αντικείμενο (Liu et al., 2019), δηλαδή μέσω κατάλληλου σχεδιασμού και βιώσιμων στρατηγικών δύναται όχι μόνο να το φέρει στην αρχική του κατάσταση αλλά και να το βελτιώσει λειτουργικά (Rahito et al., 2019).

Οι Lahrou & Brissaud, (2018) στην μελέτη τους έχουν αναλύσει τα βήματα που ακολουθούνται κατά την ανακατασκευή, συγκεκριμένα αναφέρουν τρεις φάσεις: (1) σχεδιασμός αποκατάστασης (2) σχεδιασμός διεργασιών (3) σχεδιασμός τεχνολογίας. Στην πρώτη φάση, προσδιορίζονται και ταυτοποιούνται οι τύποι των κατεστραμμένων εξαρτημάτων. Στην δεύτερη φάση, καθορίζονται και περιγράφονται οι παράμετροι και η σειρά των διαδικασιών που θα πραγματοποιηθούν. Στην τρίτη φάση, επιλέγεται ο κατάλληλος εξοπλισμός, εργαλεία και μηχανήματα που θα πραγματοποιήσουν τις διαδικασίες που ορίστηκαν. Το κλειδί στην επιτυχία είναι ο εξοπλισμός και η τεχνολογία για την πραγματοποίηση της διεργασίας, με κριτήριο πάντα την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Σαν μέθοδος είναι φυσικά πιο αποδοτική και οικολογικά και ενεργειακά συγκριτικά με την συμβατική ανακύκλωση υλικών ή την υγειονομική ταφή τους (Liu et al., 2019). Σχετικά με την ανακύκλωση, η ανακατασκευή έχει μεγαλύτερη απόδοση διότι διατηρεί ανθεκτικό τον πυρήνα του αντικειμένου στους επόμενους κύκλους ζωής του, μειώνοντας έτσι την ανάγκη κατασκευής νέων εξαρτημάτων κάθε φορά (Rahito et al., 2019). Για αυτό άλλωστε, εφαρμόζεται από πολλές χώρες

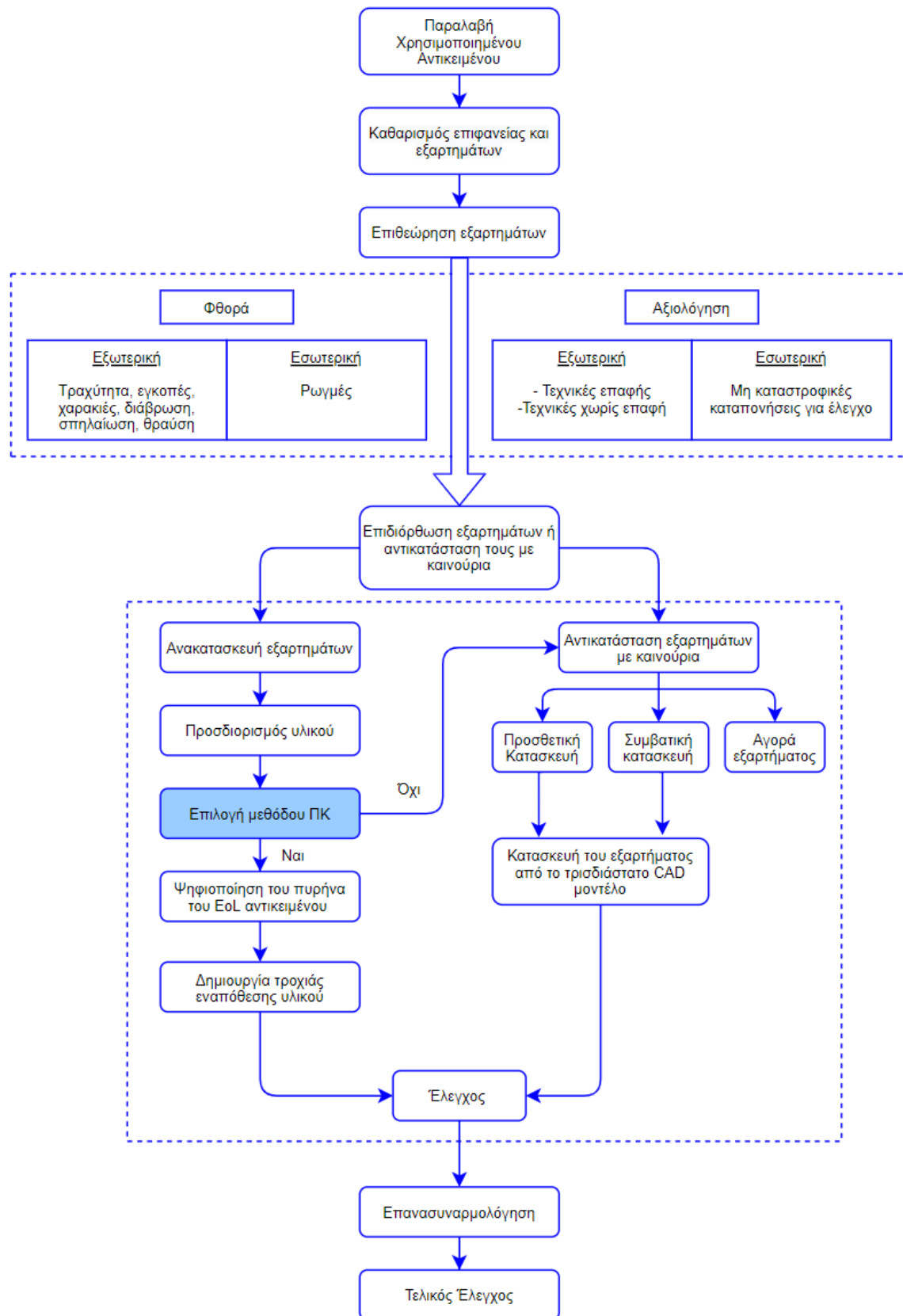
ως η καλύτερη στρατηγική για την προσθήκη αξίας σε αντικείμενα στο τέλος της ζωής τους (Rahito et al., 2019), στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής ευαισθησίας αλλά και οικονομικής ωφέλειας (Lahrou & Brissaud, 2018), αφού μειώνει την κατανάλωση πόρων και τα παραγόμενα απόβλητα (Le et al., 2017).



Σχήμα 5-4- 1: Η ροή της διαδικασίας για την ανακατασκευή, υιοθετημένο από τους Rahito et al. (2019) και Lahrou & Brissaud, (2018)

Η δυνατότητα αυτής της τεχνολογίας να δίνει νέα ζωή σε χρησιμοποιημένα προϊόντα μέσω βιώσιμων και περιβαντολογικών στρατηγικών είναι μία σπουδαία κατευθυντήριος δύναμη για την Προσθετική Κατασκευή (Guo et al., 2020). Για παράδειγμα, μέσω της προσθετικής κατασκευής δύναται να προστεθούν ιδιαίτερες γεωμετρίες σε ημιτελή αντικείμενα, επομένως η ανακατασκευή είναι το κλειδί για κατεστραμμένους στροβίλους, πτερύγια κινητήρων και άλλων γεωμετρικών επιδιορθώσεων με συγκεκριμένες μεθόδους ΠΚ μέσω της αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering) και του ανασχεδιασμού (Daraban et al., 2019). Από πολλούς μελετητές, δίνεται η προσέγγιση της ανακατασκευής μέσω του μοντέλου της υβριδικής κατασκευής (Liu et al., 2019 ; Guo et al., 2020). Η ανακατασκευή προϋποθέτει τη εκμετάλλευση της αφαιρετικής μεθόδου κατασκευής, ώστε να αφαιρεθούν τα εξωτερικά ή τα επισφαλή στρώματα/σημεία του αντικειμένου, και να προστεθούν νέα υλικά για την δημιουργία νέων ιδιοτήτων και ικανοτήτων του αντικειμένου. Δηλαδή σε πρώτη φάση χρησιμοποιείται ένα μηχάνημα για την αφαίρεση του περιττού υλικού από το αντικείμενο, και έπειτα προστίθεται υλικό σε επίπεδα για την επίτευξη της τελικής ζητούμενης γεωμετρίας. Έτσι, το αντικείμενο είτε αναβαθμίζεται λειτουργικά έχοντας περισσότερες ικανότητες, είτε ένα σπασμένο εξάρτημα επιδιορθώνεται. Όπως είναι προφανές, το χρησιμοποιηθέν αντικείμενο έχει ανακυκλωθεί με έναν πολύ οικολογικό τρόπο (Liu et al., 2019).

Οι Lahrou & Brissaud, 2018 στη μελέτη τους έχουν δώσει μεγάλη προσοχή στη συμβολή της ΠΚ στην ανακατασκευή (βλ. Σχήμα 5-4-2). Αναφέρεται πως για να καθοριστεί ο βαθμός στον οποίο συμμετέχει η ΠΚ στην ανακατασκευή, ακολουθούνται τα εξής βήματα: (1) Καθορισμός των βημάτων της ανακατασκευής στα οποία θα γίνει χρήση της ΠΚ, (2) Ορισμός του σκελετού της διαδικασίας προσθετικής ανακατασκευής και (3) Προσδιορισμός των σημείων-κλειδιών και των χαρακτηριστικών των προϊόντων που θα ανακατασκευαστούν μέσω της ΠΚ. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία έχει ως εξής. Αφότου παραληφθεί το αντικείμενο, καθαρίζεται ενδελεχώς για την απομάκρυνση της σκόνης και των διάφορων ακαθαρσιών. Έπειτα επιθεωρείται, και αξιολογούνται οι εσωτερικές αλλά και εξωτερικές συνθήκες του πυρήνα του αντικειμένου, και από τα αποτελέσματα αποφασίζεται αν ο πυρήνας αυτός μπορεί να ανακατασκευαστεί ή πρέπει να



Σχήμα 5-4-2: Σχηματική απεικόνιση των βημάτων για την Προσθετική Ανακατασκευή, σύμφωνα με τους Lahrou & Brissaud, (2018)

διαλυθεί, και αν έχει ελαττώματα που μπορούν να διορθωθούν μέσω της ΠΚ. Η προσθήκη υλικού με προσθετική κατασκευή γίνεται μετά από κάποια κριτήρια επιλογής όπως το υλικό την μορφή

και τον όγκο του πυρήνα του αντικειμένου. Αν δεν είναι εφικτή η ανακατασκευή ορισμένων τμημάτων του, η επόμενη λύση είναι η αντικατάσταση. Τέλος, και αφού έχει διατηρηθεί ψηφιακά η μορφή του αρχικού πυρήνα και του τελικού αντικειμένου για μελλοντική χρήση, ο τελικό προϊόν υπόκειται σε μηχανικούς ελέγχους για τις ιδιότητες του.

Οι πιο αρμόζουσες μέθοδοι ΠΚ για την υιοθέτηση τους στην ανακατασκευή είναι η Direct Energy Deposition και Powder Bed Fusion σύμφωνα με τους Lahrou & Brissaud (2018) και Leino et al. (2016), ενώ οι Le et al. (2017) σε αυτές τις δύο προσθέτουν και την FDM. Σχετικά με τα υλικά, στην μελέτη των Lahrou & Brissaud (2018) αναφέρονται ως συμβατά το μέταλλο, το πλαστικό, και το κεραμικό. Και τα τρία υλικά είναι συμβατά με την διαδικασία Powder Bed Fusion, ενώ για την χρήση της Direct Energy Deposition απαιτείται αποκλειστικά το μέταλλο.

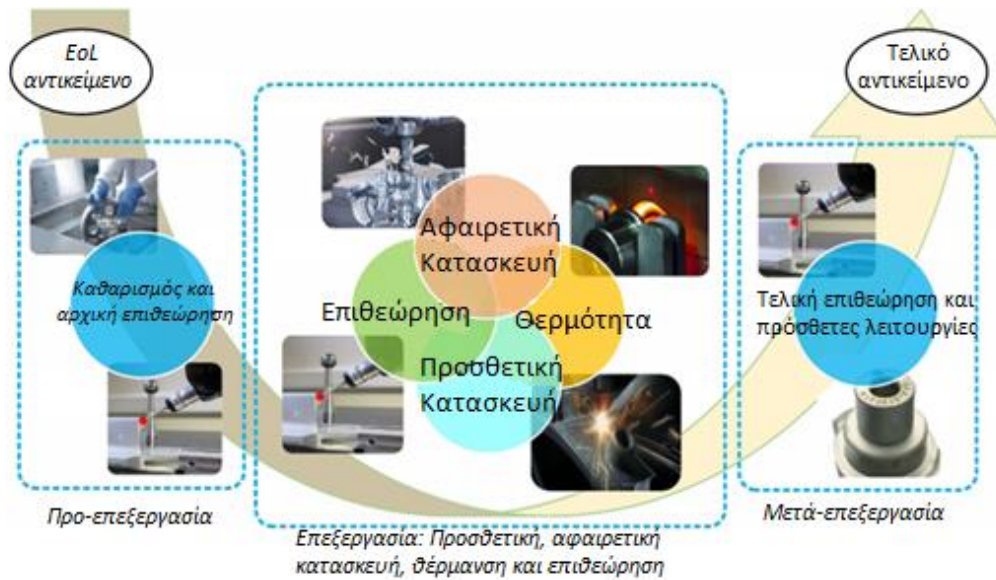


Σχήμα 5-4-3: Επιδιορθωμένα καλούπια με κορυφές, με ειδικούς αγωγούς ψύξης, κατασκευασμένα μέσω ΠΚ, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019)

Η έρευνα των Le et al. (2017) κινείται στο ίδιο πλαίσιο με των Lahrou & Brissaud (2018), επιστρατεύοντας την σπουδαιότητα όχι μόνο της ΠΚ αλλά και του υβριδικού μοντέλου. Συγκεκριμένα, γίνεται λόγος για μια «νέα στρατηγική ανακατασκευής» που δίνει καινούρια ζωή σε αντικείμενα στο τέλος της ζωής τους ως εξαρτήματα σε άλλα αντικείμενα. Δηλαδή, το επιθυμητό προϊόν επιτυγχάνεται από υπάρχοντα εξαρτήματα με μια ακολουθία κατασκευής που περιλαμβάνει αφαιρετικές λειτουργίες (λόγου χάριν CNC κατεργασία), προσθετικές λειτουργίες (προσθετική κατασκευή), καθώς και εργασίες επιθεώρησης ή διάφορες θερμικές διεργασίες (βλ. Σχήμα 5-4-4). Έτσι, επωφελείται πλήρως από τα θετικά στοιχεία των επιμέρους μεθόδων (δημιουργία πολυσύνθετης γεωμετρίας εξαιρετικής ακρίβειας λόγω κατεργασίας CNC) εξαλείφοντας τα μειονεκτήματά τους (χαμηλή ακρίβεια και ποιότητα επιφανείας και περιορισμένες δυνατότητες γεωμετρίας και εργαλείων). Από πρακτική πλευρά, οι Le et al. εφάρμοσαν τον συνδυασμό της τεχνικής Laser Direct Deposition και της κατεργασίας CNC για την ανακατασκευή λεπίδων στροβίλου, και την μέθοδο Selective Laser Melting για την ανακατασκευή εξαρτήματος καυστήρα αεριοστρόβιλου (gas turbine burner tips).

Ομοίως οι Liu et al (2019), εστίασαν την προσοχή τους στο υβριδικό μοντέλο ανακατασκευής ως τη βέλτιστη προσέγγιση. Μέσω του υβριδικού μοντέλου, κάποια χαρακτηριστικά αφαιρούνται και άλλα προσθέτονται, δηλαδή, το αντικείμενο έχει λειτουργικά αναβαθμιστεί διότι είτε του προσδίδεται εντελώς νέα γεωμετρία, είτε ανακτώνται πλήρως οι ιδιότητες που είχε πριν αστοχήσει. Αφότου αφαιρεθούν τα μη χρήσιμα πλέον χαρακτηριστικά, η εναπόθεση υλικού γίνεται επίπεδο ανά επίπεδο, με το ύψος του κάθε προστιθέμενου επιπέδου να είναι εξαιρετικά

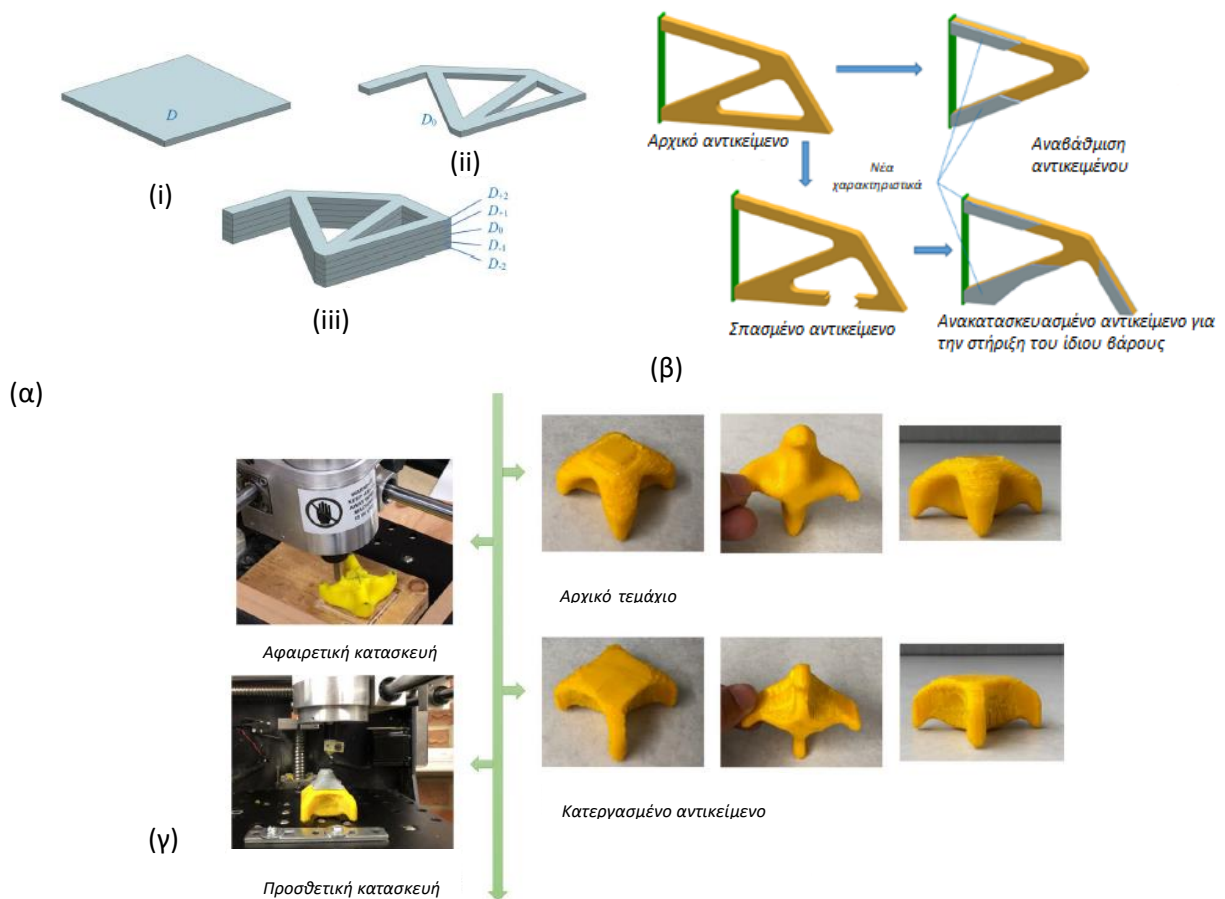
μικρό. Φυσικά, τα στρώματα μεταξύ τους είναι πανομοιότυπα σχετικά με το μοτίβο εκτύπωσης τους (μονοπάτια γεωμετρίας και απόθεσης υλικού). Οι Liu et al. πραγματοποίησαν τρεις μελέτες



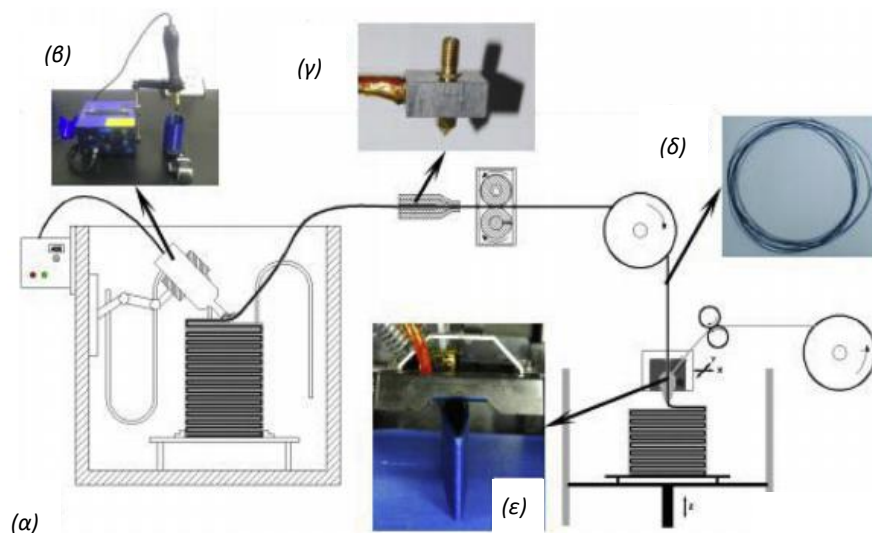
Σχήμα 5-4-4: Προτεινόμενη μεθοδολογία ανακατασκευής, από τους Le et al. (2017;2018)

περίπτωσης, πραγματευόμενοι τα εξής: δύο αναβαθμίσεις αντικειμένου, και μία επιδιόρθωση αντικειμένου. Ο στόχος της έρευνας τους είναι λαμβάνοντας υπόψιν ως κύρια μέθοδο βελτιστοποίησης τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας, η ανάπτυξη ενός καινοτόμου αλγορίθμου, κατά τον οποίο εξετάζοντας ένα συγκεκριμένο τμήμα που επιφέρει φορτίο, ο αλγόριθμος αυτός θα διευκολύνει τους μηχανικούς να υπολογίσουν ποια χαρακτηριστικά πρέπει να αφαιρεθούν με την αφαιρετική κατασκευή και ποια να προστεθούν μέσω της προσθετικής κατασκευής (βλ. Σχήμα 5-4-5).

Στην έρευνα των Tian et al. (2017), μελετώνται συνθετικές ίνες ενισχυμένες με θερμοπλαστικό (Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites - CFRTPCs) με στόχο την ανακύκλωση και ανακατασκευή τους και την τελική δημιουργία αντικειμένων με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα γνήσια. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα για χρήση ενός «πράσινου» σύνθετου για το μέλλον με προοπτική υιοθέτησης στην τρισδιάστατη εκτύπωση, ούτως ώστε να μην υπάρχει εξάρτηση από τις ίνες άνθρακα. Επομένως, εκτός από τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες, υπάρχει μεγάλο περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος. Ένα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να εξετασθεί είναι το ποσοστό ανάκτησης αποβλήτων ή υλικών και η κατανάλωση ενέργειας για τη διαδικασία ανακύκλωσης. Στην συγκεκριμένη μελέτη επιτεύχθηκε συνολικό ποσοστό ανάκτησης υλικού 75%, στο οποίο η συνεχής ίνα άνθρακα ανακτάται 100% και μετασχηματίζεται σε ένα εμποτισμένο νήμα χωρίς καμία ζημιά στις ιδιότητες των ινών άνθρακα. Η ανακατασκευή είναι μια τρισδιάστατη διαδικασία εκτύπωσης CFRTPC που χρησιμοποιεί ανακυκλωμένο νήμα από ανθρακονήματα, στην οποία η ενέργεια καταναλώνεται κυρίως με θέρμανση και μετακίνηση της κεφαλής εκτύπωσης (βλ. Σχήμα 5-4-6).



Σχήμα 5-4-5: Σύμφωνα με τους τους Liu et al. (2019), (α) i. Το αρχικό υλικό ii. Συμβατικό σχήμα iii. Τελικό σχήμα (συμπεριλαμβανομένης προσθετικής και αφαιρετικής κατασκευής) , (β)-(γ) Συνδυασμός υβριδικής προσθετικής-αφαιρετικής κατασκευής για την ανακατασκευή αντικειμένου

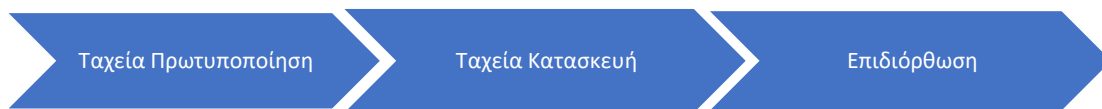


Σχήμα 5-4-6: Διαδικασία ανακύκλωσης και ανακατασκευής τρισδιάστατα εκτυπωμένων CFRTPCs (α) , και τα κυριότερα μέρη στη διαδικασία: (β) σύστημα εξώθησης θερμού αέρα (γ) ακροφύσιο (δ) ανακυκλωμένο νήμα (ε) διαδικασία ανακατασκευής, υιοθετημένο από τους Tian et al. (2017)

5.4.2. Επιδιόρθωση

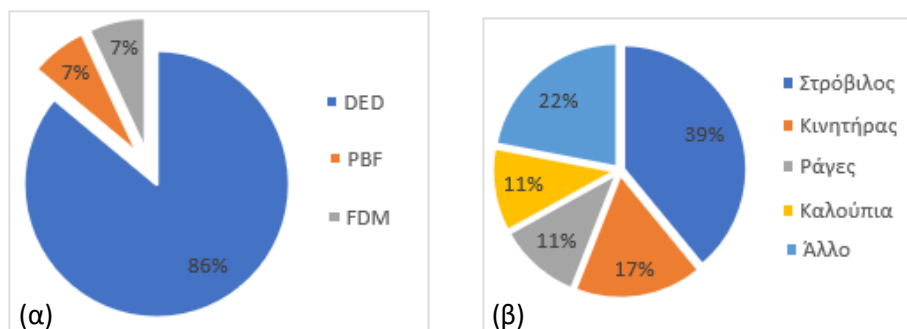
Ο σχεδιασμός προϊόντων για κυκλική οικονομία είναι ένα θέμα που απασχολεί αρκετά τους ερευνητές τον τελευταίο καιρό, στο πλαίσιο του σχεδιασμού για βιωσιμότητα (Sauerwein et al., 2019). Ο σχεδιασμός των αντικειμένων πρέπει να γίνει με γνώμονα την εύκολη διατήρηση, εποπτεία και επιδιόρθωση τους (Giurco et al., 2014). Σύμφωνα με τους Daraban et al. (2019), στην έρευνα που διεξήχθη από τους Schniederjans (2017) μόνο το 10% των επιχειρήσεων που συμμετείχαν δήλωσαν πως χρησιμοποιούν μεθόδους προσθετικής κατασκευής για την παραγωγή ανταλλακτικών τελικής χρήσης σε μεγάλες ποσότητες. Ωστόσο, ακόμα και αν οι βιομηχανίες δεν αντιλαμβάνονται τα πλεονεκτήματα της επιδιόρθωσης μέσω ΠΚ, είναι αδιαμφισβήτητες οι εξαιρετικές προοπτικές που έχει για εφαρμογή (Daraban et al., 2019), ιδιαίτερα για την επέκταση του χρόνου ζωής των προϊόντων, βελτιώνοντας ακόμα και το κόστος παραγωγής των ανταλλακτικών εξαρτημάτων (Giurco et al., 2014).

Η χρήση της ΠΚ για την επιδιόρθωση τεμαχίων που έχουν αστοχήσει, ιδιαίτερα μέσω της 3D εκτύπωσης ανταλλακτικών, αυξάνεται ραγδαία (Wilkinson & Cope, 2015). Γενικά η ΠΚ χρησιμοποιούταν για προτυποποίηση, ωστόσο πλέον υιοθετείται και για εφαρμογές επιδιόρθωσης σε εξαρτήματα που έχουν αστοχήσει, συνήθως με την βοήθεια συμβατικών μεθόδων κατασκευής στο πλαίσιο ενός υβριδικού μοντέλου (βλ. Σχήμα 5-4-7) (Daraban et al., 2019 ; Liu et al., 2019). Βέβαια είναι απαραίτητο να τονισθεί πως αν και η υβριδική τεχνολογία αφαίρεσης-πρόσθεσης στην ανακατασκευή έχει εξαιρετικές προοπτικές δεν υπάρχει ακόμα μία



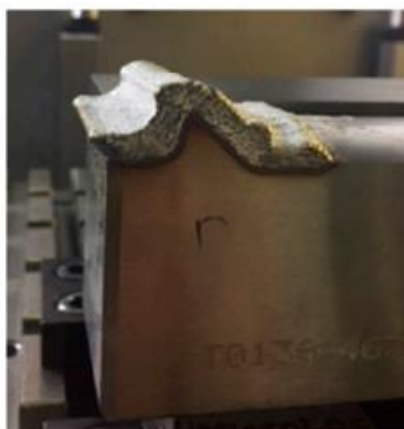
Σχήμα 5-4-7: Η πορεία των εφαρμογών χρήσης Προσθετικής Κατασκευής, υιοθετημένο από τους Rahito et al. (2019)

σαφής μεθοδολογία για την design-for-remanufacturing από άποψη δομικής βελτιστοποίησης, δηλαδή, πρέπει να αντιμετωπιστούν πολλοί περιορισμοί κατασκευαστικότητας λόγω των πολλών μεθόδων κατασκευής που περιπλέκουν την ανάπτυξη του προγράμματος βελτιστοποίησης (Liu et al., 2019). Από τις διαφορετικές τεχνικές ΠΚ, μόνο τρεις μπορούν να εφαρμοστούν για επιδιόρθωση, συγκεκριμένα οι Direct Energy Deposition, Fused Deposition Modeling, Powder Bed Fusion, και δύνανται να επιδιορθώσουν ένα σπασμένο ή φθαρμένο τμήμα ενός αντικειμένου (βλ. Σχήμα 5-4-8) (Rahito et al., 2019).

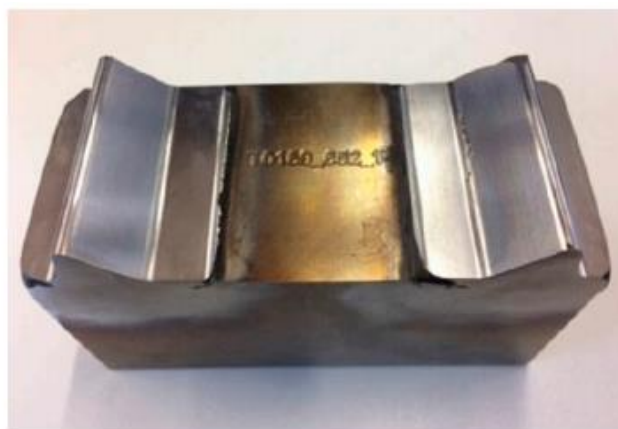


Σχήμα 5-4-8: Υιοθετημένο από τους Rahito et al. (2019), (α) Ποια μέθοδος ΠΚ χρησιμοποιείται για την επιδιόρθωση και (β) Ποια εξαρτήματα συνήθως επιδιορθώνονται μέσω ΠΚ

Η ικανότητα άμεσης εκτύπωσης και επιδιόρθωσης ενός αντικειμένου, έναντι της απόρριψης του σε χώρο υγειονομικής ταφής λόγω χάριν, συμβάλλει καταλυτικά στην μείωση των απόβλητων και την κατανάλωση τόσο των υλικών όσο και των ενεργειακών πόρων (Wilkinson & Core, 2015). Ακόμα, συγκριτικά με την παραδοσιακή επιδιόρθωση, η ΠΚ αντί να απαιτεί χειροκίνητη κατασκευή του εξαρτήματος και στη συνέχεια να το συνδέσει στη θέση του σπασμένου τμήματος, μπορεί να «χτίσει» υλικό απευθείας πάνω στην φθαρμένη επιφάνεια, επίπεδο ανά επίπεδο (Rahito et al., 2019 ; Sauerwein et al., 2019). Επίσης, για την αντικατάσταση τμημάτων ή εξαρτημάτων κατά την ανακατασκευή, η ΠΚ μπορεί να παράξει σπάνια τεμάχια που δεν διατίθενται πλέον στην αγορά (Rahito et al., 2019). Επομένως, η επιδιόρθωση είναι ένα σπουδαίο βήμα προς την Κυκλική Οικονομία διότι επιβεβαιώνει το ότι προϊόντα στο τέλος της ζωής τους μετατρέπονται σε μια νέα κατάσταση «σαν καινούρια» πριν προχωρήσουν σε νέο κύκλο ζωής (Rahito et al., 2019 ; Daraban et al., 2019).



(α)

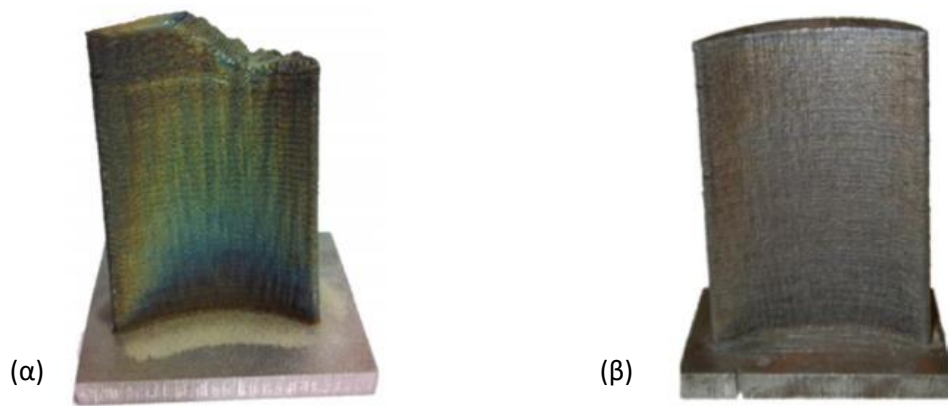


(β)

Σχήμα 5-4-9: Επιδιόρθωση καλουπιού χρησιμοποιώντας Powder Laser Deposition, (α) πριν και (β) μετά, υιοθετημένο από τους Daraban et al. (2019)

Οι Rahito et al. (2019) ανέλυσαν λεπτομερώς την κάθε μία από τις τρεις συμβατές μεθόδους ΠΚ για την επιδιόρθωση. Η LC (Laser Cladding, ανήκει στις μεθόδους DED) είναι ικανή να επιδιορθώσει ένα κομμάτι προϊόντος που έχει υποστεί ζημιά ακόμα και αν πρόκειται για μια συμπαγή τεχνολογία με φαρδύ σχήμα, ή να επιδιορθώσει ρωγμές με επικάλυψη υλικού στην φθαρμένη επιφάνεια (βλ. Σχήμα 5-4-10). Γενικά σε αυτή την μέθοδο η γεωμετρική περιπλοκότητα του αντικειμένου είναι ο σημαντικότερος παράγοντας. Η FDM μπορεί να αναπαράγει ένα νέο τμήμα του αντικειμένου που έχει φθαρεί, και να το αντικαταστήσει. Έτσι, είναι πιο αποτελεσματική η εκ νέου κατασκευή του συγκεκριμένου μέλους ενός αντικειμένου που αντί να απαιτείται παραγγελία από τον κατασκευαστή, ιδιαίτερα για τεμάχια που δεν υπάρχουν πλέον στην αγορά. Τέλος, για την εφαρμογή μεθόδων PBF, είναι απαραίτητο η επιφάνεια του αντικειμένου να είναι επίπεδη και παράλληλη με την πλατφόρμα εργασίας (δηλαδή την κλίνη), για να γίνει η διαδικασία επιδιόρθωσης. Αυτή είναι και η βασικότερη διαφορά της μεθόδου από τις δύο προαναφερθείσες, όσον αφορά στην επιδιόρθωση.

Το τεχνολογικό άλμα για την αυτοματοποίηση της επιδιόρθωσης, απαιτεί μία αποδοτική τεχνολογία που θα εγγυάται σωστό αποτέλεσμα (Rahito et al., 2019). Ο τρόπος που μπορεί να γίνει αυτό είναι μέσω μιας ψηφιακής βάσης δεδομένων όπου τα σχέδια των εξαρτημάτων καταχωρούνται και αξιοποιούνται ανά πάσα στιγμή για τις διάφορες λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας (Daraban et al., 2019). Βασική παράμετρος σε αυτό το εγχείρημα είναι ο σχεδιασμός των



Σχήμα 5-4-10: (α) Σπασμένο άκρο (β) Επιδιορθωμένο άκρο αντικειμένου, υιοθετημένο από τους Rahito et al. (2019)

αντικειμένων (Rahito et al., 2019), ο οποίος πρέπει να προσανατολισθεί στην συντήρηση, επιδιόρθωση και αναθεώρηση τους (Sauerwein et al., 2019), δηλαδή την ευκολία στην συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση, καθώς ο βαθμός στον οποίο το εξάρτημα μπορεί να επιδιορθωθεί από τον ίδιο τον αγοραστή του, εξαρτάται από παράγοντες όπως το κόστος και ο απαιτούμενος χρόνος και δεξιότητα (Giurco et al., 2014). Αυτή η «ψηφιακή αποθήκευση» των εξαρτημάτων, δίνει την δυνατότητα εκτός από να διευκολυνθεί η διαδικασία της επιδιόρθωσης, να παράγονται ανταλλακτικά εξαρτήματα on-demand, μειώνοντας τον απαιτούμενο χώρο αποθήκευσης φυσικών αντικειμένων (Sauerwein et al., 2019). Το Makerbot Thingiverse Website, είναι μία κοινότητα διαδικτυακής ανταλλαγής εκτυπώσιμων τρισδιάστατων μοντέλων, και έχει σημειώσει μεγάλη εξέλιξη από το 2008, με συνολικά πάνω από 100.000 κοινοποιημένα αρχεία. Αυτή η μεγάλη «αποθήκη» αρχείων και η εύκολη πρόσβαση στους τρισδιάστατους εκτυπωτές, έχουν διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τις κατασκευαστικές/επιδιορθωτικές κοινότητες, μέσω της χρήσης ΠΚ για την επιδιόρθωση και αντικατάσταση εξαρτημάτων για μία μεγάλη ποικιλία προϊόντων (Wilkinson & Core, 2015).

Το «maker movement» για παράδειγμα επιτρέπει την ανοιχτή συνεργασία λογισμικών μέσω τεχνολογιών όπως το Cloud. Αυτή η καινοτομία μπορεί να λειτουργήσει ως μια πηγή γνώσης και δημιουργικότητας για την κυκλική οικονομία, όπως για παράδειγμα τα ανταλλακτικά εξαρτήματα (Peeters et al., 2019). Η εκδημοκράτηση της τεχνολογίας AM, είναι πιθανό μελλοντικά να καταστήσει περιττό τον εκ των προτέρων σχεδιασμό και δημιουργία ανταλλακτικών (Wilkinson & Core, 2015). Η άμεση σύνδεση της ΠΚ με τον ψηφιακό κόσμο επιτρέπει, την άμεση ανταλλαγή πληροφοριών για παραγωγή ανταλλακτικών και επισκευή κατά παραγγελία (Sauerwein et al., 2019). Αυτή η γεωμετρική ελευθερία σχεδιασμού έχει ως αποτέλεσμα ελαφριά κατασκευή, επιτρέποντας σε δύο, τρία, ακόμη και έως 10 μέρη που παραδοσιακά κατασκευάζονται χωριστά να συγχωνευτούν σε ένα μεμονωμένο σχέδιο. Αυτή η ευελιξία παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού της κατανομής δύναμης εντός ενός εξαρτήματος διατηρώντας ταυτόχρονα την πυκνότητα του εξαρτήματος υπό έλεγχο και καθορίζοντας την ποιότητα της μικροδομής. Επιπλέον, η δυνατότητα εκτύπωσης οποιουδήποτε εξαρτήματος κατά απαίτηση σε αποκεντρωμένες τοποθεσίες εξαλείφει την ανάγκη αποθήκευσης ανταλλακτικών που σπάνια χρειάζονται σε όλο τον κόσμο. (French et al., 2019). Η 3D εκτύπωση συμβάλλει στην ευελιξία των παραγωγικών μεθόδων, καθώς προσφέρεται για γρήγορη ανταπόκριση στις παραγγελίες και την παραγωγή μεγάλης ποικιλίας προϊόντων σε μικρές παρτίδες ή ακόμα και μεμονωμένα τεμάχια, αποφεύγοντας την ανάγκη συνεχούς εκ νέου ρύθμισης και έναρξης (set up) των συμβατικών κατασκευαστικών μηχανών. Από οικονομική

άποψη, εξαλείφεται το αποθηκευτικό κόστος των εκ των προτέρων παραγόμενων ανταλλακτικών, καθότι πλέον, το κάθε εξάρτημα θα είναι made to order (Wilkinson & Core, 2015 ; Guo et al., 2020).

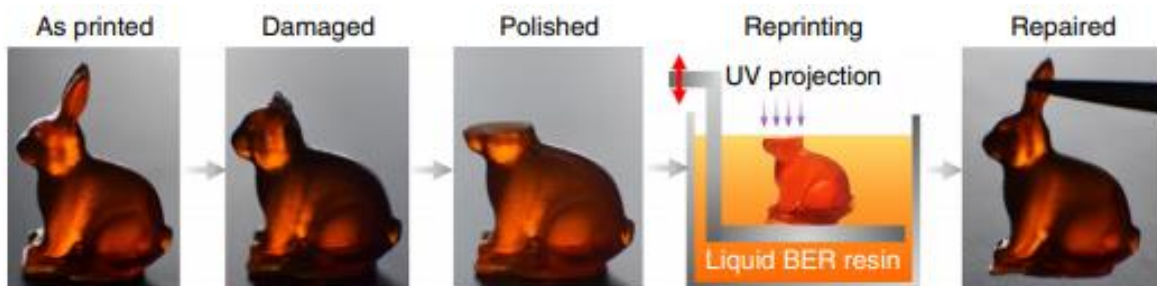
Από την σκοπιά της εφοδιαστικής αλυσίδας λοιπόν, η 3D εκτύπωση αναμένεται να οδηγήσει σε πολλές αλλαγές εκ θεμελίων, όπως μείωση στις αποθηκευτικές ανάγκες, μείωση στις διαδικασίες συναρμολόγησης - αποσυναρμολόγησης, ανταλλακτικά εξαρτήματα κατ'απαίτηση, προσαρμοσμένα – ατομικά αποτελέσματα, αποκεντρωμένα σημεία παραγωγής κοντά στους καταναλωτές, μείωση του εξειδικευμένου, εργαστηριακού εξοπλισμού απαραίτητου για την παραγωγή (Santander et al., 2020 ; Guo et al., 2020). Η αεροναυπηγία είναι από τους βιομηχανικούς τομείς που επωφελούνται σε μεγάλο βαθμό από την χρήση της ΠΚ, καθότι τα ανταλλακτικά εξαρτήματα είναι ακριβά στην παραγωγή. Ο επόμενος τομέας είναι η ναυτιλία, που είναι γνωστό πως τα ανταλλακτικά είναι τεράστιου μεγέθους, και η δυσκολία της συμβατικής παραγωγής τους είναι εμφανής ιδιαίτερα όταν απαιτείται η εκ νέου κατασκευή κάθε φορά για κάθε αστοχία. Επομένως, η βέλτιστη λύση είναι να εφαρμοσθεί η κατάλληλη μέθοδος ΠΚ, ούσα ικανή να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες και τους περιορισμούς της συμβατικής κατασκευής (Rahito et al., 2019). Για παράδειγμα, επιδιόρθωση σε μηχανικά μέρη ενός πλοίου όπως οι στροφαλοφόροι άξονες, πραγματοποιείται με εναπόθεση υλικού στην κυρτή επιφάνεια μέσω της μεθόδου Direct Energy Deposition και επισκευή της κεφαλής του κυλίνδρου (Rahito et al., 2019).

Οι Sauerwein et al. (2019) ανέπτυξαν μια ενδελεχή έρευνα στον τομέα της επιδιόρθωσης για μία βιώσιμη Προσθετική Κατασκευή. Ανάμεσα στα διάφορα ερευνητικά έργα τους, είναι και το «Value Added Repair», που στοχεύει στο να αλλάξει τον τρόπο που παραδοσιακά προσεγγίζεται η επιδιόρθωση. Η διάρκεια ζωής του προϊόντος μεγαλώνει όχι μόνο απλά μέσω της επιδιόρθωσης αλλά και από την προσθήκη επιπλέον λειτουργικότητας. Για παράδειγμα, μία σπασμένη πένσα απέκτησε ενισχυμένη λαβή, ή μία σπασμένη ακτίνα τροχού, απέκτησε θήκη για φακό (βλ. Σχήμα 5-4-11). Αυτή η ευελιξία στην επιδιόρθωση, δίνει τεράστια προστιθέμενη αξία στα προϊόντα, μέσω της Προσθετικής Κατασκευής. Τα ψηφιακά αρχεία μπορούν να προσαρμόζονται ανάλογα την εκάστοτε περίπτωση, και να αποθηκεύονται διαδικτυακά. Το συγκεκριμένο έργο παρουσιάστηκε στην Dutch Design Week το 2015.



Σχήμα 5-4- 112: Αποτελέσματα Έργου 'Επιδιόρθωση προστιθέμενης αξίας' από τους Marcel den Hollander και Conny Bakker, υιοθετημένο από τους Sauerwein et al. (2019)

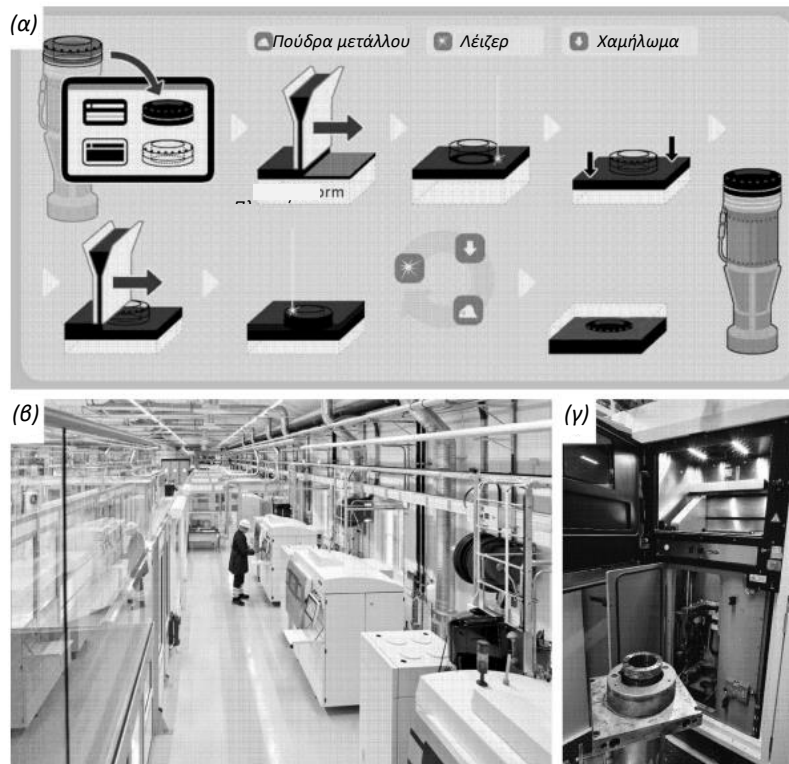
Η έρευνα των Zhang et al. (2018) αναλύει μία στρατηγική δύο βημάτων πολυμερισμού σε θερμοσώματα με στόχο την αναδιαμόρφωση τρισδιάστατων αντικειμένων σε νέο σχήμα, ή την επιδιόρθωση ενός σπασμένου τμήματος του, εκτυπώνοντας απευθείας νέο υλικό πάνω στην κατεστραμμένη επιφάνεια. Στην παραδοσιακή τρισδιάστατη εκτύπωση, όταν ένα αντικείμενο σπάσει είναι αδύνατο να επιδιορθωθεί διότι τα χημικά διασυνδεδεμένα δίκτυα του προϊόντος καταστράφηκαν μόνιμα. Ωστόσο με αυτή την προσέγγιση, τα εκτυπωμένα αντικείμενα είναι επιδιορθώσιμα μέσω της θερμικά ενεργοποιημένης αυτό-αποκατάστασης (thermally activated self-healing). Ως μελέτη περίπτωσης εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη μέθοδος σε ένα ομοίωμα λαγού με σπασμένα αυτιά. Σε πρώτη φάση λειάνθηκε η επιφάνεια για να είναι επίπεδη, και έπειτα μέσω της ΠΚ εκτυπώθηκε πάνω στην επιφάνεια νέο υλικό για το εκ νέου «χτίσιμο» του σπασμένου τμήματος του λαγού. Τέλος, το αντικείμενο θερμάνθηκε για τέσσερις ώρες στους 180°C για να επιτευχθούν οι μηχανικές ιδιότητες που είχε και το γνήσιο (βλ. Σχήμα 5-4-11).



Σχήμα 5-4- 3: Διαδικασία επιδιόρθωσης σπασμένου αντικείμενου, υιοθετημένο από τους Zhang et al. (2018)

Η έρευνα των Walachowicz et al. (2020) είναι μία μελέτη περίπτωσης που αφορά έναν αεροστρόβιλο, όπου το άκρο του καυστήρα είναι κατασκευασμένο από κράμα μετάλλου με βάση το νικέλιο. Αντίθετα με την συμβατική διαδικασία επιδιόρθωσης, μέσω της ΠΚ είναι δυνατό να αφαιρεθεί μόνο η διαλυμένη πλευρά του εξαρτήματος άρα να αποφευχθεί η περαιτέρω σπατάλη υλικού. Αρχικά αφαιρείται το συγκεκριμένο εξάρτημα, και έπειτα πραγματοποιείται η διαδικασία της εκτύπωσης (η πλατφόρμα εργασίας καλύπτεται με ένα φρέσκο στρώμα μεταλλικής πούδρας). Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία κατασκευής, αναρροφάται το πλεόνασμα μεταλλικής σκόνης και καθαρίζονται όλες οι κοιλότητες. Η περισσευούμενη μεταλλική πούδρα πρέπει να συλλεχθεί με προσοχή χωρίς απώλειες και χωρίς να μολυνθεί, για να μην επηρεασθεί η ποιότητα της όταν επαναχρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια, ο επισκευασμένος καυστήρας μπορεί να αφαιρεθεί από το μηχάνημα LBM και προχωρήσει στα τελικά στάδια της διαδικασίας επισκευής του, δηλαδή στίλβωση της επιφάνειας και το γενικό τελείωμα (βλ. Σχήμα 5-4-13). Η Siemens ανέπτυξε αυτήν τη διαδικασία επισκευής με ΠΚ, μέσω εργαστηριακών και επιτόπιων δοκιμών.

Μία άλλη εφαρμογή επιδιόρθωσης που είναι εφικτή μέσω της ΠΚ, παρατέθηκε στην μελέτη των Cupico et al. (2019). Αφορά στην χρήση ανακυκλωμένου υλικού για την διόρθωση επιφανειακών ατελειών, δηλαδή ουσιαστικά πρόκειται για την τελική επένδυση της επιφάνειας (coating) (βλ. Σχήμα 5-4-14). Στην συγκεκριμένη μελέτη, έγινε η διαδικασία σε τέσσερις κατηγορίες επιφανειακών φθορών, (1) οπές στρέβλωσης (2) ημιτελής εναπόθεση υλικού ή μετατόπιση των επιπέδων εκτύπωσης (βλ. Σχήμα 5-4-15α) (3) εφέ «σκάλας» στην επιφάνεια (4) υπερβολικό διάκενο αέρα. Για την επιδιόρθωση αυτών των ατελειών χρησιμοποιήθηκε μία πάστα υλικού από ανακυκλωμένη φύρα έπειτα από μέθοδο FDM (βλ. Σχήμα 5-4-15β). Μέσω αυτής της μεθόδου καθίσταται δυνατή η μείωση της χρήσης υλικών υποστήριξης, επομένως όχι μόνο προάγεται η απευθείας ανακύκλωση των αποβλήτων αλλά έμμεσα, παράγονται λιγότερα.

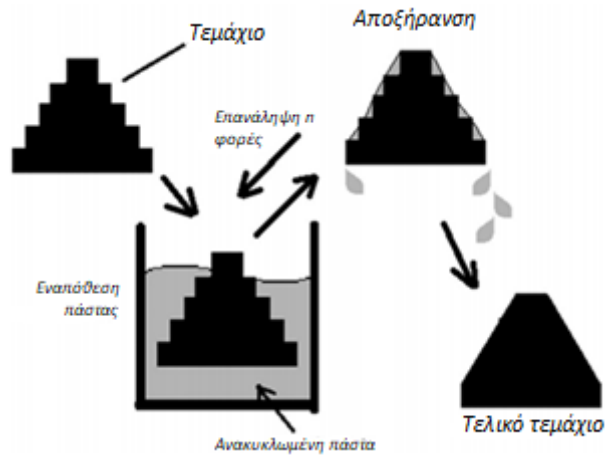


Σχήμα 5-4-13: (α) Προσθετική Κατασκευή και η μέθοδος Powder Bed Fusion για την αντικατάσταση άνω άκρου καυστήρα (β) Βιομηχανικό επίπεδο Προσθετικής Παραγωγής (γ) Το εσωτερικό ενός εκτυπωτή Powder Bed Fusion προσαρμοσμένο για την επιδιόρθωση μέσω ΠΚ, υιοθετημένο από Walachowicz et al. (2020)

Άλλα παραδείγματα, θα αναφερθούν συνοπτικά σε αυτή την παράγραφο. Οι Tur et al. (2019) συμπέραναν πως δευτερογενής, ανακυκλωμένη δηλαδή πρώτη ύλη μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για παράδειγμα για την επισκευή αυτόματων πωλητών αναψυκτικών, στις εσωτερικές δομές αλουμινίου και διάφορα πλαστικά μέρη που εκτυπώνονται σε εκτυπωτή 3D. Οι Lahroug & Brissaud (2018) κατέληξαν πως τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική σκοπιά, η επιδιόρθωση στροβίλων μέσω προσθετικών κατασκευών είναι πιο προνομιούχα από την εκ νέου κατασκευή καινούριων. Ο συνδυασμός μεταλλικής και συνθετικής μικρο/νανο δομής, φαίνεται να είναι ιδανικός για υλικό αντικατάστασης βασικού τμήματος ενός εξαρτήματος. Αυτό επίσης θα οδηγήσει στην μείωση του αντίκτυπου στο περιβάλλον, συμβάλλοντας σε έναν πιο υγιή πληθυσμό (Wilkinson & Core, 2015).

Συμπερασματικά λοιπόν, από τα σπουδαιότερα βήματα στην βιωσιμότητα της Προσθετικής Κατασκευής, είναι η αποδοτικότητα στην κατανάλωση των πόρων και της ενέργειας, η επέκταση της διάρκειας ζωής ενός αντικειμένου, και η υιοθέτηση μικρότερων εφοδιαστικών αλυσίδων, τρεις προσεγγίσεις που ικανοποιούνται πλήρως από την διαδικασία της επιδιόρθωσης και ανακατασκευής (Daraban et al., 2019). Σύμφωνα με Ellen Macarthur foundation, «Οι τεχνικοί κύκλοι ανακτούν και επαναφέρουν προϊόντα, εξαρτήματα και υλικά μέσω στρατηγικών όπως η επαναχρησιμοποίηση, η επιδιόρθωση, η ανακατασκευή, και ως τελευταία λύση, η ανακύκλωση» (Sundqvist & Samarjy, 2019). Ωστόσο, για την ανακύκλωση χρειάζεται να δαπανηθεί νέα, επιπλέον ενέργεια, και η ενέργεια που είναι ήδη δεσμευμένη στο προϊόν, χάνεται (Le et al., 2018). Η ανακατασκευή απαιτεί περίπου το 20-25% της ενέργειας που καταναλώνεται για την αρχική παραγωγή του αντικειμένου. Επομένως, αποτελεί την καλύτερη λύση για την διαχείριση

εξαρτημάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί, έχουν αστοχήσει, ή έχουν φτάσει στο τέλος της ζωής τους (Liu et al., 2019).



Σχήμα 5-4- 14: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας επιδιόρθωσης με την βοήθεια πάστας ανακυκλωμένου υλικού, υιοθετημένο από τους Cunico et al. (2019)



Σχήμα 5-4-15: (α) Παράδειγμα μετατόπισης επιπέδων εκτύπωσης, (β) Επιδιόρθωση αντικειμένου με την προτεινόμενη μέθοδο, από τους Cunico et al. (2019)

6. Μελέτη Περίπτωσης: Έργο Trackplast

Εν συνεχεία της ανωτέρω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, πρόκειται να παρατεθεί μία πρακτική προσέγγιση της έννοιας της Προσθετικής Κατασκευής, στο πλαίσιο του έργου Trackplast που έχει αναλάβει το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και ο τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας, σε συνεργασία με την επιχείρηση «Νερά Κρήτης».

6.1. Τι είναι το έργο Trackplast ;

Το έργο Trackplast, αφορά σε μία καινοτόμα δράση για την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης. Πιο αναλυτικά, το συγκεκριμένο εγχείρημα αποσκοπεί στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την διαχείριση της θαλάσσιας ρύπανσης από πλαστικά απόβλητα, μέσω μίας σειράς μεθοδολογικών εργαλείων και με την υποστήριξη εξειδικευμένης διαδικτυακής πλατφόρμας. Αυτή η πλατφόρμα θα συμβάλλει στην ιχνηλασία των απορριμμάτων και έπειτα, την τροφοδοσία των αποτελεσμάτων προς τους χρήστες του συστήματος.

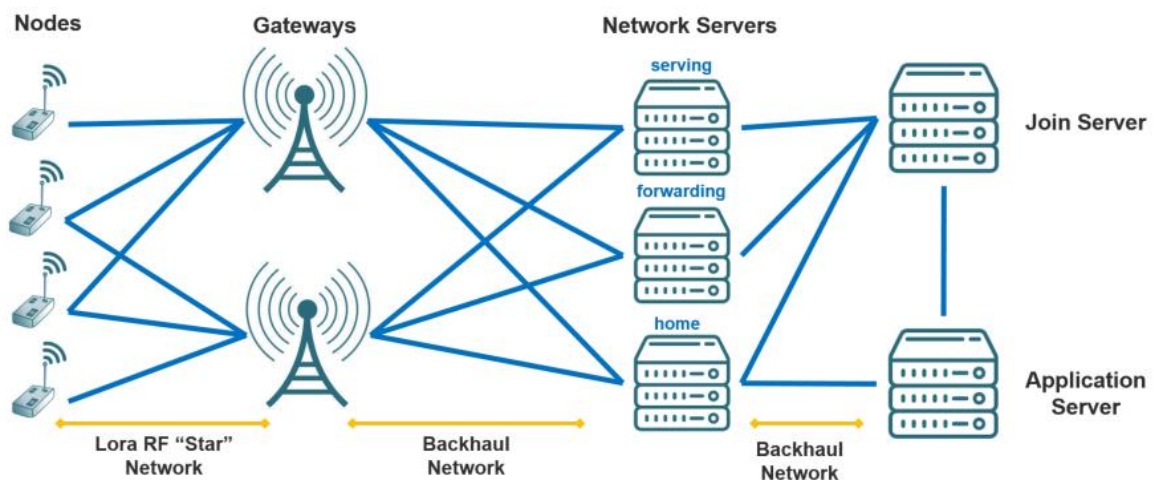
Η διερεύνηση της δυνατότητας προσδιορισμού των χερσαίων πηγών θαλάσσιας μόλυνσης με πλαστικό και η αποτύπωση των διαδρομών των απορριμμάτων ως και την είσοδο τους στη θάλασσα αποτελεί το βασικό αντικείμενο του προτεινόμενου έργου, με απώτερο σκοπό την εξεύρεση λύσεων και τη διερεύνηση προληπτικών μέτρων για την αποτροπή/εκτροπή των πλαστικών από την είσοδο τους στη θάλασσα και την εν γένει μείωση της θαλάσσιας ρύπανσης. Για αυτό το σκοπό το ερευνητικό έργο θα αναπτύξει με τις εργασίες του, μια σειρά από καινοτόμες λύσεις και εφαρμογές βασισμένες σε υφιστάμενες έννοιες, μεθόδους και τεχνολογίες που είναι σε θέση να υποστηρίξουν την καταγραφή και παρακολούθηση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Σκοπός το έργο είναι η ανάπτυξη ενός καινοτόμου μηχανισμού παρακολούθησης, ιχνηλασιμότητας, και καταγραφής του κύκλου ζωής των πλαστικών εμφιαλωμένων δοχείων επιτραπέζιου νερού, από τη παραγωγή τους, στη διάθεσή τους στους καταναλωτές και έπειτα στην απόρριψη τους ως απόβλητο, με στόχο πέρα από τον υπολογισμό του αριθμού τους, την καταγραφή του δρομολογίου τους και τον εντοπισμό των θέσεων απόθεσης τους στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Πολλάριθμοι είναι οι στόχοι που επιδιώκει να επιτύχει το έργο Trackplast, εκτός της παρακολούθησης και ιχνηλασιμότητας της θαλάσσιας ρύπανσης. Αρχικά μέσω των εργασιών του, θα οδηγήσει στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας, της εξωστρέφειας και της παραγωγικότητας των επιχειρήσεων που συμμετέχουν σε αυτό. Επιπροσθέτως, έχει σπουδαία συμβολή στη συνδρομή, στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη καινοτόμων και αποτελεσματικότερων συστημάτων αποτελεσματικής καταγραφής των ποσοτήτων, καθώς και του εντοπισμού των διαφορετικών πηγών της θαλάσσιας ρύπανσης από πλαστικά απορρίμματα. Ακόμα, αποσκοπεί στη διαμόρφωση ενός αναλυτικού επιχειρηματικού σχεδίου για τη βιώσιμη και εμπορικά πετυχημένη εισαγωγή μιας ολοκληρωμένης λύσης, εκμεταλλεύσιμης τόσο στην εγχώρια αλλά και στις διεθνείς αγορές. Τέλος, είναι άξια αναφοράς η αναζήτηση συνεργασιών με παρόμοια προγράμματα του εξωτερικού, όπως π.χ. το έργο PlasticBusters (<http://plasticbusters.unisi.it>) που συντονίζεται από

το Πανεπιστήμιο της Σιένα και στο οποίο από Ελληνικής πλευράς συμμετέχει το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ).

Εκτός από τους μεσοπρόθεσμους στόχους που αναφέρθηκαν ανωτέρω, εξαιρετικής σημασίας είναι και τα επιθυμητά αποτελέσματα σε μακροπρόθεσμη σκοπιά. Πρώτον, η συνδρομή του έργου στην αύξηση της εγχώριας προστιθέμενης αξίας μέσα από την στροφή προς την καινοτόμα επιχειρηματικότητα με επίκεντρο την παραγωγή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, όπως επίσης και η ανάδειξη μέσα από την επιτυχή εκτέλεση του, ως οδηγού για την αποτελεσματική και προστιθέμενης αξίας διασύνδεση της Έρευνας και της Καινοτομίας με την σύγχρονη επιχειρηματικότητα. Παράλληλα, αποσκοπεί στη συμβολή στην εφαρμογή των πολιτικών της ΕΕ, για παράδειγμα της οδηγίας για την επίτευξη καλής περιβαλλοντικής κατάστασης για τις ευρωπαϊκές θάλασσες. Εκτός αυτών, θα οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογικών μεθόδων και διαδικασιών, που έχουν ως στόχο τη βελτίωση της πολιτικών συλλογής ανακύκλωσης στην εφοδιαστική αλυσίδα, τη μείωση της ρύπανσης στις περιφερειακές θαλάσσιες λεκάνες και την αποκατάσταση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Τέλος, δεν θα μπορούσε να παραληφθεί η συμβολή στην αύξηση της ευαισθητοποίησης και της αποδοχής της κοινωνίας των πολιτών, σχετικά με τη σημασία των απαλλαγμένων από ρύπους θαλασσών, με σκοπό τη βελτίωση της καθημερινότητας τους και την προστασία των πολύτιμων φυσικών πόρων.

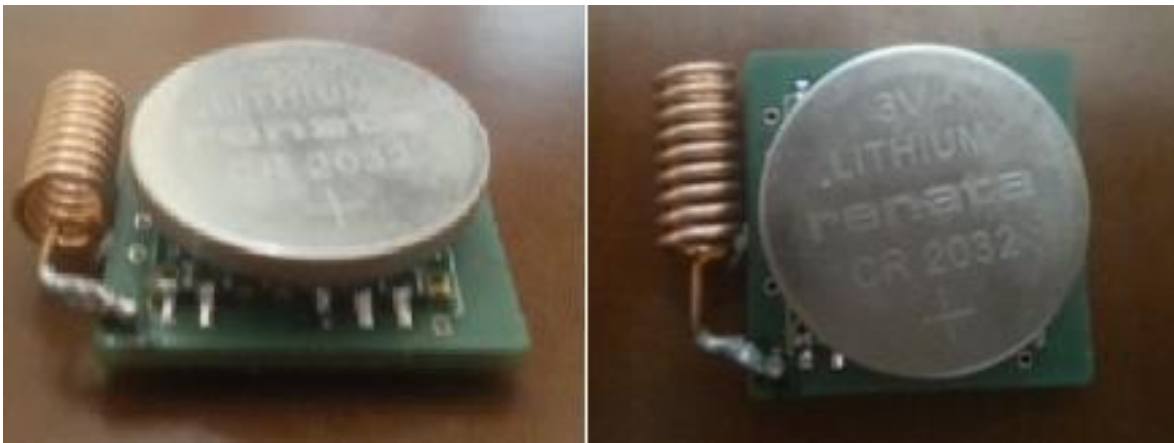
Από πρακτική προσέγγιση, ο τρόπος με τον οποίο δύναται να πραγματοποιηθεί αυτή η ιχνηλασιμότητα των πλαστικών δοχείων, παρατίθεται στη συνέχεια. Πρώτο και σπουδαιότερο βήμα, είναι η κατασκευή του κυκλώματος ενός φορητού πομπού (node), και η παραγωγή πολλαπλών κυκλωμάτων. Αυτός ο πομπός και τα κυκλώματα του έπειτα, χρειάζεται να ενσωματηθούν στα πλαστικά δοχεία νερού, τα οποία με τη σειρά τους θα διατεθούν στην αγορά και θα επιλεχθούν από τους καταναλωτές. Αφότου οι καταναλωτές χρησιμοποιήσουν το κάθε δοχείο, και το απορρίψουν ως μη πλέον ωφέλιμο, ο πομπός ενσωματωμένος στο απόρριμα και μέσω εκπομπής ραδιοκυμάτων, θα δώσει σήμα σε ειδικούς συμβατούς δέκτες, που θα ιχνηλατήσουν τη θέση του. Στην ηλεκτρονική πλατφόρμα επομένως, θα συγκεντρωθούν τα εκάστοτε δεδομένα, θα επεξεργασθούν, και θα οδηγήσουν στα απαραίτητα συμπεράσματα και αποτελέσματα (βλ. Σχήμα 6-1).



Σχήμα 6- 1: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του έργου Trackplast, συγκεκριμένα η εκπομπή σημάτων από τους ηλεκτρονικούς πομπούς προς τους δέκτες, και η συλλογή και ανάλυση των πληροφοριών στις πλατφόρμες.

6.2. Η σύζευξη με τις δυνατότητες της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Όπως είναι άμεσα αντιληπτό από την περιγραφή του έργου και της μεθοδολογίας του μηχανισμού για την ιχνηλασιμότητα, το βασικό αντικείμενο που είναι απαραίτητο για την επίτευξη του εγχειρήματος, είναι ο φορητός πομπός, ο οποίος πρέπει να ενσωματωθεί στο πλαστικό δοχείο. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη για την κατασκευή ενός καλύματος, μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί ο πομπός (βλ. Σχήμα 6-2), και θα δύναται όχι μόνο να το προστατεύει από το νερό του δοχείου, αλλά και φυσικά να μην το εμποδίζει στο να εκπέμπει προς τους ειδικούς δέκτες, καθότι κάτι τέτοιο θα καθιστούσε αδύνατη την λειτουργία του και ανώφελη την χρησιμοποίησή του.



Σχήμα 6- 2: Ο ηλεκτρονικός πομπός του έργου Trackplast, για τον οποίο χρειάζεται να σχεδιαστεί η προστατευτική θήκη

Στο συγκεκριμένο σημείο κρίθηκε εξαιρετικά ωφέλιμη η αξιοποίηση της τεχνολογίας της Προσθετικής Κατασκευής και των δυνατοτήτων που παρέχει, όπως αυτές έχουν ήδη περιγραφθεί στην βιβλιογραφική ανασκόπηση. Το κέλυφος που θα φιλοξενήσει τον ηλεκτρονικό πομπό, λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας που απαιτείται να έχει, είναι ιδανικό για την κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πρόκειται για ένα τεμάχιο που χρειάζεται να είναι πλήρως κλειστό από κάθε εξωτερική πλευρά, αλλά κενό εσωτερικά για την παροχή του απαραίτητου χώρου εγκυβωτισμού του πομπού. Το συνολικό μεγεθός του, καλείται να είναι μικρό ούτως ώστε να μπορεί να προσαρμοσθεί στον πυθμένα του πλαστικού δοχείου.

Επόμενο χαρακτηριστικό που χρήζει μείζονος σημασίας, είναι το υλικό που θα επιλεγεί για αυτή τη θήκη προστασίας του πομπού, το οποίο θα αναλυθεί ενδελεχώς στη συνέχεια.

6.2.1. Επιλεγόμενος Εξοπλισμός και Υλικό

Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και συγκεκριμένα το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών στο εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών, φιλοξενεί το Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού. Το Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού ανήκει στον Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου της σχολής. Η δημιουργία του ξεκίνησε το 1996, ενώ από το έτος 2001 αποτελεί θεσμοθετημένο εργαστήριο του Ε.Μ.Π. και το μοναδικό θεσμοθετημένο εργαστήριο εκπαιδευτικού ιδρύματος της χώρας στην τριτοβάθμια εκπαίδευση

με αντικείμενο τον αντίστροφο μηχανολογικό σχεδιασμό και τις μεθόδους ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων και εργαλείων (rapid prototyping – rapid tooling). Το Εργαστήριο δραστηριοποιείται εκπαιδευτικά, ερευνητικά και παρέχει υπηρεσίες στις περιοχές:

- του Σχεδιασμού Μηχανολογικών Κατασκευών και Προϊόντων με γνώμονα την Ποιότητα, το Κόστος και το Περιβάλλον
- της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing)
- της Διαστασιολογικής και Γεωμετρικής Ακρίβειας των Μηχανολογικών Κατασκευών
- της Ανάλυσης και Σύνθεσης Ανοχών
- της Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Εργαλείων
- του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού

Συγκεκριμένα στην τρισδιάστατη εκτύπωση, το Εργαστήριο συμβάλλει σε αρκετούς τομείς της βιομηχανίας, όπου απαιτείται κατασκευή πρωτοτύπων, κατασκευή εξειδικευμένων εξαρτημάτων όπως βιοϊατρικά εμφυτεύματα, σύνθετα εξαρτήματα για την αεροπορική βιομηχανία, εξαρτήματα και συσκευές βιοϊατρικής τεχνολογίας κ.α, ενώ μέσω του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού και συνδυάζοντας την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής με τις σύγχρονες μεθόδους αποτύπωσης και ψηφιοποίησης επιφανειών, δίνει την δυνατότητα γρήγορης και με ακρίβεια κατασκευής εξαρτημάτων και ανταλλακτικών έτοιμων για χρήση.

Στην συνέχεια θα εξετασθούν οι εναλλακτικές που παρέχει το Εργαστήριο, σχετικά με το διαθέσιμο εξοπλισμό και τους τρισδιάστατους εκτυπωτές διαφορετικής τεχνολογίας. Το σύνολο των μεθόδων Προσθετικής Κατασκευής που διατίθενται προς χρήση, απεικονίζεται στον Πίνακα 6-1 που ακολουθεί.

Πίνακας 6- 1: Οι διαθέσιμοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και τα χαρακτηριστικά τους

Εκτυπωτής ΠΚ	Εταιρεία	Τεχνολογία Διάταξης	Διαστάσεις (mm)	Συμβατά Υλικά
HELISYS 1015	Helisys	LOM	380 x 250 x 360	Δ/Α
Crealty3D Cr10 S5	Crealty 3D	FFF	500 x 500 x 500	ABS, PLA , PETG
Stratasys Forus 360mc	Stratasys	FDM	355 x 254 x 254	ABS plus P430
Anycubic Photon	Anycubic	DLP	120.96 x 68.5 x 150	Φωτοπολυμεριζόμενες Ρητίνες
Nobel Advanced	XYZPrinting	SLA	128 x 128 x 200	Φωτοπολυμεριζόμενες Ρητίνες

Πρώτη παράμετρος που πρέπει να καθορισθεί, είναι η επιλογή του εκτυπωτή, το οποίο ανάγεται σε επιλογή καταλληλότερης μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής. Είναι επιθυμητό η διαδικασία κατασκευής να είναι όσο το δυνατόν πιο φιλική προς το περιβάλλον, ειδάλλως δεν θα είχε νόημα αυτό το εγχείρημα προς την προστασία των θαλασσών από την πλαστική ρύπανση.

Εξετάζοντας τις διαθέσιμες επιλογές, σε πρώτο στάδιο απορρίπτεται ο διάταξη τεχνολογίας LOM. Παρότι είναι μία εξαιρετική μέθοδος για την ταχύτητα της, ειδικά σε ανάγκες μαζικής παραγωγής, η ποιότητα που επιτυγχάνεται στο τελικό αντικείμενο είναι πιο χαμηλή από άλλες μεθόδους, ενώ επίσης οδηγεί συνήθως σε επιφάνειες με τραχύτητα. Το προϊόν που επιζητούμε να κατασκευάσουμε είναι ήδη μικρών διαστάσεων, επομένως αστοχίες στην ποιότητα της επιφανείας και στην τραχύτητα είναι μη αποδεκτές. Εκτός αυτών, η μέθοδος αυτή έχει το μειονέκτημα πως πιθανότατα να μην παράξει καλή ένωση μεταξύ των επιπέδων, ενώ επίσης δεν ενδείκνυται για κοίλες γεωμετρίες.

Επομένως, το δίλλημα βρίσκεται μεταξύ των μεθόδων Material Extrusion (FDM - FFF) και Vat Photopolymerization (DLP & SLA). Έπειτα από ενδελεχή έρευνα και διεξοδική ανάλυση της βιβλιογραφίας, φαίνεται σε αυτό το στάδιο της πειραματικής διαδικασίας να είναι καταλληλότερη η επιλογή της Material Extrusion μεθόδου. Οι τεχνολογίες Vat Photopolymerization είναι αρμόδιες περισσότερο για πλήρως λειτουργικά τεμάχια, σε εφαρμογές όπως η οδοντιατρική και τα κοσμήματα. Επίσης, δεν έχουν μεγάλη ευχαίρεια σχετικά με τα συμβατά υλικά, πράγμα που είναι σημαντικός περιορισμός. Στην πειραματική φάση στην οποία βρίσκεται ο σχεδιασμός του αντικειμένου την παρούσα στιγμή, θεωρείται πιο συνετή η εκτύπωση με τις μεθόδους FDM/FFF. Εκτός αυτού, η μέθοδος SLA χρησιμοποιεί ως υλικό την φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη. Το υλικό αυτό είναι πιο τοξικό από τα κοινά πλαστικά, και ενδέχεται να μην είναι συνετή η χρήση του κοντά στο πόσιμο νερό που προορίζεται για τους καταναλωτές. Επίσης, η ρητίνη δεν έχει μεγάλη αντοχή στην ηλιακή ακτινοβολία, είναι ευαίσθητη αρκετά απέναντι στον ήλιο και επομένως τεμάχια εκτυπωμένα με αυτή την μέθοδο, μετά από έκθεση στον ήλιο μπορεί να λιώσουν, να αλλοιωθεί το σχήμα τους και να καταστραφούν.

Έχοντας επιλέξει την κατά τη γνώμη της συγγραφέως την πιο αρμόζουσα τεχνολογία δηλαδή μία από τις μεθόδους Material Extrusion, επόμενο βήμα είναι να εξετασθεί μία ακόμη εξαιρετικά σημαντική παράμετρος: το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί. Οι επιλογές που διαθέτει το Εργαστήριο της σχολής, είναι: ABS, ABS plus P430, PLA, και PETG (βλ. Πίνακα 6-2). Το επιθυμητό υλικό θα πρέπει να είναι φιλικό προς το περιβάλλον, δηλαδή σε μεγάλο βαθμό και εύκολα ανακυκλώσιμο. Επίσης χρειάζεται να είναι στοιβαρό για να αντέχει την πίεση του νερού χωρίς να διαλυθεί, και φυσικά να είναι αδιάβροχο. Η σημαντική παράμετρος του να μην εμποδίζεται η εμβέλεια του πομπού από το υλικό έχει εκ των πραγμάτων ικανοποιηθεί, καθότι εξετάζουμε πλαστικά και όχι μεταλλικά υλικά.

Πίνακας 6- 2: Τα διαθέσιμα υλικά για την μέθοδο FDM στο εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων, και η ποιοτική σύγκριση μεταξύ τους

Υλικό	ABS	PLA	PETG
Αντοχή σε τάση	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓ ✓
Αντοχή στην ηλιακή ακτινοβολία	✓ ✓ ✓	✓	✓ ✓ ✓
Ευκολία εκτύπωσης	✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓
Ακρίβεια εκτύπωσης	✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓

Το δίλλημα εκ πρώτης άποψης είναι δυσκολό καθότι και τα τρία υλικά έχουν στοιχεία που τα κάνουν να υπερέχουν των υπολοίπων ανάλογα το εκάστοτε κριτήριο. Λόγω της όχι τόσο καλής ευκολίας και ακρίβειας στην εκτύπωση σε σχέση με τα άλλα δύο, το ABS κρίνεται απορριπτέο. Επομένως η σύγκριση είναι ανάμεσα στο PLA και το PETG. Ομολογουμένως, το PLA έχει το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της ακρίβειας στην εκτύπωση, ενώ ταυτόχρονα είναι το πιο φιλικό προς το περιβάλλον υλικό, διότι παράγεται από φυσικά στοιχεία όπως το καλαμπόκι ή το ζαχαροκάλαμο, δηλαδή είναι πλήρως βιοδιασπώμενο. Το PETG ωστόσο αν και όχι βιοδιασπώμενο, είναι 100% ανακυκλώσιμο, πράγμα που μας επιτρέπει την χρήση του στο συγκεκριμένο έργο. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα για το PLA, είναι η πολύ χαμηλή αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες θέρμανσης. Μετά από έρευνα, φαίνεται πως η χρήση του PLA σε εξωτερικό περιβάλλον είναι απαγορευτική, καθώς δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις διάφορες συνθήκες του περιβάλλοντος όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ επίσης έχει ιδιαίτερα χαμηλό σημείο τήξης (από 60°C).

Το PETG επομένως, είναι το υλικό που ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τις απαιτήσεις του έργου. Είναι το πιο στιβαρό εκ των τριών υλικών, με την μεγαλύτερη αντοχή σε άσκηση δυνάμεων και τάσεων. Είναι το ιδανικότερο για χρήση σε εφαρμογές εξωτερικών χώρων και υπό την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς έχει μεγάλη αντοχή και δεν μαλακώνει ή τήκεται. Τέλος, είναι ανακυκλώσιμο 100% επομένως πληροί τις προϋποθέσεις της ευσυνειδησίας προς την προστασία του περιβάλλοντος και της πλαστικής ρύπανσης.

6.2.2. Σχεδιασμός για την ικανοποίηση των προδιαγραφών

Για την ενσωμάτωση του του πομπού στο πλαστικό δοχείο, υπήρχαν δύο εναλλακτικές σκέψεις: η εξωτερική προσκόλληση της θήκης στο κάτω μέρος του δοχείου, και η δημιουργία ενός εσωτερικού, «δεύτερου» πυθμένα, στον οποίο θα τοποθετηθεί η θήκη. Η πιο ασφαλής λύση είναι η δεύτερη, δηλαδή ο πομπός να είναι στο εσωτερικό του δοχείου, καθώς εξασφαλίζεται ότι θα βρίσκεται μόνιμα πάνω στο δοχείο και πολύ δύσκολα θα αποσπασθεί από αυτό, ενώ επίσης όντας στο εσωτερικό του, προστατεύεται από τις διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος όπως η υγρασία. Ο πομπός είναι μια ευαίσθητη ηλεκτρική συσκευή, και χρειάζεται απόλυτη προστασία και προσεχτική διαχείριση, έτσι επιλέγεται η πιο ασφαλής εναλλακτική, δηλαδή η τοποθέτηση του στο εσωτερικό του δοχείου.

Σε αυτό το στάδιο θα καθοριστεί ο σχεδιασμός του καλύματος του ηλεκτρονικού πομπού, για την ικανοποίηση των προδιαγραφών του έργου. Η προκύπτουσα κατασκευή, χρειάζεται να είναι αεροστεγής ούτως ώστε να προφυλλάσει πλήρως τον πομπό στο εσωτερικό της, δηλαδή το νερό του πλαστικού δοχείου να μην διαπερνάει το κάλυμα αυτό, καθότι προφανώς θα κατέστρεφε τον πομπό. Επίσης, είναι απαραίτητο να μην παρεμποδίζεται η εκπομπή ηλεκτρονικών σημάτων για να λειτουργεί επιτυχώς ο πομπός, το οποίο όπως προαναφέρθηκε, ικανοποιείται εκ των πραγμάτων με την επιλογή πλαστικής πρώτης ύλης. Τέλος, είναι πολύ χρήσιμο η κατασκευή να μπορεί εύκολα να αποσυναρμολογηθεί σε περίπτωση ανάγκης εποπτείας του πομπού για κάποιο έλεγχο ή επιδιόρθωση, ή ακόμα και για την αποδέσμευση του πομπού από το ένα κάλυμα και την

χρησιμοποίηση του στο επόμενο. Απο διαστασιολογική άποψη, γνωρίζουμε πως το ελάχιστο δυνατό χωρίο εγκυβωτισμού του πομπού, είναι για διαστάσεις 2,80 x 2,20 x 0,90 εκατοστά (μήκος, πλάτος, ύψος αντίστοιχα). Και φυσικά, καθότι η κατασκευή πρέπει να τοποθετηθεί στο εσωτερικό του πλαστικού δοχείου, δεν γίνεται να ξεπερνάει στο οριζόντιο επίπεδο την διάμετρο του πυθμένα του μπουκαλιού.

Το κλειδί στον σχεδιασμό επομένως, είναι με ποιον τρόπο γίνεται να επιτευχθεί η ιδανικότερη σύζευξη του άνω και του κάτω μέρους της θήκης του πομπού, για την τέλεια συναρμογή που θα αποκλείει την εισχώρηση νερού και θα το κάνει πλήρως αδιάβροχο. Ένας τρόπος, θα ήταν ο κλασικός σχεδιασμός δυό τεμαχίων, και μετά το κούμπωμα τους με βίδες. Είναι η πιο συνηθισμένη και ασφαλής επιλογή, ωστόσο αξίζει να εξεταστούν και άλλες εναλλακτικές.

Η επόμενη σκέψη, ήταν σχετική με μεθόδους θέρμανσης των υλικών. Θα μπορούσαν τα δύο τεμάχια της θήκης, δηλαδή η βάση και το καπάκι, να κατασκευασθούν από διαφορετικά υλικά. Στην ένωση τους, και με τη βοήθεια θέρμανσης, το ένα εκ των δύο με την κατάλληλη διαστολή, θα μπορούσε να «κλειδώσει» με το άλλο, επιτυγχάνοντας μία τέλεια, αεροστεγή συναρμογή. Ωστόσο αυτός ο τρόπος αν και ιδιαίτερα αποτελεσματικός, είναι δύσκολο να επιτευχθεί μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, διότι η ποικιλία των διαθέσιμων συμβατών υλικών, δεν είναι αρκετά μεγάλη για να ικανοποιήσει αυτό το εγχείρημα. Τα περιορισμένα υλικά που έχουμε στην διάθεση μας, στρέφουν την προσοχή μας σε άλλους τρόπους συναρμογής.

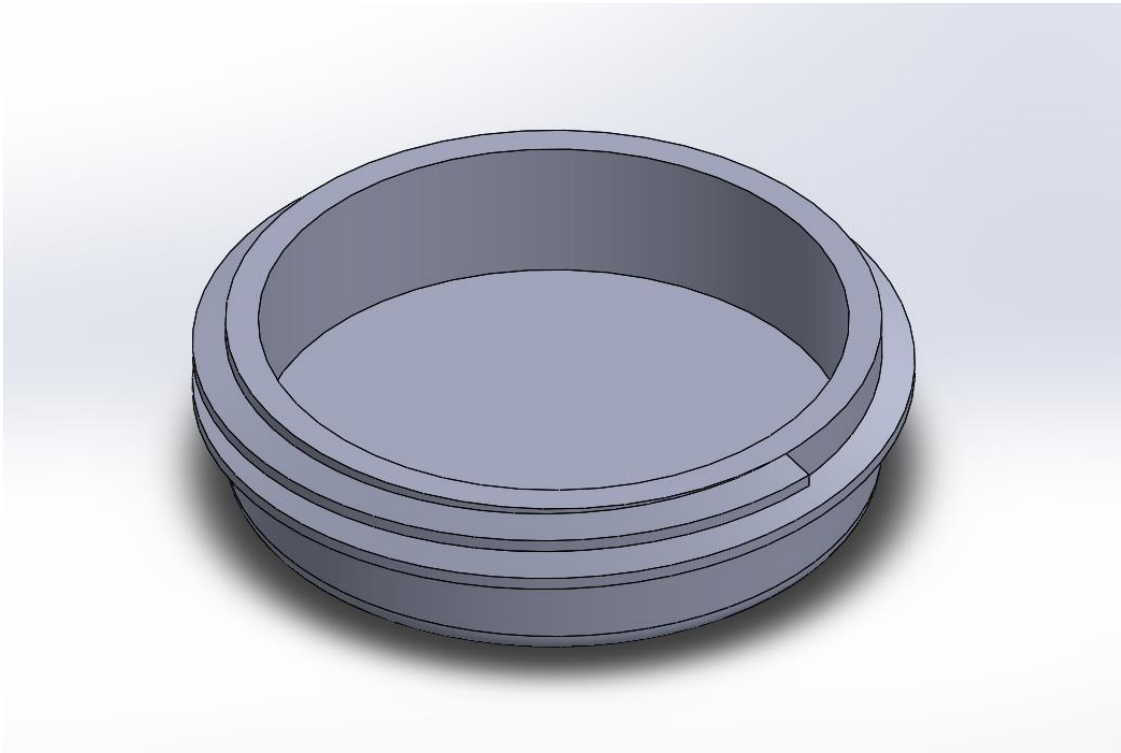
Έπειτα, ένας άλλος τρόπος θα ήταν η παραδοσιακή συγκόλληση της βάσης με το καπάκι. Και πάλι κλασική μέθοδος, που σίγουρα θα εξασφάλιζε με απόλυτη σιγουριά την στεγανοποίηση της θήκης, καθότι εξορισμού είναι τεχνική ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν το αντικείμενο να είναι αδιάβροχο. Ωστόσο, και πάλι θα ήταν δύσκολη η μετέπειτα εποπτεία του εσωτερικού της θήκης, και της επιθεώρησης του πομπού.

Η ιδέα που υπερίσχυσε, ήταν αυτή της κατασκευής ενός μικρού «κουτιού» με σπείρωμα στην εξωτερική πλευρά, και ένα καπάκι που θα βιδώνει σε αυτό. Είναι μία απλή και εύκολη λύση, χωρίς μεγάλες και δύσκολες απαιτήσεις από άποψη σχεδιασμού, που παράλληλα όμως επιβεβαιώνει την ικανότητα άμεσης αποσυναρμολόγησης του καλύματος, αλλά και εξασφαλίζει την στεγανότητα του για την μη – διαρροή του νερού σε αυτό.

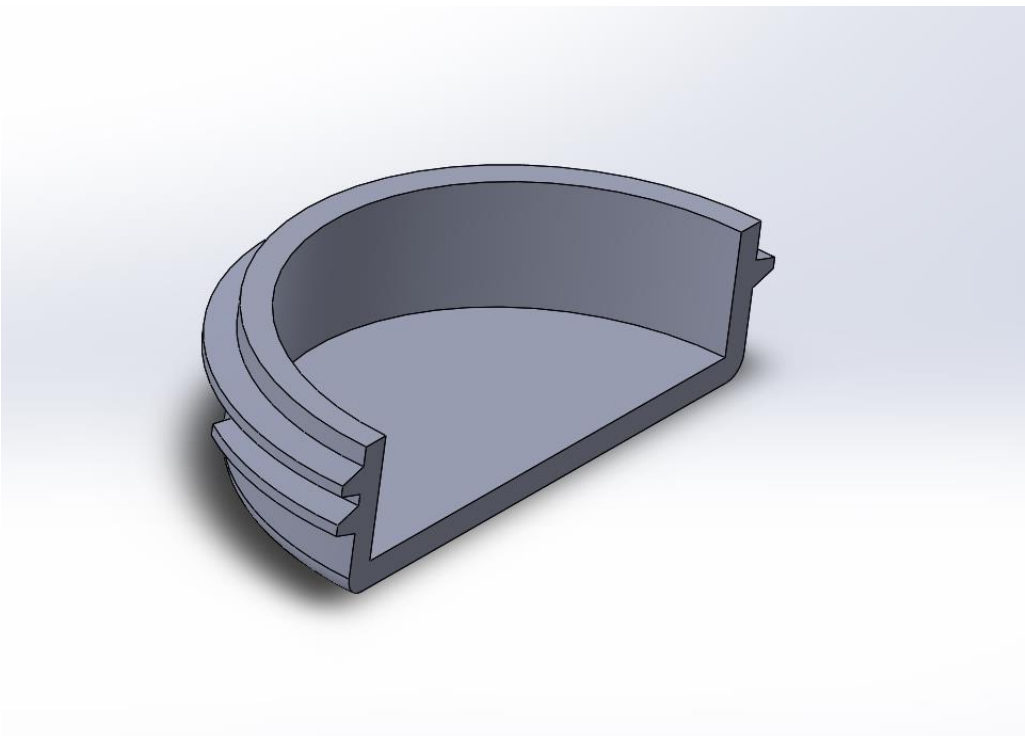
Φυσικά, για να εφαρμοσθεί η σπειρωειδής γεωμετρία πρέπει το αντικείμενο να έχει κυκλική περίμετρο. Με ελάχιστες διαστάσεις εγκυβωτισμού 2,80 x 2,20 x 0,90 εκατοστά, μετά από εύκολους υπολογισμούς, προκύπτει ότι η ακτίνα του κύκλου πρέπει να είναι 1,781 cm, αλλά συμπεριλαμβανομένου του ελάχιστου πάχους για την εκτύπωση του PETG και την εξασφάλιση της αντοχής της κατασκευής απέναντι στην τάση από το νερό, πρέπει να προστεθούν ακόμα 2 χιλιοστά. Επομένως αποφασίζουμε σε πρώτη φάση το αντικείμενο να είναι ένας «κύλινδρος» διαμέτρου 4 εκατοστών και ύψους 1,1 εκατοστού.

Για τον σχεδιασμό του αντικειμένου, επιλέχθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD SolidWorks. Στην συνέχεια παραθέτονται τρισδιάστατα η βάση και το καπάκι, καθώς και η συναρμογή τους.

Βάση

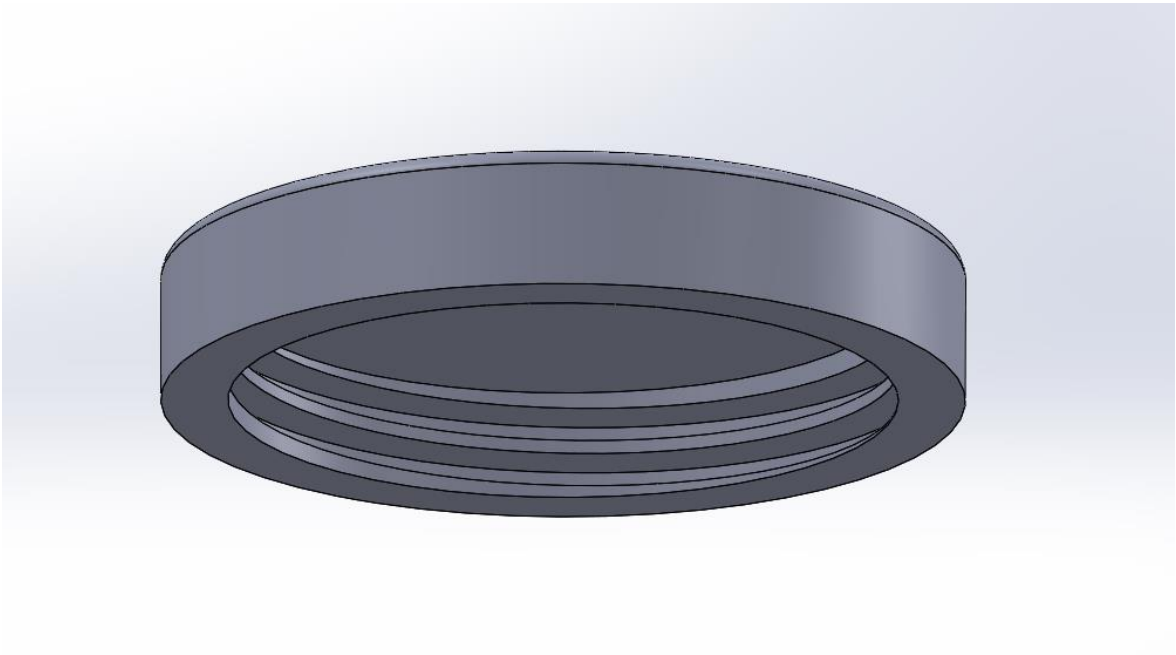


Σχήμα 6- 3: Η βάση της θήκης, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη

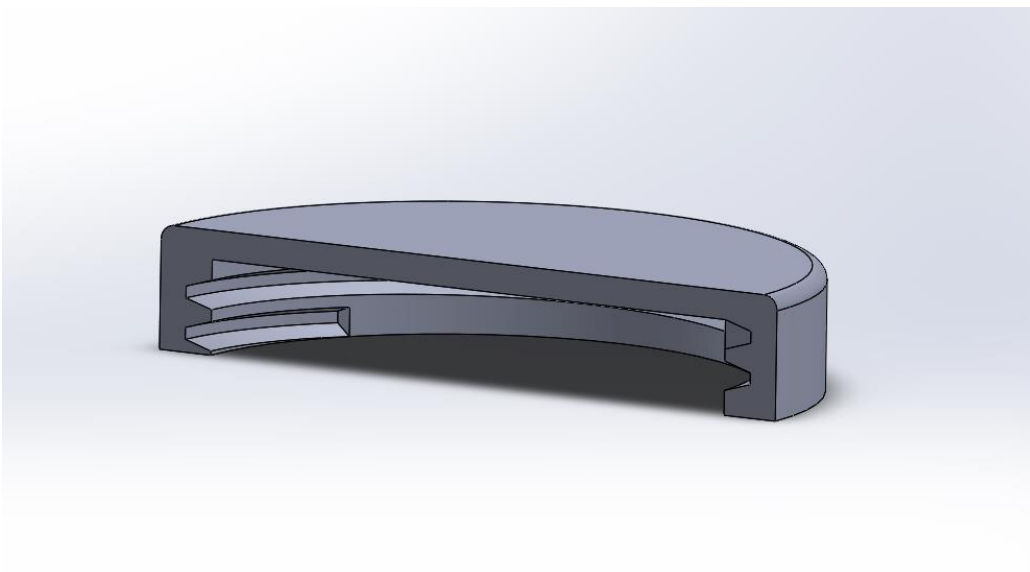


Σχήμα 6- 4: Η βάση της θήκης, σε τομή κατά το κάθετο προς την βάση επίπεδο.

Καπάκι

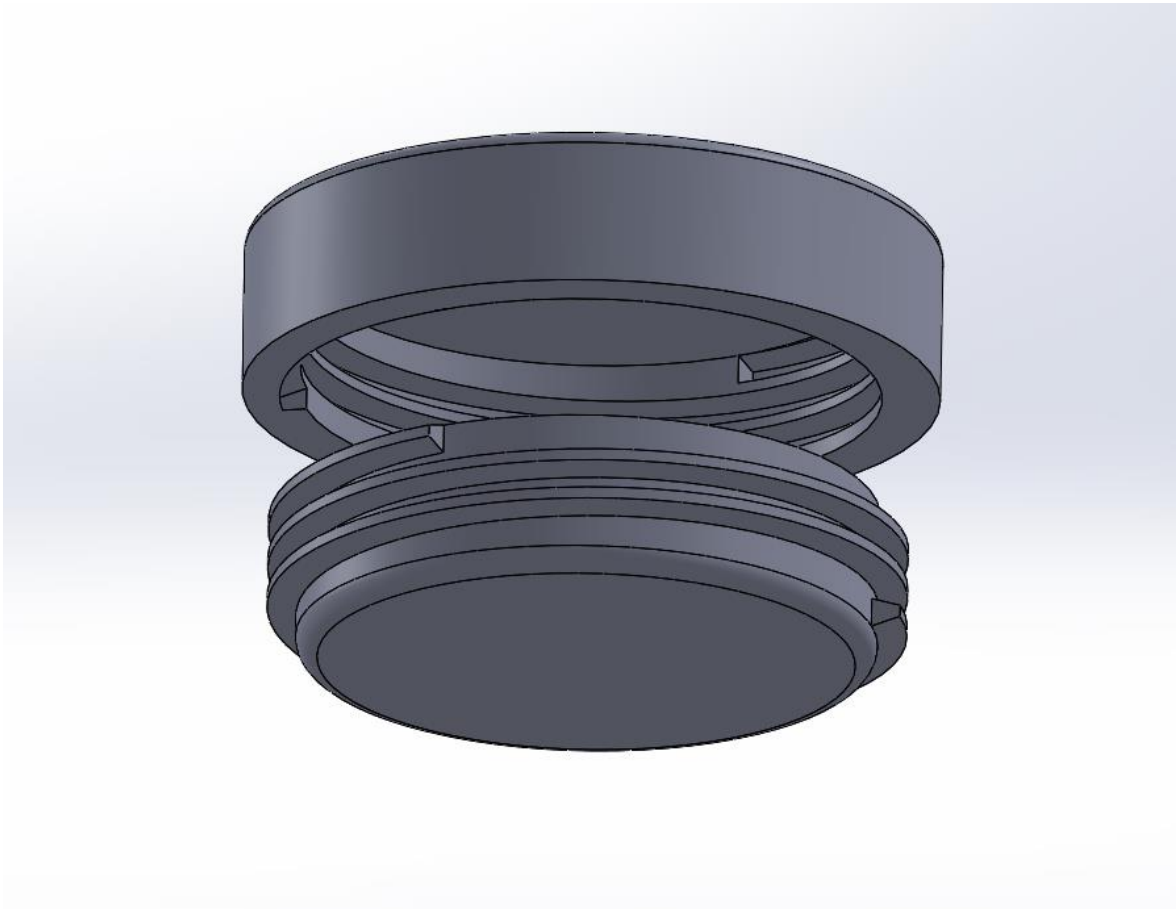


Σχήμα 6- 5: Το καπάκι της θήκης, σε τρισδιάστατη ισομετρική όψη.

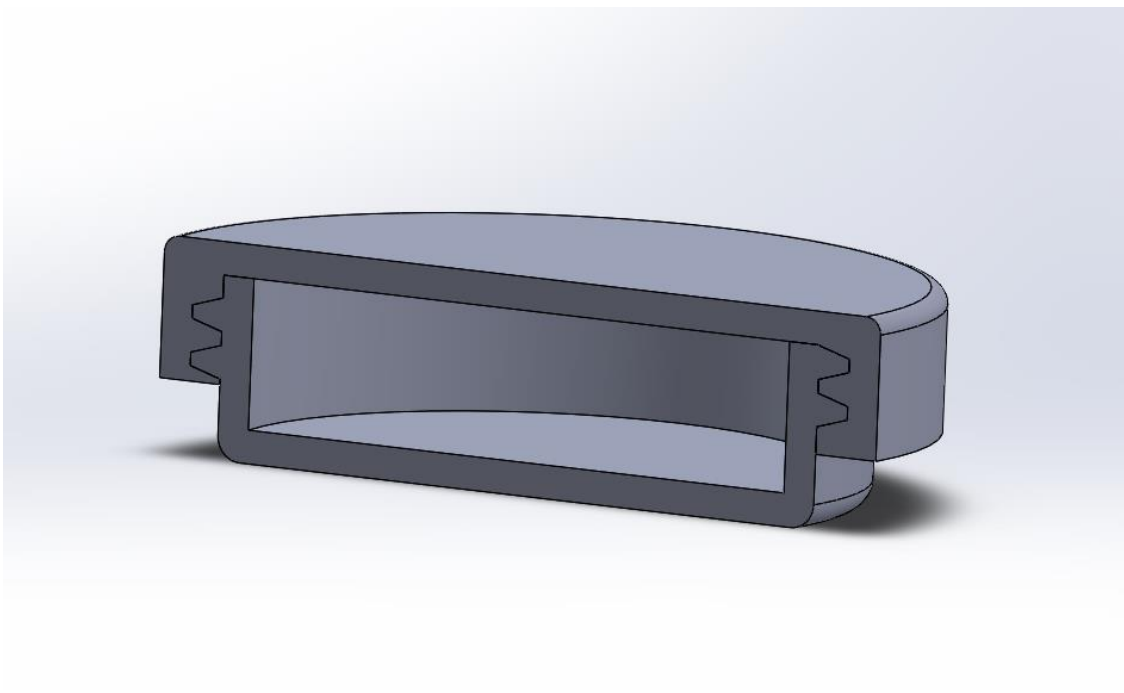


Σχήμα 6- 6: Το καπάκι της όψης σε τομή κατά το κατακόρυφο επίπεδο, για έμφαση στο εσωτερικό σπείρωμα

Συναρμολόγηση της βάσης με το καπάκι



Σχήμα 6- 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση της βάσης και του καπακίου, πριν γίνει η συναρμογή, ισομετρική όψη



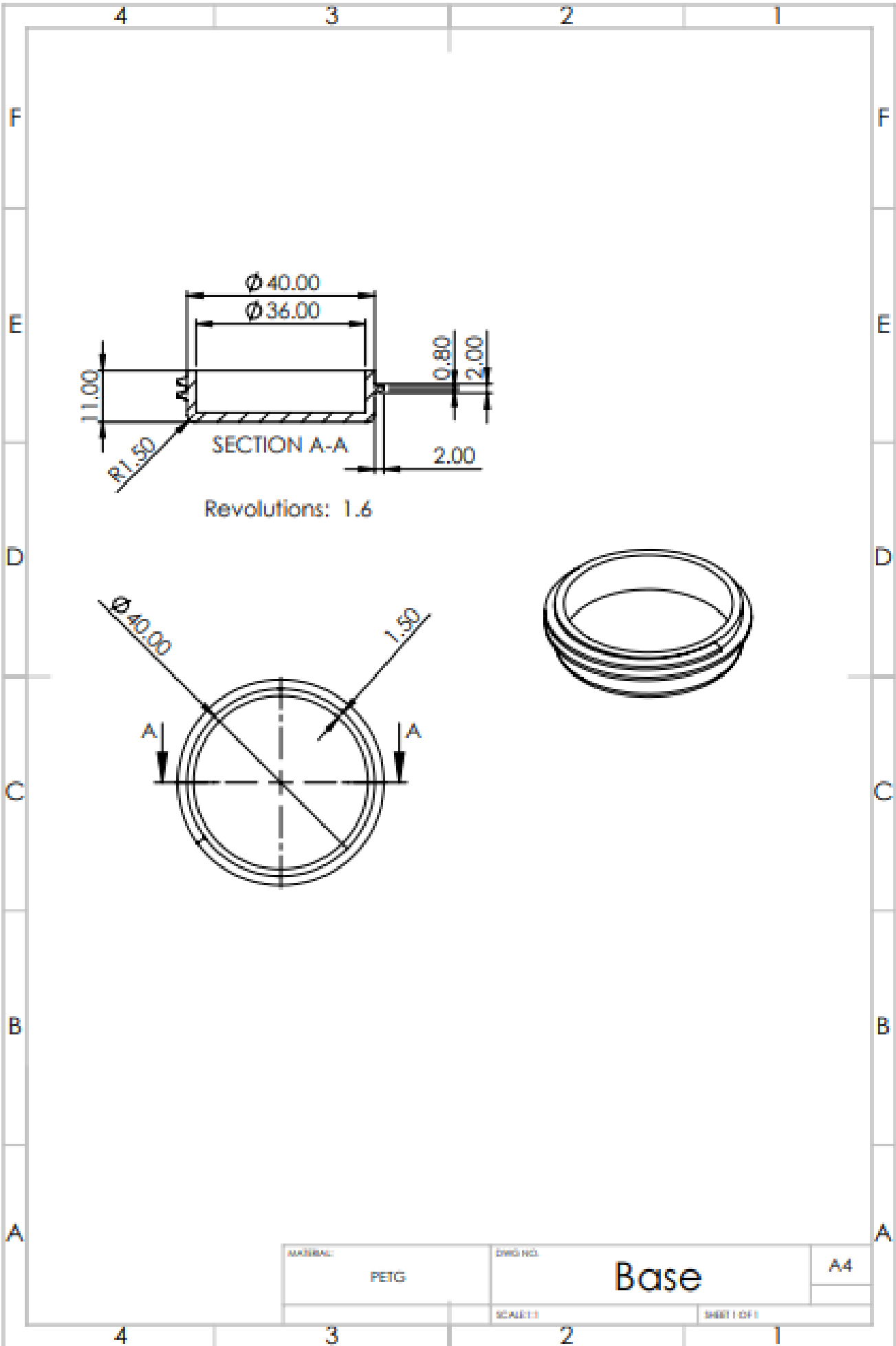
Σχήμα 6- 8: Η συναρμογή των δύο επιμέρους τεμαχίων, σε τομή κατά τον κατακόρυφο άξονα, ισομετρική όψη



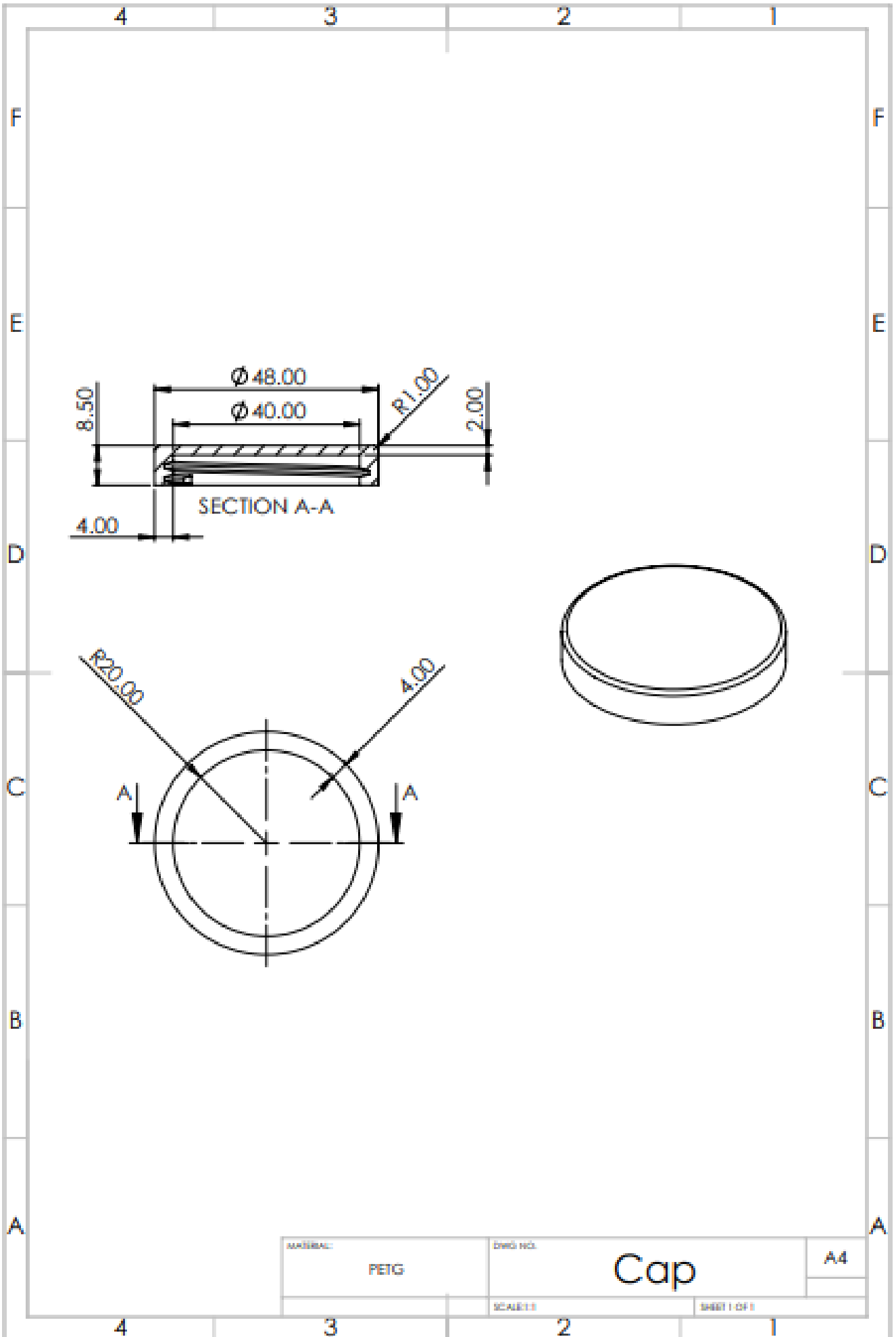
Σχήμα 6- 9: Η συναρμογή των δύο επιμέρους τεμαχίων, σε τομή κατά τον κατακόρυφο άξονα, σε πρόσοψη

Στην συνέχεια ακολουθούν τα πλήρη μηχανολογικά σχέδια των δύο επιμέρους εξαρτημάτων, δηλαδή της βάσης και του καπακιού, με τις αναλυτικές διαστάσεις τους.

Η συνολική διάμετρος της κατασκευής, συμπεριλαμβανομένου του σπειρώματος, είναι 48 χιλιοστά, και χωράει πλήρως στον πυθμένα ενός κλασσικού δοχείου 0,5 λίτρων από τα Νερά Κρήτης. Το εσωτερικό κενό χωρίο εγκυβωτισμού είναι όπως το απαιτούν οι προδιαγραφές, δηλαδή 28 X 21 X 9 χιλιοστά.



MATERIAL:	DESIGN NO.:	Base	A4
PETG			
SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	

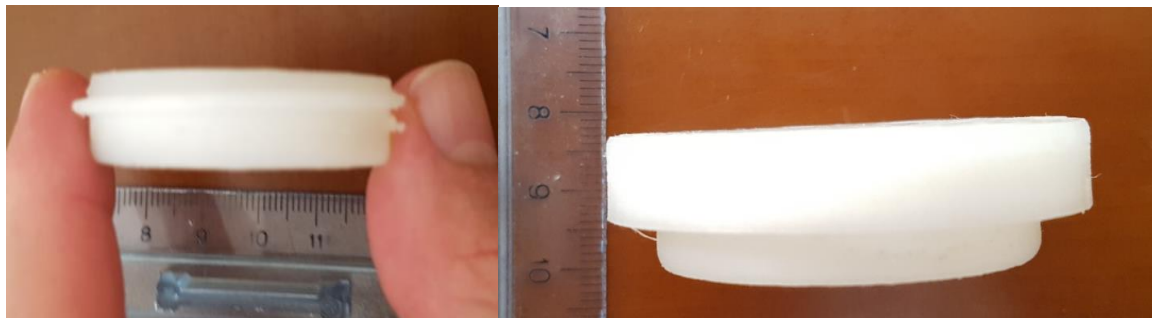


MATERIAL:	DRWG NO.:	Cap	A4
PETG			
	SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1	

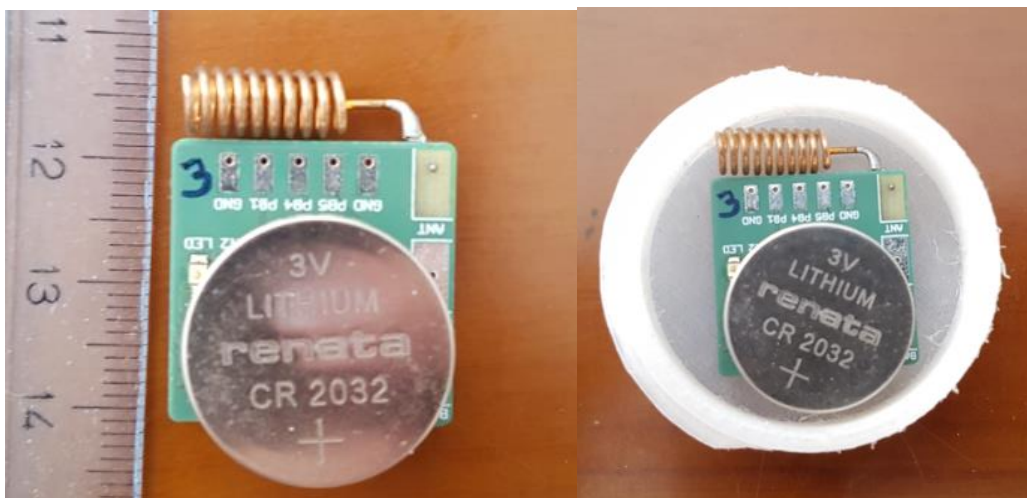
Η εκτύπωση του προτεινόμενου καλύματος του ηλεκτρονικού πομπού πραγματοποιήθηκε με επιτυχία, και στην συνέχεια παραθέτονται οι σχετικές εικόνες του αντικειμένου.



Σχήμα 6- 10: Κάτοψη πώματος θήκης (αριστερά) και βάσης (δεξιά)



Σχήμα 6- 11: Πλάγια όψη της βάσης (αριστερά) και της συναρμογής των δύο επιμέρους τεμαχίων (δεξιά)



Σχήμα 6- 12: Ο ηλεκτρονικός πομπός, εντός και εκτός θήκης



Σχήμα 6- 13: Ο ηλεκτρονικός πομπός στη θήκη του, τοποθετημένος ανάμεσα σε δύο πάτους μπουκαλιού 1,5 λίτρου

Συμπεράσματα

Ανασκοπώντας όσα προαναφέρθηκαν, καθίσταται εμφανές πως η Προσθετική Κατασκευή είναι μια έξυπνη παραγωγική διαδικασία. Τα πλεονεκτήματά της είναι πολυάριθμα, καθότι είναι οικονομική μέθοδος παραγωγής με μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα, αποφεύγοντας την έως τώρα φιλοσοφία της μαζικής παραγωγής “one size fits all”. Δύναται να χρησιμοποιήσει με το βέλτιστο τρόπο την πρώτη ύλη, καταφέροντας το ζητούμενο λειτουργικό αποτέλεσμα με την ελάχιστη κατανάλωση υλικού (βελτιστοποίηση της τοπολογίας). Έτσι ελαχιστοποιεί την κατανάλωση φυσικών πόρων και ενέργειας, μειώνει την παραγωγή αποβλήτων και προάγει την ηθική παραγωγή με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος. Η χρήση της στην Κυκλική Οικονομία είναι αναπόφευκτη λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων που απορρέουν.

Αρχικά, το πλαστικό που είναι κατά κόρον το υλικό με την μεγαλύτερη χρήση στην βιομηχανία και τους εκατομμύρια παραγόμενους τόνους αποβλήτων ετησίως, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες προοπτικές για ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του, ιδιαίτερα με τη χρήση εκτυπωτών Ανοιχτής Πηγής όπως τα RepRaps. Η συνηθέστερη διαδικασία αφορά την συλλογή των πλαστικών απορριμμάτων, τον καθαρισμό και την σύνθλιψη τους σε μικρά κομμάτια, και την εξώθηση τους σε νήμα κατάλληλης διαμέτρου για διαδικασίες Προσθετικής Κατασκευής. Έτσι, ακόμα και οικιακά οι καταναλωτές μπορούν να αξιοποιούν αυτή την τεχνολογία για άμεση ανακύκλωση των απορριμμάτων τους και της προσαρμοσμένη στις ανάγκες τους παραγωγή λειτουργικών αντικειμένων τοπικά. Οι μεγάλες εφοδιαστικές αλυσίδες λοιπόν μετατρέπονται σε κλειστούς βρόγχους παραγωγής, και η κεντροποιημένη ανακύκλωση σε κατανομημένη.

Όσον αφορά στο μέταλλο, ο συνηθέστερος τρόπος αξιοποίησης του είναι μέσω της ανάκτησης της πούδρας που έχει μείνει ανεκμετάλλευτη στο πέρας κάποιας παραγωγικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, στις προσθετικές μεθόδους με βάση την πούδρα, για την παραγωγή ενός αντικειμένου απαιτείται η χρήση πολύ μεγαλύτερης ποσότητας από αυτή που τελικά θα αξιοποιηθεί. Αυτό το υπόλειμμα δύναται να χρησιμοποιηθεί σε επόμενη διαδικασία, φυσικά όχι επ’ άπειρον αλλά για συγκεκριμένο αριθμό αλληπάλληλων επαναχρησιμοποιήσεων. Αυτή η διαδικασία ενδέχεται να επιφέρει μείωση στην ποιότητα που τελικού προϊόντος, για το λόγο αυτό συνίσταται η ανάμειξη της επαναχρησιμοποιούμενης πούδρας με καθαρή πρώτη ύλη, συνήθως κατά ένα ποσοστό 30-50%.

Οι προαναφερθείσες διαδικασίες αξιοποίησης αποβλήτων εφαρμόζονται και σε πληθώρα άλλων υλικών, όπως το καουτσούκ, το λάστιχο, το γυαλί, το σκυρόδεμα, την άμμο, τα ηλεκτρονικά απόβλητα, τους μαγνήτες, το χαρτί, ακόμα και βιολογικά προϊόντα όπως ο καφές, το βαμβάκι, ή το καλαμπόκι. Η τελευταία περίπτωση βιολογικών προϊόντων αναφέρεται στο εξαιρετικά δημοφιλές υλικό PLA, που είναι πλήρως βιοδιασπώμενο καθώς προέρχεται από φυτικές ίνες, ωστόσο συμπεριφέρεται ως θερμοπλαστικό αποδίδοντας εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Εκτός αυτών, σημαντική ευκαιρία αποτελεί ο τομέας των ανταλλακτικών εξαρτημάτων, η ανακατασκευή και η επιδιόρθωση. Οι κυριότερες μέθοδοι της Προσθετικής Κατασκευής που υιοθετούνται για επιδιόρθωση είναι οι Direct Energy Deposition, Fused Deposition Modeling και Powder Bed Fusion. Η μία οπτική για την επιδιόρθωση, είναι η άμεση παρέμβαση μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης απευθείας πάνω στο φθαρμένο ή σπασμένο αντικείμενο, αναπλάθοντας επιτόπου το τμήμα το οποίο έχει καταστραφεί, έτσι αποφεύγεται η απόρριψη του

αντικειμένου και η εκ νέου κατασκευή του. Η άλλη προσέγγιση είναι για τεμάχια συναρμολογημένα από επιμέρους εξαρτήματα. Εάν το ένα εξ αυτών αστοχήσει, αντί να απορριφθεί ολόκληρο το αντικείμενο, μπορεί να αντικατασταθεί μόνο το συγκεκριμένο εξάρτημα μέσω της Προσθετικής Κατασκευής, ιδιαίτερα για ανταλλακτικά που δεν βρίσκονται πλέον στην αγορά ή για επιχειρήσεις που βρίσκονται σε περιοχές όπου η προμήθεια των ζητούμενων εξαρτημάτων είναι δύσκολη ή και ανέφικτη. Τέλος, είναι δυνατή η ανακατασκευή αντικειμένων που όχι μόνο επιδιορθώνει τις αστοχίες τους και τα επαναφέρει στην αρχική τους κατάσταση “as-new”, παρά προσθέτει και επιπλέον λειτουργικότητα μέσω πρόσδοσης χαρακτηριστικών που δεν προϋπήρχαν στον αρχικό σχεδιασμό του αντικειμένου. Αυτό, διότι η προσθετική κατασκευή καθιστά ικανή την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών που η συμβατικές κατεργασίες έως τώρα δεν μπορούσαν να ικανοποιήσουν.

Η λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση ολοκληρώνεται με την πρακτική εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης για τις ανάγκες ενός έργου που έχει αναλάβει ο τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε συνεργασία με την επιχείρηση «Νερά Κρήτης». Το έργο αυτό με όνομα Trackplast, στοχεύει στην μείωση της πλαστικής, θαλάσσιας ρύπανσης, μέσω της τοποθέτησης ηλεκτρονικών πομπών στα πλαστικά δοχεία νερού, για την ιχνηλασιμότητά τους. Δημιουργήθηκε η ανάγκη για την κατασκευή μίας πλαστικής, στοιβαρής θήκης που θα φιλοξενήσει αυτούς τους ηλεκτρονικούς πομπούς, διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία τους, και προστατεύοντας τους από το νερό. Έπειτα από έρευνα στα διαθέσιμα υλικά και τους εκτυπωτές, επιλέχθηκε η μέθοδος Fused Deposition Modeling, και το υλικό PETG, όντας το ιδανικότερο για χρήση σε δύσκολες συνθήκες περιβάλλοντος, υψηλής υγρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και υψηλών απαιτήσεων σε αντοχή και στοιβαρότητα. Ο σχεδιασμός της θήκης έγινε προσδίδοντας στο αντικείμενο σπειρωειδή γεωμετρία, επί της ουσίας δηλαδή κατασκευάστηκε μία βιδωτή θήκη, αποτελούμενη από την βάση (αρσενικό σπείρωμα) και το καπάκι (θηλυκό σπείρωμα). Ο σχεδιασμός αυτός έγινε με γνώμονα την εύκολη εποπτεία του εσωτερικού του, για τον απρόσκοπτο έλεγχο του πομπού ανά πάσα στιγμή, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα πλήρη στεγανοποίηση.

Αποδεικνύεται λοιπόν η σπουδαιότητα και οι εξαιρετικές προοπτικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης ως ένα σύστημα παραγωγής στο πλαίσιο της τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης, που ανοίγει νέους ορίζοντες στα δεδομένα της παραγωγής. Ιδιαίτερα, όταν δύναται να προάγει την υποστήριξη των κυκλικών μοντέλων οικονομίας. Ωστόσο, δεν θα έπρεπε να παραβλεφθούν ορισμένα εμπόδια και κίνδυνοι που αυτή ελλοχεύει και πρέπει να αντιμετωπισθούν. Όπως προαναφέρθηκε, η ποιότητα του υλικού και του παραγόμενου τελικά προϊόντος από διαδικασία ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης, ορισμένες φορές είναι μειωμένη, μη εμπνέοντας εμπιστοσύνη στις βιομηχανίες και ιδιαίτερα εκείνες που έχουν μηδενική άνεση στο ρίσκο (ιατρική, αεροδιαστημική) να την υιοθετήσουν ευρέως. Εκτός από ενέργειες όπως η ανάμειξη ανακυκλωμένου υλικού με αγνές πρώτες ύλες ή άλλα πρόσθετα για ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να βρεθούν λύσεις αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου. Ακόμα, χρειάζεται παραπάνω μελέτη για της παραμέτρους και τις διαδικασίες της λειτουργίας των μεθόδων προσθετικής κατασκευής, για να βελτιστοποιηθούν. Αυτό είναι αναγκαίο για να μειωθούν οι εσφαλμένες εκτυπώσεις λόγω λανθασμένων ρυθμίσεων ή διάφορων επιπλοκών της διαδικασίας, που οδηγούν σε αναίτια παραγωγή αποβλήτων.

Επίσης, είναι ανάγκη για περισσότερη έρευνα πάνω στις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης και τα υλικά που χρησιμοποιεί. Η εκτύπωση με άνω του ενός υλικού στην ίδια

πλατφόρμα εργασίας θα προεκτείνει σε τεράστιο βαθμό τις δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής για παράδειγμα σε εργασίες επιδιόρθωσης και ανακατασκευής. Τέλος, ένα ζήτημα που προτείνεται για μελλοντική έρευνα είναι ο βαθμός στον οποίο η παραγωγή μέσω προσθετικής κατασκευής μπορεί να ικανοποιήσει πλήρως την ζήτηση σε προϊόντα, καθότι εφόσον η μαζική παραγωγή είναι ασύμφορη για την 3D εκτύπωση, υπάρχουν περιορισμοί στην ευρεία υιοθέτηση της.

Πηγές

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

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

<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>

<https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-compare-types-of-3d-printers/>

<https://all3dp.com/2/petg-vs-pla-3d-printing-filaments-compared/>

<https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/guides/how-to-design-plastic-parts-for-assembly>

<https://www.fictiv.com/hwg/design/too-tight-or-perfect-fit-when-to-use-press-fits-in-your-assemblies>

<http://tvaroch.sk/en/petg/>

<https://all3dp.com/2/petg-vs-pla-3d-printing-filaments-compared/>

<https://all3dp.com/2/petg-vs-abs-3d-printing-filaments-compared/>

<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference/>

<https://3dprinting.stackexchange.com/questions/3853/which-is-more-durable-to-sunlight-weather-pla-abs-or-petg>

<https://all3dp.com/2/3d-printing-threads-and-screws-all-you-need-to-know/>

<https://www.wilsontool.com/en-US/Products/Additive/Solv3D/Additive-Thread-Options>

https://www.researchgate.net/publication/331258953_In-Process_Thread_Orientation_Monitoring_in_Additive_Manufacturing

<https://www.researchgate.net/figure/Objects-printed-by-the-helical-spiral-3D-printing-method-Function-fd-x-y-z-ie>

<https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/29/3d-printed-screw-threads-which-material-which-design/>

<https://www.coursehero.com/file/p28v7ou1/LAMINATED-OBJECT-MANUFACTURING-advantages-and-Disadvantages-The-overall/>

Ahmed, F., Ali, U., Sarker, D., Marzbanrad, E., Choi, K., Mahmoodkhani, Y., & Toyserkani, E. (2020). Study of powder recycling and its effect on printed parts during laser powder-bed fusion of 17-4 PH stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116522.

Alkadi, F., Lee, J., Yeo, J. S., Hwang, S. H., & Choi, J. W. (2019). 3D printing of ground tire rubber composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(2), 211-222.

- Altamura, P., & Baiani, S. (2019, January). Superuse and upcycling through design: approaches and tools. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 225, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- Anderson, I. (2017). Mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled polylactic acid. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 4(2), 110-115.
- Ting, A. G. H., Tay, D. Y. W., Annapareddy, A., Li, M., & Tan, M. J. (2018). Effect of recycled glass gradation in 3D cementitious material printing.
- Annapareddy, A., Panda, B., Ting, A. G. H., Li, M., & Tan, M. J. (2018). Flow and mechanical properties of 3D printed cementitious material with recycled glass aggregates.
- Antonov, M., Ivanov, R., Holovenko, Y., Goljandin, D., Rahmaniahranjani, R., Kollo, L., & Hussainova, I. (2019). 3D printing of plain and gradient cermets with efficient use of raw materials. In *Key Engineering Materials* (Vol. 799, pp. 239-245). Trans Tech Publications.
- Baiani, S., & Altamura, P. (2018). Superuse e upcycling dei materiali di scarto in architettura: progetto e sperimentazione. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 16.
- Behm, J. E., Waite, B. R., Hsieh, S. T., & Helmus, M. R. (2018). Benefits and limitations of three-dimensional printing technology for ecological research. *BMC ecology*, 18(1), 32.
- Boparai, K. S., Singh, R., Fabbrocino, F., & Fraternali, F. (2016). Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications. *Composites Part B: Engineering*, 106, 42-47.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., Núñez, P. J., García-Plaza, E., García-Moreno, I., & Reverte, J. M. (2019). Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 181, 107688.
- Chandrasekar, S., Coble, J. B., Yoder, S., Nandwana, P., Dehoff, R. R., Paquit, V. C., & Babu, S. S. (2020). Investigating the effect of metal powder recycling in Electron beam Powder Bed Fusion using process log data. *Additive Manufacturing*, 32, 100994.
- Charles, A., Bassan, P. M., Mueller, T., Elkaseer, A., & Scholz, S. G. (2019, June). On the Assessment of Thermo-mechanical Degradability of Multi-recycled ABS Polymer for 3D Printing Applications. In *International Conference on Sustainable Design and Manufacturing* (pp. 363-373). Springer, Singapore.
- Cholleti, E. R., & Gibson, I. (2018, December). ABS Nano Composite Materials in Additive Manufacturing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 455, No. 1, p. 012038). IOP Publishing.
- Chonga, S., Chiub, H. L., Liaob, Y. C., Hungc, S. T., & Pand, G. T. (2015). Cradle to Cradle® design for 3D printing. *CHEMICAL ENGINEERING*, 45.
- Chong, S., Pan, G. T., Khalid, M., Yang, T. C. K., Hung, S. T., & Huang, C. M. (2017). Physical characterization and pre-assessment of recycled high-density polyethylene as 3D printing material. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(2), 136-145.

- Cisneros-López, E. O., Pal, A. K., Rodriguez, A. U., Wu, F., Misra, M., Mielewski, D. F., ... & Mohanty, A. K. (2020). Recycled poly (lactic acid)–based 3D printed sustainable biocomposites: A comparative study with injection molding. *Materials Today Sustainability*, 7, 100027.
- Clemon, L. M., & Zohdi, T. I. (2018). On the tolerable limits of granulated recycled material additives to maintain structural integrity. *Construction and Building Materials*, 167, 846-852.
- Cordova, L., Campos, M., & Tinga, T. (2019). Revealing the effects of powder reuse for selective laser melting by powder characterization. *Jom*, 71(3), 1062-1072.
- Sanchez, F. A. C., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing*, 17, 87-105.
- Cunico, M. W. M., Kai, D. A., Cavalheiro, P. M., & de Carvalho, J. (2019). Development and characterisation of 3D printing finishing process applying recycled plastic waste. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(1), 37-52.
- Czyżewski, P., Bieliński, M., Sykutera, D., Jurek, M., Gronowski, M., Ryl, Ł., & Hoppe, H. (2018). Secondary use of ABS co-polymer recyclates for the manufacture of structural elements using the FFF technology. *Rapid Prototyping Journal*.
- Damanhuri, A. A. M., Subki, A. S. A., Hariri, A., Tee, B. T., Fauadi, M. H. F. M., Hussin, M. S. F., & Mustafa, M. S. S. (2019, November). Comparative study of selected indoor concentration from selective laser sintering process using virgin and recycled polyamide nylon (PA12). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 373, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- Oros Daraban, A. E., Negrea, C. S., Artimon, F. G., Angelescu, D., Popan, G., Gheorghe, S. I., & Gheorghe, M. (2019). A Deep Look at Metal Additive Manufacturing Recycling and Use Tools for Sustainability Performance. *Sustainability*, 11(19), 5494.
- Dertinger, S. C., Gallup, N., Tanikella, N. G., Grasso, M., Vahid, S., Foot, P. J., & Pearce, J. M. (2020). Technical pathways for distributed recycling of polymer composites for distributed manufacturing: Windshield wiper blades. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104810.
- Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S. J., Garmulewicz, A., ... & Rowley, J. (2017). Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 115, 75-84.
- Domingues, J., Marques, T., Mateus, A., Carreira, P., & Malça, C. (2017). An additive manufacturing solution to produce big green parts from tires and recycled plastics. *Procedia Manufacturing*, 12, 242-248.
- Corcione, C. E., Palumbo, E., Masciullo, A., Montagna, F., & Torricelli, M. C. (2018). Fused Deposition Modeling (FDM): An innovative technique aimed at reusing Lecce stone waste for industrial design and building applications. *Construction and Building Materials*, 158, 276-284.
- Exconde, M. K. J. E., Co, J. A. A., Manapat, J. Z., & Magdaluyo Jr, E. R. (2019). Materials Selection of 3D Printing Filament and Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in a Redesigned Breadboard. *Procedia CIRP*, 84, 28-32.
- Fahim, I. S., Chbib, H., & Farid, A. M. A Study on the Feasibility of Producing Polylactic Acid from Cotton and Coffee Waste in Egypt.

- Fateri, M., Kaouk, A., Cowley, A., Siarov, S., Palou, M. V., González, F. G., ... & Sperl, M. (2018). Feasibility study on additive manufacturing of recyclable objects for space applications. *Additive Manufacturing*, 24, 400-404.
- Feeley, S. R., Wijnen, B., & Pearce, J. M. (2014). Evaluation of potential fair trade standards for an ethical 3-D printing filament. *Journal of Sustainable Development*, 7(5).
- Feng, L., Wang, Y., & Wei, Q. (2019). PA12 Powder Recycled from SLS for FDM. *Polymers*, 11(4), 727.
- French, R., Benakis, M., & Marin-Reyes, H. (2018, July). Process monitoring and industrial informatics for online optimization of Welding Procedure Specifications (WPS) in Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)–Industry 4.0 for robotic additive remanufacturing of aeroengine components. In *2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)* (pp. 812-817). IEEE.
- Fullenwider, B., Kiani, P., Schoenung, J. M., & Ma, K. (2019). From Recycled Machining Waste to Useful Powders for Metal Additive Manufacturing. In *REWAS 2019* (pp. 3-7). Springer, Cham.
- Fullenwider, B., Kiani, P., Schoenung, J. M., & Ma, K. (2019). Two-stage ball milling of recycled machining chips to create an alternative feedstock powder for metal additive manufacturing. *Powder technology*, 342, 562-571.
- Gaikwad, V., Ghose, A., Cholake, S., Rawal, A., Iwato, M., & Sahajwalla, V. (2018). Transformation of E-Waste Plastics into Sustainable Filaments for 3D Printing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 14432-14440.
- Gandha, K., Ouyang, G., Gupta, S., Kunc, V., Paranthaman, M. P., & Nlebedim, I. C. (2019). Recycling of additively printed rare-earth bonded magnets. *Waste Management*, 90, 94-99.
- Garmulewicz, A., Holweg, M., Veldhuis, H., & Yang, A. (2018). Disruptive technology as an enabler of the circular economy: what potential does 3D printing hold?. *California Management Review*, 60(3), 112-132.
- Giurco, D., Littleboy, A., Boyle, T., Fyfe, J., & White, S. (2014). Circular economy: questions for responsible minerals, additive manufacturing and recycling of metals. *Resources*, 3(2), 432-453.
- Gong, H., Xing, X., & Gu, H. (2019, November). Rheological properties of two stainless steel 316L powders for additive manufacturing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 689, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
- Gorji, N. E., O'Connor, R., Mussatto, A., Snelgrove, M., González, P. M., & Brabazon, D. (2019). Recyclability of stainless steel (316 L) powder within the additive manufacturing process. *Materialia*, 8, 100489.
- Gorji, N. E., Saxena, P., Corfield, M., Clare, A., Rueff, J. P., Bogan, J., ... & Raghavendra, R. (2020). A new method for assessing the utility of powder bed fusion (PBF) feedstock. *Materials Characterization*, 161, 110167.
- Gruber, H., Henriksson, M., Hryha, E., & Nyborg, L. (2019). Effect of Powder Recycling in Electron Beam Melting on the Surface Chemistry of Alloy 718 Powder. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(9), 4410-4422.

- Gu, H., Bashir, Z., & Yang, L. (2019). The re-usability of heat-exposed poly (ethylene terephthalate) powder for laser sintering. *Additive Manufacturing*, 28, 194-204.
- Guo, L., Chen, X., Zhang, H., & Zhou, J. (2020). Research on Additive Manufacturing Technology. In *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics* (pp. 937-951). Springer, Singapore.
- Hart, K. R., Frketic, J. B., & Brown, J. R. (2018). Recycling meal-ready-to-eat (MRE) pouches into polymer filament for material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 536-543.
- He, H., Zhan, Z., Zhu, Z., Xue, B., Li, J., Chen, M., & Wang, G. (2020). Microscopic morphology, rheological behavior, and mechanical properties of polymers: Recycled acrylonitrile-butadiene-styrene/polybutylene terephthalate blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(4), 48310.
- He, X., Lei, Z., Zhang, W., & Yu, K. (2019). Recyclable 3D Printing of Polyimine-Based Covalent Adaptable Network Polymers. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(1), 31-39.
- Heiden, M. J., Deibler, L. A., Rodelas, J. M., Koepke, J. R., Tung, D. J., Saiz, D. J., & Jared, B. H. (2019). Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process. *Additive Manufacturing*, 25, 84-103.
- Atsani, S. I., & Mastrisiswadi, H. (2020, January). Recycled Polypropylene Filament for 3D Printer: Extrusion Process Parameter Optimization. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 722, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- Heyer, S., Nishino, N., Muschard, B., & Seliger, G. (2014). Enabling of local value creation via openness for emergent synthesis. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 15(7), 1489-1493.
- Horta, J. F., Simões, F. J. P., & Mateus, A. (2018). Large scale additive manufacturing of eco-composites. *International Journal of Material Forming*, 11(3), 375-380.
- Hu, X., Kang, H., Li, Y., Geng, Y., Wang, R., & Zhang, L. (2017). Preparation, morphology and superior performances of biobased thermoplastic elastomer by in situ dynamical vulcanization for 3D-printed materials. *Polymer*, 108, 11-20.
- Hunt, E. J., Zhang, C., Anzalone, N., & Pearce, J. M. (2015). Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 24-30.
- Idrees, M., Jeelani, S., & Rangari, V. (2018). Three-dimensional-printed sustainable biochar-recycled PET composites. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 13940-13948.
- Juraschek, M., Cerdas, F., Posselt, G., & Herrmann, C. (2017). Experiencing closed loop manufacturing in a learning environment. *Procedia Manufacturing*, 9, 57-64.
- Khazdozian, H. A., Manzano, J. S., Gandha, K., Slowing, I. I., & Nlebedim, I. C. (2018). Recycled Sm-Co bonded magnet filaments for 3D printing of magnets. *AIP Advances*, 8(5), 056722.
- Kozlovsky, K., Schiltz, J., Kreider, T., Kumar, M., & Schmid, S. (2018). Mechanical Properties of Reused Nylon Feedstock for Powder-bed Additive Manufacturing in Orthopedics. *Procedia Manufacturing*, 26, 826-833.

- Kreiger, M. A., Mulder, M. L., Glover, A. G., & Pearce, J. M. (2014). Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. *Journal of Cleaner Production*, 70, 90-96.
- Kumar, R., Singh, R., Ahuja, I. P. S., & Hashmi, M. S. J. (2020). Processing techniques of polymeric materials and their reinforced composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-17.
- Kumar, S., & Czekanski, A. (2017). Development of filaments using selective laser sintering waste powder. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1188-1196.
- Kyzioł, L., Kończewicz, W., & Dynowski, A. (2019). The Analysis of the Possibilities of Using 3D Printer for Making Components and Parts of Marine Equipment for Example Flexible Clutch Coupling. *Journal of KONBiN*, 49(3), 221-239.
- Lahrour, Y., & Brissaud, D. (2018). A technical assessment of product/component re-manufacturability for additive remanufacturing. *Procedia CIRP*, 69, 142-147.
- Lanzotti, A., Martorelli, M., Maietta, S., Gerbino, S., Penta, F., & Gloria, A. (2019). A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP*, 79, 143-146.
- Van Thao, L. E., & MANDIL, H. P. G. (2017). Extraction of features for combined additive manufacturing and machining processes in a remanufacturing context. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing* (pp. 179-189). Springer, Cham.
- Paris, H., & Mandil, G. (2017). Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. *Journal of cleaner production*, 164, 508-523.
- Paris, H., & Mandil, G. (2018). Extracting features for manufacture of parts from existing components based on combining additive and subtractive technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12(2), 525-536.
- Paris, H., & Mandil, G. (2017). Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 243-254.
- Paris, H., & Mandil, G. (2018). The development of a strategy for direct part reuse using additive and subtractive manufacturing technologies. *Additive Manufacturing*, 22, 687-699.
- Lecký, Š., Václav, S., Michal, D., Hrušecký, R., Košťál, P., & Molnár, I. (2019). Assembly Tool Manufacturing and Optimization for Polylactic Acid Additive Manufacturing. In *Materials Science Forum* (Vol. 952, pp. 153-162). Trans Tech Publications.
- Lee, D., Lee, Y., Lee, K., Ko, Y., & Kim, N. (2019). Development and evaluation of a distributed recycling system for making filaments reused in three-dimensional printers. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(2).
- Liu, J., Zheng, Y., Ma, Y., Qureshi, A., & Ahmad, R. (2019). A topology optimization method for hybrid subtractive-additive remanufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-15.

- Löschke, S. K., Mai, J., Proust, G., & Brambilla, A. (2019). Microtimber: The Development of a 3D Printed Composite Panel Made from Waste Wood and Recycled Plastics. In *Digital Wood Design* (pp. 827-848). Springer, Cham.
- Lutter-Günther, M., Bröker, M., Mayer, T., Lizak, S., Seidel, C., & Reinhart, G. (2018). Spatter formation during laser beam melting of AlSi10Mg and effects on powder quality. *Procedia Cirp*, 74, 33-38.
- Lutter-Günther, M., Gebbe, C., Kamps, T., Seidel, C., & Reinhart, G. (2018). Powder recycling in laser beam melting: strategies, consumption modeling and influence on resource efficiency. *Production Engineering*, 12(3-4), 377-389.
- Ma, K., Smith, T., Lavernia, E. J., & Schoenung, J. M. (2017). Environmental sustainability of laser metal deposition: the role of feedstock powder and feedstock utilization factor. *Procedia Manufacturing*, 7, 198-204.
- McIntyre, K., & Ortiz, J. A. (2016). Multinational corporations and the circular economy: how Hewlett Packard scales innovation and technology in its global supply chain. In *Taking Stock of Industrial Ecology* (pp. 317-330). Springer, Cham.
- Melugiri-Shankaramurthy, B., Sargam, Y., Zhang, X., Sun, W., Wang, K., & Qin, H. (2019). Evaluation of cement paste containing recycled stainless steel powder for sustainable additive manufacturing. *Construction and Building Materials*, 227, 116696.
- Mohammed, M. I., Wilson, D., Gomez-Kervin, E., Rosson, L., & Long, J. (2018, November). EcoPrinting: Investigation of Solar Powered Plastic Recycling and Additive Manufacturing for Enhanced Waste Management and Sustainable Manufacturing. In *2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)* (pp. 1-6). IEEE.
- Mohammed, M. I., Wilson, D., Gomez-Kervin, E., Tang, B., & Wang, J. (2019). Investigation of closed-loop manufacturing with acrylonitrile butadiene styrene over multiple generations using additive manufacturing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(16), 13955-13969.
- Morsidi, M., Mativenga, P. T., & Fahad, M. (2019). Fused Deposition Modelling Filament with Recyclate Fibre Reinforcement. *Procedia CIRP*, 85, 353-358.
- Mosaddek, A., Kommula, H. K., & Gonzalez, F. (2018, June). Design and testing of a recycled 3D printed and foldable unmanned aerial vehicle for remote sensing. In *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1207-1216). IEEE.
- Nascimento, D. L. M., Alencastro, V., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., Garza-Reyes, J. A., Rocha-Lona, L., & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Paciorek-Sadowska, J., Borowicz, M., & Isbrandt, M. (2019). New Poly (lactide-urethane-isocyanurate) Foams Based on Bio-Polylactide Waste. *Polymers*, 11(3), 481.
- Pavlo, S., Fabio, C., Hakim, B., & Mauricio, C. (2018, June). 3D-Printing Based Distributed Plastic Recycling: A Conceptual Model for Closed-Loop Supply Chain Design. In *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-8). IEEE.
- Peeters, B., Kiratli, N., & Semeijn, J. (2019). A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118313.

- Peng, T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C., & Chen, G. (2018). Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing*, 21, 694-704.
- Pitt, K., Lopez-Botello, O., Lafferty, A. D., Todd, I., & Mumtaz, K. (2017). Investigation into the material properties of wooden composite structures with in-situ fibre reinforcement using additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 138, 32-39.
- Popov Jr, V. V., Katz-Demyanetz, A., Garkun, A., & Bamberger, M. (2018). The effect of powder recycling on the mechanical properties and microstructure of electron beam melted Ti-6Al-4 V specimens. *Additive Manufacturing*, 22, 834-843.
- Quetzeri-Santiago, M. A., Hedegaard, C. L., & Castrejón-Pita, J. R. (2019). Additive Manufacturing with Liquid Latex and Recycled End-of-Life Rubber. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(3), 149-157.
- Quintana, O. A., Alvarez, J., Mcmillan, R., Tong, W., & Tomonto, C. (2018). Effects of reusing Ti-6Al-4V powder in a selective laser melting additive system operated in an industrial setting. *JOM*, 70(9), 1863-1869.
- Rahimizadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K., & Lessard, L. (2019). Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107101.
- Rahimizadeh, A., Kalman, J., Henri, R., Fayazbakhsh, K., & Lessard, L. (2019). Recycled Glass Fiber Composites from Wind Turbine Waste for 3D Printing Feedstock: Effects of Fiber Content and Interface on Mechanical Performance. *Materials*, 12(23), 3929.
- Wahab, D. A., & Azman, A. H. (2019). Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives. *Processes*, 7(11), 802.
- Reich, M. J., Woern, A. L., Tanikella, N. G., & Pearce, J. M. (2019). Mechanical properties and applications of recycled polycarbonate particle material extrusion-based additive manufacturing. *Materials*, 12(10), 1642.
- Romero-Alva, V., Alvarado-Diaz, W., & Roman-Gonzalez, A. (2018, August). Design of a 3D Printer and Integrated Supply System. In 2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) (pp. 1-4). IEEE.
- Santander, P., Sanchez, F. A. C., Boudaoud, H., & Camargo, M. (2020). Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104531.
- Santecchia, E., Spigarelli, S., & Cabibbo, M. (2020). Material Reuse in Laser Powder Bed Fusion: Side Effects of the Laser—Metal Powder Interaction. *Metals*, 10(3), 341.
- Sauerwein, M., Doubrovski, E., Balkenende, R., & Bakker, C. (2019). Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 226, 1138-1149.
- Sauerwein, M., & Doubrovski, E. L. (2018). Local and recyclable materials for additive manufacturing: 3D printing with mussel shells. *Materials Today Communications*, 15, 214-217.

- Sibisi, P. N., Arthur, N. K. K., & Pityana, S. L. (2020). Review on direct metal laser deposition manufacturing technology for the Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-16.
- Sillani, F., Kleijnen, R. G., Vetterli, M., Schmid, M., & Wegener, K. (2019). Selective laser sintering and multi jet fusion: Process-induced modification of the raw materials and analyses of parts performance. *Additive Manufacturing*, 27, 32-41.
- Singh, A. K., Patil, B., Hoffmann, N., Saltonstall, B., Doddamani, M., & Gupta, N. (2018). Additive manufacturing of syntactic foams: Part 1: development, properties, and recycling potential of filaments. *JOM*, 70(3), 303-309.
- Singh, N., Singh, R., & Ahuja, I. P. S. (2018). Recycling of polymer waste with SiC/Al₂O₃ reinforcement for rapid tooling applications. *Materials Today Communications*, 15, 124-127.
- Singh, R., Singh, H., Farina, I., Colangelo, F., & Fraternali, F. (2019). On the additive manufacturing of an energy storage device from recycled material. *Composites Part B: Engineering*, 156, 259-265.
- Singh, R., Singh, J., & Singh, S. (2016). Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament. *Measurement*, 78, 253-259.
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Gupta, M. K. (2017). Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review. *Journal of cleaner production*, 168, 1230-1243.
- Stephen, O., Okonkwo, E., & Ogbonna, J. (2018, August). Completing the Value Chain for Plastic Recyclers in Nigeria: An Integration of Renewable Solar and Conventional Gas Energy Sources for Fuel Production. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Stolz, B., & Mülhaupt, R. (2020). Cellular, Mineralized, and Programmable Cellulose Composites Fabricated by 3D Printing of Aqueous Pastes Derived from Paper Wastes and Microfibrillated Cellulose. *Macromolecular Materials and Engineering*, 305(4), 1900740.
- Sundqvist, J., & Samarjy, R. S. (2019). High-speed imaging of droplet behaviour during the CYCLAM drop-deposition technique. *Procedia Manufacturing*, 36, 208-215.
- Sutton, A. T., Kriewall, C. S., Karnati, S., Leu, M. C., & Newkirk, J. W. (2020). Characterization of AISI 304L stainless steel powder recycled in the laser powder-bed fusion process. *Additive Manufacturing*, 32, 100981.
- Teixeira, G., Bremm, L., & dos Santos Roque, A. (2018, November). Educational Robotics Insertion in High Schools to Promote Environmental Awareness about E-Waste. In *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)* (pp. 591-597). IEEE.
- Thibaut, C., Denneulin, A., Du Roscoat, S. R., Beneventi, D., Orgéas, L., & Chaussy, D. (2019). A fibrous cellulose paste formulation to manufacture structural parts using 3D printing by extrusion. *Carbohydrate polymers*, 212, 119-128.
- Tian, X., Liu, T., Wang, Q., Dilmurat, A., Li, D., & Ziegmann, G. (2017). Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Journal of cleaner production*, 142, 1609-1618.

- Ting, G. H. A., Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(4), 994-1003.
- Tur, A. I., Kokoulin, A. N., Yuzhakov, A. A., Polygalov, S. V., Troegubov, A. S., & Korotaev, V. N. (2019, August). Beverage Container Collecting Machine Project. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 317, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- Turku, I., Kasala, S., & Kärki, T. (2018). Characterization of Polystyrene Wastes as Potential Extruded Feedstock Filament for 3D Printing. *Recycling*, 3(4), 57.
- Turner, C., Moreno, M., Mondini, L., Salonitis, K., Charnley, F., Tiwari, A., & Hutabarat, W. (2019). Sustainable production in a circular economy: a business model for re-distributed manufacturing. *Sustainability*, 11(16), 4291.
- Ujeniya, P. S., & Rachchh, N. V. (2019, November). A review on Manufacturing, Machining, and recycling of 3D printed composite materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 653, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.
- Voet, V. S., Strating, T., Schnelting, G. H., Dijkstra, P., Tietema, M., Xu, J., ... & Folkersma, R. (2018). Biobased acrylate photocurable resin formulation for stereolithography 3D printing. *ACS omega*, 3(2), 1403-1408.
- Walachowicz, F., Bernsdorf, I., Papenfuss, U., Zeller, C., Graichen, A., Navrotsky, V., ... & Kiener, C. (2017). Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S203-S215.
- Wang, L., Kiziltas, A., Mielewski, D. F., Lee, E. C., & Gardner, D. J. (2018). Closed-loop recycling of polyamide12 powder from selective laser sintering into sustainable composites. *Journal of Cleaner Production*, 195, 765-772.
- Wilkinson, S., & Cope, N. (2015). 3D printing and sustainable product development. In *Green Information Technology* (pp. 161-183). Morgan Kaufmann.
- Woern, A. L., Byard, D. J., Oakley, R. B., Fiedler, M. J., Snabes, S. L., & Pearce, J. M. (2018). Fused particle fabrication 3-D printing: Recycled materials' optimization and mechanical properties. *Materials*, 11(8), 1413.
- Woern, A. L., McCaslin, J. R., Pringle, A. M., & Pearce, J. M. (2018). RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. *HardwareX*, 4, e00026.
- Wu, H. (2019). Education for Environment Sustainability: 3D Printing's Role in Transformation of Plastic Industry. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 10(3).
- Wu, H., Wu, R. (2019). The role of educational action research of recycling process to the green technologies, environment engineering, and circular economies. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-2, July 2019
- Xu, C., Wu, Q., L'Espérance, G., Lebel, L. L., & Therriault, D. (2018). Environment-friendly and reusable ink for 3D printing of metallic structures. *Materials & Design*, 160, 262-269.

- Zakirov, N., & Tyagunin, A. (2019, December). The hardware-software complex for the processing of plastic waste to the filament for a 3D printer. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2174, No. 1, p. 020272). AIP Publishing LLC.
- Zander, N. E., Gillan, M., Burckhard, Z., & Gardea, F. (2019). Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials. *Additive Manufacturing*, 25, 122-130.
- Zander, N. E., Park, J. H., Boelter, Z. R., & Gillan, M. A. (2019). Recycled Cellulose Polypropylene Composite Feedstocks for Material Extrusion Additive Manufacturing. *ACS omega*, 4(9), 13879-13888.
- Zapico, P., Giganto, S., Barreiro, J., & Martínez-Pellitero, S. (2019). Characterisation of 17-4PH metallic powder recycling to optimise the performance of the selective laser melting process. *Journal of Materials Research and Technology*.
- Zhang, B., Kowsari, K., Serjouei, A., Dunn, M. L., & Ge, Q. (2018). Reprocessable thermosets for sustainable three-dimensional printing. *Nature communications*, 9(1), 1-7.
- Zhao, P., Rao, C., Gu, F., Sharmin, N., & Fu, J. (2018). Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1046-1055.
- Zhong, S., & Pearce, J. M. (2018). Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 48-58.
- Albar, A., Swash, M. R., & Ghaffar, S. (2019, October). The Design and Development of an Extrusion System for 3D Printing Cementitious Materials. In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-5). IEEE.
- Auth, C., Arndt, A., & Anderl, R. (2018, July). Development of a concept for a holistic knowledge-based additive manufacturing over the entire lifecycle. In IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (pp. 726-735). Springer, Cham.
- Math, R. K., Goutham, R., & Prasad, K. S. (2018, February). Study of Effects on Mechanical Properties of PLA Filament which is blended with Recycled PLA Materials. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 310, No. 1, p. 012103). IOP Publishing.
- Bedi, P., Singh, R., & AHUJA, I. (2019). Investigations for machinability of primary recycled thermoplastics with secondary recycled rapid tooling. *Sādhanā*, 44(10), 210.
- Byard, D. J., Woern, A. L., Oakley, R. B., Fiedler, M. J., Snabes, S. L., & Pearce, J. M. (2019). Green fab lab applications of large-area waste polymer-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 515-525.
- Caminero, M. Á., Chacón, J. M., García-Plaza, E., Núñez, P. J., Reverte, J. M., & Becar, J. P. (2019). Additive Manufacturing of PLA-Based Composites Using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture. *Polymers*, 11(5), 799.
- Carrion, P. E., Soltani-Tehrani, A., Phan, N., & Shamsaei, N. (2019). Powder recycling effects on the tensile and fatigue behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *JOM*, 71(3), 963-973.

- Chen, P., Wu, H., Zhu, W., Yang, L., Li, Z., Yan, C., ... & Shi, Y. (2018). Investigation into the processability, recyclability and crystalline structure of selective laser sintered Polyamide 6 in comparison with Polyamide 12. *Polymer Testing*, 69, 366-374.
- Chen, X. X., Tzeng, S. J., & Wang, W. C. (2020). Numerical and experimental observations of the flow field inside a selective laser melting (SLM) chamber through computational fluid dynamics (CFD) and particle image velocimetry (PIV). *Powder Technology*, 362, 450-461.
- Chong, S., Yang, T. C. K., Lee, K. C., Chen, Y. F., Juan, J. C., Tiong, T. J., ... & Pan, G. T. (2020). Evaluation of the physico-mechanical properties of activated-carbon enhanced recycled polyethylene/polypropylene 3D printing filament. *Sādhanā*, 45(1), 1-6.
- Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104583.
- Dunnigan, R., Clemens, J., Cavalli, M. N., Kaabouch, N., & Gupta, S. (2018). Beneficial usage of recycled polymer particulates for designing novel 3D printed composites. *Progress in Additive Manufacturing*, 3(1-2), 33-38.
- Gantenbein, S., Masania, K., Woigk, W., Sesseg, J. P., Tervoort, T. A., & Studart, A. R. (2018). Three-dimensional printing of hierarchical liquid-crystal-polymer structures. *Nature*, 561(7722), 226-230.
- Gelis, A. V., Kozak, P., Breshears, A. T., Brown, M. A., Launiere, C., Campbell, E. L., ... & Lumetta, G. J. (2019). Closing the Nuclear Fuel Cycle with a Simplified Minor Actinide Lanthanide Separation Process (ALSEP) and Additive Manufacturing. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
- Goutham, R., Veena, T. R., & Prasad, K. S. (2018). Study on mechanical properties of recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) blended with virgin Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24836-24845.
- Graff, P., Ståhlbom, B., Nordenberg, E., Graichen, A., Johansson, P., & Karlsson, H. (2017). Evaluating measuring techniques for occupational exposure during additive manufacturing of metals: A pilot study. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S120-S129.
- Hadadzadeh, A., Baxter, C., Amirkhiz, B. S., & Mohammadi, M. (2018). Strengthening mechanisms in direct metal laser sintered AlSi10Mg: Comparison between virgin and recycled powders. *Additive Manufacturing*, 23, 108-120.
- Hamanishi, N., Kono, M., Suwa, S., Miyaki, T., & Rekimoto, J. (2018, March). Fluffy: Recyclable and Edible Rapid Prototyping Using Fluffed Sugar. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Intelligent User Interfaces Companion* (pp. 1-2).
- Hunter, L. W., Brackett, D., Brierley, N., Yang, J., & Attallah, M. M. (2020). Assessment of trapped powder removal and inspection strategies for powder bed fusion techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9), 4521-4532.
- Klein, S., Dickin, F., Adams, G., & Simske, S. (2013). Glass: an old material for the future of manufacturing. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 1492, 73-77.
- Kontovourkis, O., & Tryfonos, G. (2020). Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design. *Automation in Construction*, 110, 103005.

- Kumar, S., Singh, R., Singh, T. P., & Batish, A. (2019). On investigation of rheological, mechanical and morphological characteristics of waste polymer-based feedstock filament for 3D printing applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705719856063.
- Kyzioł, L., Panasiuk, K., Barcikowski, M., & Hajdukiewicz, G. (2020). The influence of manufacturing technology on the properties of layered composites with polyester–glass recycle additive. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 36(1), 18-30.
- Lafhaj, Z., & Dakhli, Z. (2019). Performance indicators of printed construction materials: A durability-based approach. *Buildings*, 9(4), 97.
- Li, G., Mo, X., Wang, Y., Chan, C. Y., & Chan, K. C. (2019). All 3D-Printed Superhydrophobic/Oleophilic Membrane for Robotic Oil Recycling. *Advanced Materials Interfaces*, 6(18), 1900874.
- Li, V. C. F., Kuang, X., Hamel, C. M., Roach, D., Deng, Y., & Qi, H. J. (2019). Cellulose nanocrystals support material for 3D printing complexly shaped structures via multi-materials-multi-methods printing. *Additive Manufacturing*, 28, 14-22.
- Ljunggren, S. A., Karlsson, H., Ståhlbom, B., Krapic, B., Fornander, L., Karlsson, L. E., ... & Graff, P. (2019). Biomonitoring of Metal Exposure During Additive Manufacturing (3D Printing). *Safety and Health at Work*, 10(4), 518-526.
- Maciel, V. G., Wales, D. J., Seferin, M., & Sans, V. (2019). Environmental performance of 3D-Printing polymerisable ionic liquids. *Journal of cleaner production*, 214, 29-40.
- McWhorter, R. R., & Delello, J. A. (2015). Green computing through virtual learning environments. In *Handbook of research on innovative technology integration in higher education* (pp. 1-28). IGI Global.
- Millard, J., Sorivelle, M. N., Deljanin, S., Unterfrauner, E., & Voigt, C. (2018). Is the maker movement contributing to sustainability?. *Sustainability*, 10(7), 2212.
- Minetola, P., & Eysers, D. (2018). Energy and cost assessment of 3D printed mobile case covers. *Procedia CIRP*, 69, 130-135.
- Mohammadzadeh, M., Imeri, A., Fidan, I., & Elkelany, M. (2019). 3D printed fiber reinforced polymer composites-Structural analysis. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107112.
- Mueller, R. P., Prater, T. J., Roman, M. C., Edmunson, J. E., Fiske, M. R., & Carrato, P. (2019). Nasa Centennial Challenge: Three Dimensional (3d) Printed Habitat, Phase 3.
- Navarro, J. C., Centeno, M. A., Laguna, O. H., & Odriozola, J. A. (2018). Policies and Motivations for the CO₂ Valorization through the Sabatier Reaction Using Structured Catalysts. A Review of the Most Recent Advances. *Catalysts*, 8(12), 578.
- Pacewicz, K., Sobotka, A., & Gołek, Ł. (2018). Characteristic of materials for the 3D printed building constructions by additive printing. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 222, p. 01013). EDP Sciences.
- Pearce, J. M. (2015). A novel approach to obviousness: An algorithm for identifying prior art concerning 3-D printing materials. *World Patent Information*, 42, 13-18.
- Pearce, J. M. (2017). Life-Cycle Analysis of Distributed Manufacturing.

- Pollák, M., Kaščák, J., Telišková, M., & Tkáč, J. (2019). Design of the 3D Printhead with Extruder for the Implementation of 3D Printing from Plastic and Recycling by Industrial Robot. *TEM Journal*, 8(3), 709.
- Prater, T., Edmunson, J., Ledbetter, F., Fiske, M., Hill, C., Meyyappan, M., ... & Werkheiser, N. (2019). NASA's In-Space Manufacturing Project: Update on Manufacturing Technologies and Materials to Enable More Sustainable and Safer Exploration.
- Saboori, A., Aversa, A., Bosio, F., Bassini, E., Librera, E., De Chirico, M., ... & Lombardi, M. (2019). An investigation on the effect of powder recycling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by Directed Energy Deposition. *Materials Science and Engineering: A*, 766, 138360.
- Samarjy, R. S., & Kaplan, A. F. (2018). Additive manufacturing and recycling by a laser-induced drop jet from a sheet edge. *Journal of Laser Applications*, 30(4), 042010.
- Samarjy, R. S., & Kaplan, A. F. (2017). Using laser cutting as a source of molten droplets for additive manufacturing: A new recycling technique. *Materials & Design*, 125, 76-84.
- Schirmeister, C. G., Hees, T., Licht, E. H., & Muelhaupt, R. (2019). 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 28, 152-159.
- Schmiege, B., Schimek, A., & Franzreb, M. (2018). Development and performance of a 3D-printable poly (ethylene glycol) diacrylate hydrogel suitable for enzyme entrapment and long-term biocatalytic applications. *Engineering in Life Sciences*, 18(9), 659-667.
- Sears, P. J., & Ho, K. (2018). Impact evaluation of in-space additive manufacturing and recycling technologies for on-orbit servicing. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55(6), 1498-1508.
- Sgambatia, A., Berga, M., Rossia, F., Dauriskikhb, A., Imhofc, B., Davenportc, R., ... & Makaya, A. (2018, October). URBAN: conceiving a lunar base using 3D printing technologies. In *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany* (pp. 1-5).
- Singh, R., Kumar, R., & Singh, I. (2019). Investigations on 3D printed thermosetting and ceramic-reinforced recycled thermoplastic-based functional prototypes. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705719864623.
- Son, D., Kim, S., Park, H., & Jeong, B. (2018). Closed-loop supply chain planning model of rare metals. *Sustainability*, 10(4), 1061.
- Spoerk, M., Arbeiter, F., Raguž, I., Holzer, C., & Gonzalez-Gutierrez, J. (2019). Mechanical Recyclability of Polypropylene Composites Produced by Material Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Polymers*, 11(8), 1318.
- Stoof, D., & Pickering, K. (2018). Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene. *Composites Part B: Engineering*, 135, 110-118.
- Suárez, L., & Domínguez, M. (2020). Sustainability and environmental impact of fused deposition modelling (FDM) technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(3-4), 1267-1279.

- Tahmasebinia, F., Niemelä, M., Ebrahimzadeh Sepasgozar, S. M., Lai, T. Y., Su, W., Reddy, K. R., ... & Marroquin, F. A. (2018). Three-Dimensional Printing Using Recycled High-Density Polyethylene: Technological Challenges and Future Directions for Construction. *Buildings*, 8(11), 165.
- Tan, J. H., Wong, W. L. E., & Dalgarno, K. W. (2017). An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process. *Additive Manufacturing*, 18, 228-255.
- Unruh, G. (2018). Circular economy, 3D printing, and the biosphere rules. *California Management Review*, 60(3), 95-111.
- Van Wijk, A. J. M., & van Wijk, I. (2015). *3D printing with biomaterials: Towards a sustainable and circular economy*. IOS press.
- Wang, D., Ye, G., Dou, W., Zhang, M., Yang, Y., Mai, S., & Liu, Y. (2020). Influence of spatter particles contamination on densification behavior and tensile properties of CoCrW manufactured by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*, 121, 105678.
- Watson, J. K., & Taminger, K. M. B. (2018). A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1316-1322.
- Windows-Yule, C. R. K., Moore, A., Wellard, C., Werner, D., Parker, D. J., & Seville, J. P. K. (2020). Particle distributions in binary gas-fluidised beds: Shape matters—But not much. *Chemical Engineering Science*, 216, 115440.
- Woern, A. L., & Pearce, J. M. (2018). 3-D printable polymer pelletizer chopper for fused granular fabrication-based additive manufacturing. *Inventions*, 3(4), 78.
- Yang, W. G., Lu, H., Huang, W. M., Qi, H. J., Wu, X. L., & Sun, K. Y. (2014). Advanced shape memory technology to reshape product design, manufacturing and recycling. *Polymers*, 6(8), 2287-2308.
- Betim, D. V., Heymann, M. C., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., & Costa, H. G. (2018, December). Analysis of the Application of Additive Manufacturing in the Circular Economy: An Integrative Literature Review. *In International Conference on Production and Operations Management Society* (pp. 1075-1084). Springer, Cham.
- Sanchez, F. A. C., Boudaoud, H., Camargo, M., & Pearce, J. M. (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 121602.
- Gama, N. V., Ferreira, A., & Barros-Timmons, A. (2018). Polyurethane foams: past, present, and future. *Materials*, 11(10), 1841.
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91-108
- Trombettoni, V., Lanari, D., Prinsen, P., Luque, R., Marrocchi, A., & Vaccaro, L. (2018). Recent advances in sulfonated resin catalysts for efficient biodiesel and bio-derived additives production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 65, 136-162.
- Walsh, F. C., & de León, C. P. (2018). Progress in electrochemical flow reactors for laboratory and pilot scale processing. *Electrochimica Acta*, 280, 121-148.

Ahmed, S., Bui, M. P. N., & Abbas, A. (2016). based chemical and biological sensors: Engineering aspects. *Biosensors and Bioelectronics*, 77, 249-263.

Wang, W., Han, P., Peng, P., Zhang, T., Liu, Q., Yuan, S. N., ... & Wang, K. S. (2020). Friction stir processing of magnesium alloys: a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33(1), 43-57.

Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2019). Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*, 9(16), 3316.

Leino, M., Pekkarinen, J., & Soukka, R. (2016). The role of laser additive manufacturing methods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing—enabling circular economy. *Physics Procedia*, 83, 752-760.

Παράρτημα

Στη συνέχεια παρατίθεται η κατηγοριοποίηση των 446 καταχωρήσεων της βιβλιογραφικής βάσης δεδομένων SCOPUS στις έξι υποκατηγορίες ενδιαφέροντος. Με τη σειρά, είναι (1) Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής (2) Υλικά (3) Ανακύκλωση (4) Επαναχρησιμοποίηση (5) Ανακατασκευή και Επιδιόρθωση (6) Βοηθητική κατηγορία: γενικές πληροφορίες.

A/A	Reference	Τίτλος	Επιστημονικό Περιοδικό	1	2	3	4	5	6
1	[No author name available]	16th International Conference on Manufacturing Research ICMR 201	Advances in Transdisciplinary Engineering						
2	[No author name available]	18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018	International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM						
3	[No author name available]	1st National Conference on Advances in Mechanical Engineering, NCAME 2019	Lecture Notes in Mechanical Engineering						
4	[No author name available]	2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2018	2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2018						
5	[No author name available]	3rd International Conference on Material Engineering and Manufacturing, ICMEM 2019 and 4th International Conference on Materials Engineering and Nanotechnology, ICMEN 2019	Materials Science Forum						
6	[No author name available]	5th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing, SDM 2018	Smart Innovation, Systems and Technologies						
7	[No author name available]	6th KES International Conference on Sustainable Design and Manufacturing, KES-SDM 2019	Smart Innovation, Systems and Technologies						
8	[No author name available]	9th International Conference on Key Engineering Materials, ICKEM 2019	Key Engineering Materials						
9	[No author name available]	Athletic footwear: Demand for speed is driving innovation	Performance Apparel Markets						
10	[No author name available]	CAMX 2018 - Composites and Advanced Materials Expo	CAMX 2018 - Composites and Advanced Materials Expo						

11	[No author name available]	GHTC 2018 - IEEE Global Humanitarian Technology Conference, Proceedings	GHTC 2018 - IEEE Global Humanitarian Technology Conference, Proceedings						
12	[No author name available]	International Conference on Advanced Materials Science, ICOAMS 2018	Materials Science Forum						
13	[No author name available]	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering						
14	[No author name available]	MATEC Web of Conferences	MATEC Web of Conferences						
15	[No author name available]	Modern Technologies in Industrial Engineering VII, ModTech 2019	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering						
16	[No author name available]	Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing	Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing						
17	[No author name available]	Product developments and innovations	Performance Apparel Markets						
18	[No author name available]	Product developments and innovations in textiles and apparel	Textile Outlook International						
19	[No author name available]	Product developments and innovations in textiles and apparel	Textile Outlook International						
20	[No author name available]	Product developments and innovations in the home textiles market	Textile Outlook International						
21	[No author name available]	Product developments and innovations in the home textiles market	Textile Outlook International						
22	Abi-Fadel et al., 2019	Leveraging additive manufacturing to enable deep space crewed missions	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
23	Aejmelaesus-Lindström et al., 2016	Jammed architectural structures: Towards large-scale reversible construction	Granular Matter						
24	Ahmed et al., 2020	Study of powder recycling and its effect on printed parts during laser powder-bed fusion of 17-4 PH stainless steel	Journal of Materials Processing Technology	X		X	X		
25	Ahmed et al., 2016	Paper-based chemical and biological sensors: Engineering aspects	Biosensors and Bioelectronics						
26	Albar et al., 2019	The Design and Development of an Extrusion System for 3D Printing Cementitious Materials	3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019 - Proceedings	X					X

27	Alkadi et al., 2019	3D Printing of Ground Tire Rubber Composites	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology			X			
28	Altamura & Baiani, 2019	Superuse and upcycling through design: Approaches and tools	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science				X		
29	Amorim et al., 2019	Exploring mechanical meta-material structures through personalised shoe sole design	Proceedings: SCF 2019 - ACM Symposium on Computational Fabrication						
30	Anderson, 2017	Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid	3D Printing and Additive Manufacturing	X		X			
31	Andrew et al., 2018	Effect of recycled glass gradation in 3D cementitious material printing	Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing			X			
32	Anisimov & Anisimov, 2019	Technological features of processing linear block-polyurethanes of different morphology	Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii						
33	Anisimov & Anisimov, 2019	Technological features of processing linear block-polyurethanes of different morphology	Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii						
34	Annapareddy et al., 2018	Flow and mechanical properties of 3D printed cementitious material with recycled glass aggregates	Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing	X	X	X			
35	Antonov et al., 2019	3D printing of plain and gradient cermets with efficient use of raw materials	Key Engineering Materials			X	X		
36	Asgari et al., 2017	On microstructure and mechanical properties of additively manufactured AISi10Mg_200C using recycled powder	Materials Science and Engineering A						
37	Ashkenazi, 2019	How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives	Technological Forecasting and Social Change						
38	Auth et al., 2018	Development of a concept for a holistic knowledge-based additive manufacturing over the entire lifecycle	IFIP Advances in Information and Communication Technology	X					
39	Ayrilmis et al., 2018	Use of wood in 3D printing technology - case studies	Increasing the Use of Wood in the Global Bio-Economy - Proceedings of Scientific Papers						
40	Azizi et al., 2019	Metallurgical and mechanical assessment of hybrid additively-manufactured maraging tool steels via selective laser melting	Additive Manufacturing						

41	Azuaje et al., 2017	An efficient and recyclable 3D printed α -Al ₂ O ₃ catalyst for the multicomponent assembly of bioactive heterocycles	Applied Catalysis A: General						
42	Babagowda et al., 2018	Study of Effects on Mechanical Properties of PLA Filament which is blended with Recycled PLA Materials	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	X					
43	Baiani & Altamura, 2018	Waste materials superuse and upcycling in architecture: Design and experimentation [Superuse e upcycling dei materiali di scarto in architettura: Progetto e sperimentazione]	TECHNE			X	X		X
44	Barton et al., 2020	A falling film bioreactor (FFBR) for generating effective gas-to-liquid mass transfer using wavy laminar flow for continuous microbial gas processing	Chemical Engineering Science						
45	Bauer et al., 2017	Investigations of aging behaviour for aluminium powders during an atmosphere simulation of the LBM process	Powder Metallurgy						
46	Bedi et al., 2019	Investigations for machinability of primary recycled thermoplastics with secondary recycled rapid tooling	Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences	X					
47	Behm et al., 2018	Benefits and limitations of three-dimensional printing technology for ecological research	BMC ecology		X	X			
48	Boparai et al., 2016	Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications	Composites Part B: Engineering		X				
49	Broecker et al., 2018	High-throughput in situ X-ray screening of and data collection from protein crystals at room temperature and under cryogenic conditions	Nature Protocols						
50	Byard et al., 2019	Green fab lab applications of large-area waste polymer-based additive manufacturing	Additive Manufacturing	X					X
51	Caminero et al., 2018	Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling	Polymer Testing						
52	Caminero et al., 2018	Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling	Composites Part B: Engineering						

53	Caminero et al., 2019	Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture	Polymers	X					
54	Caminero et al., 2019	Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites	Composites Part B: Engineering						
55	Canessa et al., 2017	Study of Moineau-based pumps for the volumetric extrusion of pellets	Additive Manufacturing						
56	Canessa et al., 2017	Study of Moineau-based pumps for the volumetric extrusion of pellets	Additive Manufacturing						
57	Cantrall & Nagl, 2000	Unit converts H2S to raw material for lube-additive production	Oil and Gas Journal						
58	Carrato et al., 2018	Additive construction of Martian habitats	IABSE Symposium, Nantes 2018: Tomorrow's Megastructures						
59	Carrion et al., 2019	Powder Recycling Effects on the Tensile and Fatigue Behavior of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Parts	JOM	X					
60	Chacón et al., 2019	Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties	Composites Science and Technology	X	X	X			
61	Chandrasekar et al., 2020	Investigating the effect of metal powder recycling in Electron beam Powder Bed Fusion using process log data	Additive Manufacturing	X		X			
62	Charlebois & Juhasz, 2018	Food futures and 3D printing: Strategic market foresight and the case of structur3D	International Journal on Food System Dynamics						
63	Charles et al., 2019	On the assessment of thermo-mechanical degradability of multi-recycled ABS polymer for 3D printing applications	Smart Innovation, Systems and Technologies	X		X			
64	Charles & Gordon, 2010	Rapid prototyping "old-fashioned" way	Machine Design						
65	Chen et al., 2018	Systematical mechanism of Polyamide-12 aging and its micro-structural evolution during laser sintering	Polymer Testing						

66	Chen et al., 2018	Investigation into the processability, recyclability and crystalline structure of selective laser sintered Polyamide 6 in comparison with Polyamide 12	Polymer Testing						
67	Chen et al., 2018	A Single Integrated 3D-Printing Process Customizes Elastic and Sustainable Triboelectric Nanogenerators for Wearable Electronics	Advanced Functional Materials						
68	Chen et al., 2017	A Low Cost Desktop Electrochemical Metal 3D Printer	Advanced Materials Technologies						
69	Chen et al., 2020	Numerical and experimental observations of the flow field inside a selective laser melting (SLM) chamber through computational fluid dynamics (CFD) and particle image velocimetry (PIV)	Powder Technology						
70	Childress et al., 2019	Additive manufacture of lightly crosslinked semicrystalline thiol-enes for enhanced mechanical performance	Polymer Chemistry						
71	Choi et al., 2018	Toward Functional 3D Architected Platform: Advanced Approach to Anchor Functional Metal Oxide onto 3D Printed Scaffold	Advanced Engineering Materials						
72	Cholleti & Gibson, 2018	ABS Nano Composite Materials in Additive Manufacturing	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	X		X			
73	Chong et al., 2015	Cradle to Cradle® design for 3D printing	Chemical Engineering Transactions	X		X	X		
74	Chong et al., 2017	Physical Characterization and Pre-assessment of Recycled High-Density Polyethylene as 3D Printing Material	Journal of Polymers and the Environment	X		X			
75	Chong et al., 2020	Evaluation of the physico-mechanical properties of activated-carbon enhanced recycled polyethylene/polypropylene 3D printing filament	Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences						
76	Cicala et al., 2018	Hybrid composites manufactured by resin infusion with a fully recyclable bioepoxy resin	Composites Part B: Engineering						
77	Cisneros-López et al., 2020	Recycled poly(lactic acid)-based 3D printed sustainable biocomposites: a comparative study with injection molding	Materials Today Sustainability		X				
78	Clemon & Zohdi, 2018	On the tolerable limits of granulated recycled material additives to maintain structural integrity	Construction and Building Materials			X	X		

79	Clinton et al., 2018	Materials and structures symposium (C2) advancements in materials applications and rapid prototyping (9)	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
80	Cordova et al., 2019	Revealing the Effects of Powder Reuse for Selective Laser Melting by Powder Characterization	JOM	X			X		
81	Cruz et al., 2017	Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues	Additive Manufacturing	X		X			
82	Cunico et al., 2019	Development and characterisation of 3D printing finishing process applying recycled plastic waste	Virtual and Physical Prototyping	X		X		X	
83	Czyżewski et al., 2018	Secondary use of ABS co-polymer recyclates for the manufacture of structural elements using the FFF technology	Rapid Prototyping Journal	X		X			
84	Dadbakhsh et al., 2017	Effect of PA12 powder reuse on coalescence behaviour and microstructure of SLS parts	European Polymer Journal						
85	Damanhuri et al., 2019	Comparative study of selected indoor concentration from selective laser sintering process using virgin and recycled polyamide nylon (PA12)	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	X					
86	Daraban et al., 2019	A deep look at metal additive manufacturing recycling and use tools for sustainability performance	Sustainability (Switzerland)	X		X	X	X	
87	Dayal, 2014	Conceptual design of pressurized shelters on the lunar surface	Journal of Aerospace Engineering						
88	Denti et al., 2019	Effect of powder recycling in laser-based powder bed fusion of Ti-6Al-4V	Manufacturing Technology						
89	Dertinger et al., 2020	Technical pathways for distributed recycling of polymer composites for distributed manufacturing: Windshield wiper blades	Resources, Conservation and Recycling	X		X			X
90	Despeisse et al., 2017	Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda	Technological Forecasting and Social Change			X			X
91	Dev et al., 2020	Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance	Resources, Conservation and Recycling					X	X

92	Diana-Irinel, 2018	Recycling of Co-Cr powders used for manufacturing by direct metal laser sintering technology	International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM						
93	Díaz-Marta et al., 2018	Three-Dimensional Printing in Catalysis: Combining 3D Heterogeneous Copper and Palladium Catalysts for Multicatalytic Multicomponent Reactions	ACS Catalysis						
94	Díaz-Marta et al., 2020	Integrating Reactors and Catalysts through Three-Dimensional Printing: Efficiency and Reusability of an Impregnated Palladium on Silica Monolith in Sonogashira and Suzuki Reactions	ChemCatChem						
95	Ding et al., 2020	Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages	Construction and Building Materials						
96	Dinh et al., 2016	Flexible and multifunctional electronics fabricated by a solvent-free and user-friendly method	RSC Advances						
97	Domingues et al., 2017	An Additive Manufacturing Solution to Produce Big Green Parts from Tires and Recycled Plastics	Procedia Manufacturing	X	X	X			
98	Dunnigan et al., 2018	Beneficial usage of recycled polymer particulates for designing novel 3D printed composites	Progress in Additive Manufacturing						
99	Durgun et al., 2016	Experimental investigation of sheet metal forming using a recyclable low melting point alloy tool	Materialpruefung/Materials Testing						
100	Ellery, 2020	Sustainable in-situ resource utilization on the moon	Planetary and Space Science						
101	Ellery, 2019	The way of indigenous peoples - 3D printing sustainable lunar bases from in-situ resources	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
102	Erkal et al., 2014	3D printed microfluidic devices with integrated versatile and reusable electrodes	Lab on a Chip						
103	Ertane et al., 2018	Processing and Wear Behaviour of 3D Printed PLA Reinforced with Biogenic Carbon	Advances in Tribology						
104	Esposito et al., 2018	Fused Deposition Modeling (FDM): An innovative technique aimed at reusing Lecce stone waste for industrial design and building applications	Construction and Building Materials		X				

105	Exconde et al., 2019	Materials selection of 3D printing filament and utilization of recycled polyethylene terephthalate (PET) in a redesigned breadboard	Procedia CIRP	X		X	X		
106	Fahim et al., 2019	A study on the feasibility of producing polylactic acid from cotton and coffee waste in Egypt	Managing Technology for Inclusive and Sustainable Growth - 28th International Conference for the International Association of Management of Technology, IAMOT 2019	X	X				
107	Farina et al., 2019	High-performance Nylon-6 sustainable filaments for additive manufacturing	Materials						
108	Fateri et al., 2018	Feasibility study on additive manufacturing of recyclable objects for space applications	Additive Manufacturing			X			
109	Feeley et al., 2014	Evaluation of potential fair trade standards for an ethical 3-D printing filament	Journal of Sustainable Development	X		X			
110	Feng et al., 2019	PA12 powder recycled from SLS for FDM	Polymers			X	X		
111	Fousová et al., 2015	3D printing as an alternative to casting, forging and machining technologies?	Manufacturing Technology						
112	Francès, 2017	Silicones: state of the art and new challenges for their industry [Les silicones : État de l'art et nouveaux défis pour leur industrie]	Actualite Chimique						
113	French et al., 2019	Process monitoring and industrial informatics for online optimization of Welding Procedure Specifications (WPS) in Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) - Industry 4.0 for robotic additive remanufacturing of aeroengine components	ICARM 2018 - 2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics						
114	Fries & Durna, 2018	Recycling of used filament from 3d printing	International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM						
115	Froes et al., 2017	Additive manufacturing for aerospace applications-part I	Advanced Materials and Processes						
116	Fullenwider et al., 2019	From recycled machining waste to useful powders for metal additive manufacturing	Minerals, Metals and Materials Series	X		X			

117	Fullenwider et al., 2019	Two-stage ball milling of recycled machining chips to create an alternative feedstock powder for metal additive manufacturing	Powder Technology	X		X			
118	Gaikwad et al., 2018	Transformation of E-Waste Plastics into Sustainable Filaments for 3D Printing	ACS Sustainable Chemistry and Engineering			X			X
119	Galicki et al., 2019	Localized Changes of Stainless Steel Powder Characteristics During Selective Laser Melting Additive Manufacturing	Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science						
120	Gama et al., 2018	Polyurethane foams: Past, present, and future	Materials						
121	Gamaralalage et al., 2018	Conversion of the SCARA Robot into a Hybrid Manufacturing Workstation	Procedia Manufacturing						
122	Gan et al., 2019	Preparation of Si-SiO _x nanoparticles from volatile residue produced by refining of silicon	Waste Management						
123	Gandha et al., 2019	Recycling of additively printed rare-earth bonded magnets	Waste Management			X	X		
124	Gantenbein et al., 2018	Three-dimensional printing of hierarchical liquid-crystal-polymer structures	Nature	X					
125	Garboczi & Hrabe, 2020	Particle shape and size analysis for metal powders used for additive manufacturing: Technique description and application to two gas-atomized and plasma-atomized Ti64 powders	Additive Manufacturing						
126	Garmulewicz et al., 2018	Disruptive Technology as an Enabler of the Circular Economy: What Potential Does 3D Printing Hold?	California Management Review	X		X			X
127	Gasper et al., 2019	Oxide and spatter powder formation during laser powder bed fusion of Hastelloy X	Powder Technology						
128	Gelis et al., 2019	Closing the Nuclear Fuel Cycle with a Simplified Minor Actinide Lanthanide Separation Process (ALSEP) and Additive Manufacturing	Scientific Reports						
129	Giurco et al., 2014	Circular economy: Questions for responsible minerals, additive manufacturing and recycling of metals	Resources	X	X	X	X		X
130	Gökelma et al., 2018	Characteristics of Ti6Al4V powders recycled from turnings via the HDH technique	Metals						

131	Gong et al., 2019	Rheological properties of two stainless steel 316L powders for additive manufacturing	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering			X	X		
132	Gorji et al., 2019	XPS, XRD, and SEM characterization of the virgin and recycled metallic powders for 3D printing applications	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	X		X	X		
133	Gorji et al., 2019	Recyclability of stainless steel (316 L) powder within the additive manufacturing process	Materialia			X	X		
134	Gorji et al., 2020	A new method for assessing the utility of powder bed fusion (PBF) feedstock	Materials Characterization	X		X			
135	Goutham et al., 2018	Study on mechanical properties of recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) blended with virgin Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) using Taguchi method	Materials Today: Proceedings	X					
136	Grace, 2017	Habitats for Humanity – Potentially 3D Printed on Mars: NASA contest finds that recycled thermoplastics could yield a concrete material viable for 3D-printing habitats on the Red Planet	Plastics Engineering						
137	Graff et al., 2017	Evaluating Measuring Techniques for Occupational Exposure during Additive Manufacturing of Metals: A Pilot Study	Journal of Industrial Ecology	X					
138	Gregg et al., 2019	Assembled, Modular Hardware Architectures - What Price Reconfigurability?	IEEE Aerospace Conference Proceedings						
139	Gruber et al., 2019	Effect of Powder Recycling in Electron Beam Melting on the Surface Chemistry of Alloy 718 Powder	Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science	X		X			
140	Gruber et al., 2018	Effect of Powder Recycling on the Fracture Behavior of Electron Beam Melted Alloy 718	Powder Metallurgy Progress						
141	Gu et al., 2019	The re-usability of heat-exposed poly (ethylene terephthalate) powder for laser sintering	Additive Manufacturing	X			X		
142	Guan et al., 2019	A Microfluidic Spherical Helix Module Using Liquid Metal and Additive Manufacturing for Drug Delivery Applications	IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest						
143	Guo et al., 2020	Research on additive manufacturing technology	Lecture Notes in Electrical Engineering	X				X	X

144	Guo et al., 2019	Additive manufacturing of patterned 2D semiconductor through recyclable masked growth	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America						
145	Gutiérrez & Colorado, 2020	Mechanical behavior of thermoplastic filaments fabricated with the fused modeling deposition technique	Minerals, Metals and Materials Series						
146	Hadadzadeh et al., 2018	Strengthening mechanisms in direct metal laser sintered AlSi10Mg: Comparison between virgin and recycled powders	Additive Manufacturing	X					
147	Hamanishi et al., 2018	Fluffy: Recyclable and edible rapid prototyping using fluffed sugar	International Conference on Intelligent User Interfaces, Proceedings IUI						
148	Harooni et al., 2018	Mechanical properties and microstructures in zirconium deposited by injected powder laser additive manufacturing	Additive Manufacturing						
149	Hart et al., 2018	Recycling meal-ready-to-eat (MRE) pouches into polymer filament for material extrusion additive manufacturing	Additive Manufacturing	X		X			
150	He et al., 2020	Microscopic morphology, rheological behavior, and mechanical properties of polymers: Recycled acrylonitrile-butadiene-styrene/polybutylene terephthalate blends	Journal of Applied Polymer Science			X			
151	He et al., 2019	Recyclable 3D Printing of Polyimine-Based Covalent Adaptable Network Polymers	3D Printing and Additive Manufacturing			X			
152	Heiden et al., 2019	Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process	Additive Manufacturing	X			X		
153	Helps et al., 2019	Thermoplastic electroactive gels for 3D-printable artificial muscles	Smart Materials and Structures						
154	Herianto,, 2020	Recycled Polypropylene Filament for 3D Printer: Extrusion Process Parameter Optimization	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering			X			
155	Heyer et al., 2014	Enabling of local value creation via openness for emergent synthesis	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing			X			
156	Horn et al., 2020	Powder separation strategies for recycling in multi-material additive manufacturing	Euro PM 2018 Congress and Exhibition						
157	Horta et al., 2018	Large scale additive manufacturing of eco-composites	International Journal of Material Forming	X	X				

158	Hryha et al., 2018	Surface oxide state on metal powder and its changes during additive manufacturing: An overview	Proceedings Euro PM 2017: International Powder Metallurgy Congress and Exhibition							
159	Hu et al., 2017	Preparation, morphology and superior performances of biobased thermoplastic elastomer by in situ dynamical vulcanization for 3D-printed materials	Polymer	X	X					
160	Huck-Jones et al., 2019	Analytical insight for optimizing metal powder processing	Proceedings of the 10th European Metallurgical Conference, EMC 2019							
161	Hunt et al., 2015	Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers	Resources, Conservation and Recycling			X				
162	Hunter et al., 2020	Assessment of trapped powder removal and inspection strategies for powder bed fusion techniques	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	X						
163	Idrees et al., 2018	Three-Dimensional-Printed Sustainable Biochar-Recycled PET Composites	ACS Sustainable Chemistry and Engineering	X	X					
164	Jakus et al., 2017	Robust and Elastic Lunar and Martian Structures from 3D-Printed Regolith Inks	Scientific Reports							
165	Jawale et al., 2019	Open Source 3D-printed focussing mechanism for cellphone-based cellular microscopy	Journal of Microscopy							
166	Jayaraj et al., 2015	Sustainable re-design of a hypodermic syringe	Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences							
167	Jelis et al., 2015	Metallurgical and Mechanical Evaluation of 4340 Steel Produced by Direct Metal Laser Sintering	JOM							
168	Jia et al., 2017	Thermally Stable Cellulose Nanocrystals toward High-Performance 2D and 3D Nanostructures	ACS Applied Materials and Interfaces							
169	Jmal et al., 2019	Concrete formulation for 3D printing	International Symposium on Project Approaches in Engineering Education							
170	Joensuu et al., 2017	Visualizing endocytic recycling and trafficking in live neurons by subdiffractional tracking of internalized molecules	Nature Protocols							
171	Johnson et al., 2013	Additive manufactured textiles for high-performance stab resistant applications	Rapid Prototyping Journal							

172	Josupeit & Schmid, 2017	Experimental analysis and modeling of local ageing effects during laser sintering of polyamide 12 in regard to individual thermal histories	Journal of Applied Polymer Science						
173	Juraschek et al., 2017	Experiencing Closed Loop Manufacturing in a Learning Environment	Procedia Manufacturing			X			
174	Kabb et al., 2018	Photoreversible Covalent Hydrogels for Soft-Matter Additive Manufacturing	ACS Applied Materials and Interfaces						
175	Kappes et al., 2018	Machine learning to optimize additive manufacturing parameters for laser powder bed fusion of Inconel 718	Minerals, Metals and Materials Series						
176	Keating & Oxman, 2013	Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing						
177	Kerns, 2018	Recycle at home with 3D printing	Machine Design						
178	Khan et al., 2019	Metal air battery shell unit redesign with DFMA aspect and rapid prototyping	International Journal of Recent Technology and Engineering						
179	Khazdozian et al., 2018	Recycled Sm-Co bonded magnet filaments for 3D printing of magnets	AIP Advances			X			
180	Khondoker & Sameoto, 2019	Direct coupling of fixed screw extruders using flexible heated hoses for FDM printing of extremely soft thermoplastic elastomers	Progress in Additive Manufacturing						
181	Kim et al., 2017	Microwave-Assisted Protein Digestion in a Plate Well for Facile Sampling and Rapid Digestion	Analytical Chemistry						
182	Kim et al., 2016	Sustainable design process based on 3D printing technology	Indian Journal of Science and Technology						
183	Kim et al., 2018	Fatigue performance of asphalt mixture containing recycled materials and warm-mix technologies under accelerated loading and four point bending beam test	Journal of Cleaner Production						
184	Klein et al., 2012	Glass: An old material for the future of manufacturing	HP Laboratories Technical Report	X					
185	Klein et al., 2012	3D printing of transparent glass	HP Laboratories Technical Report						
186	Kontovourkis & Tryfonos, 2020	Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design	Automation in Construction	X					

187	Korniejenko et al., 2019	A Comparative Study of Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Made by Casted and 3D Printing Methods	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering						
188	Kozlovsky et al., 2018	Mechanical Properties of Reused Nylon Feedstock for Powder-bed Additive Manufacturing in Orthopedics	Procedia Manufacturing				X		
189	Kreiger et al., 2014	Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament	Journal of Cleaner Production	X		X			
190	Kucherov et al., 2017	Three-Dimensional Printing with Biomass-Derived PEF for Carbon-Neutral Manufacturing	Angewandte Chemie - International Edition						
191	Kumar et al., 2020	Processing techniques of polymeric materials and their reinforced composites	Advances in Materials and Processing Technologies			X			
192	Kumar & Czekanski, 2017	Development of filaments using selective laser sintering waste powder	Journal of Cleaner Production	X		X	X		
193	Kumar & Czekanski, 2018	Roadmap to sustainable plastic additive manufacturing	Materials Today Communications	X		X	X		
194	Kumar et al., 2019	On investigation of rheological, mechanical and morphological characteristics of waste polymer-based feedstock filament for 3D printing applications	Journal of Thermoplastic Composite Materials						
195	Kumar et al., 2020	Effect of extrusion parameters on primary recycled ABS: Mechanical, rheological, morphological and thermal properties	Materials Research Express						
196	Kutz, 2016	Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition	Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition						
197	Kuzman et al., 2019	Fire behaviour of 3D printed PLA and Wood/PLA composites	Digitalisation and Circular Economy: Forestry and Forestry Based Industry Implications - Proceedings of Scientific Papers						
198	Kyziół et al., 2019	The Analysis of the Possibilities of Using 3D Printer for Making Components and Parts of Marine Equipment for Example Flexible Clutch Coupling [Analiza mozliwosci wykorzystania drukarki 3D do wytwarzania elementów i części urządzeń okrętowych]	Journal of Konbin	X		X			
199	Kyziół et al., 2020	The influence of manufacturing technology on the properties of layered	Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology						

		composites with polyester–glass recycle additive							
200	Lafhaj & Dakhli, 2019	Performance indicators of printed construction materials: A durability-based approach	Buildings						
201	Lahrour & Brissaud, 2018	A Technical Assessment of Product/Component Re-manufacturability for Additive Remanufacturing	Procedia CIRP	X				X	
202	Lanzotti et al., 2019	A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA	Procedia CIRP	X		X			
203	Law et al., 2018	Oxidation and extraction of Am(VI) using a monoamidic extractant in 3D printed centrifugal contactors	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry						
204	Le et al., 2017	Extraction of features for combined additive manufacturing and machining processes in a remanufacturing context	Lecture Notes in Mechanical Engineering	X				X	
205	Le et al., 2017	Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination	Journal of Cleaner Production	X				X	
206	Le et al., 2018	Extracting features for manufacture of parts from existing components based on combining additive and subtractive technologies	International Journal on Interactive Design and Manufacturing	X			X	X	
207	Le et al., 2017	Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context	Journal of Manufacturing Systems	X				X	
208	Le et al., 2018	The development of a strategy for direct part reuse using additive and subtractive manufacturing technologies	Additive Manufacturing	X			X	X	
209	Lecký et al., 2019	Assembly tool manufacturing and optimization for polylactic acid additive manufacturing	Materials Science Forum	X					
210	Lee et al., 2019	Development and Evaluation of a Distributed Recycling System for Making Filaments Reused in Three-Dimensional Printers	Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME			X			
211	Lehner et al., 2018	A biological nutrient cycle for a partially self-sufficient colony	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						

212	Li et al., 2019	4D Printing of Recyclable Lightweight Architectures Using High Recovery Stress Shape Memory Polymer	Scientific Reports						
213	Li et al., 2018	Proinflammatory and osteolysis-inducing effects of 3D printing Ti6Al4V particles: In vitro and in vivo	RSC Advances						
214	Li et al., 2019	All 3D-Printed Superhydrophobic/Oleophilic Membrane for Robotic Oil Recycling	Advanced Materials Interfaces						
215	Li & Leung, 2019	Sustainable construction waste management in Adelaide	Proceedings of 22nd International Conference on Advancement of Construction Management and Real Estate, CRIOCM 2017						
216	Li et al., 2019	Cellulose nanocrystals support material for 3D printing complexly shaped structures via multi-materials-multi-methods printing	Additive Manufacturing	X					
217	Li et al., 2015	Melt-and-mold fabrication (MnM-Fab) of reconfigurable low-cost devices for use in resource-limited settings	Talanta						
218	Li et al., 2018	Effect of Powder Recycling on Hardness and Impact Toughness of Polyamide Formed by Selective Laser Sintering [粉末回用对选择性激光烧结聚酰胺硬度和冲击韧性的影响]	Zhongguo Jiguang/Chinese Journal of Lasers						
219	Lin et al., 2006	Rapid additive manufacturing of functionally graded structures using simultaneous wire and powder laser deposition	Virtual and Physical Prototyping						
220	Lin et al., 2018	Synthetic multifunctional graphene composites with reshaping and self-healing features via a facile biomineralization-inspired process	Advanced Materials						
221	Liu et al., 2019	A Topology Optimization Method for Hybrid Subtractive-Additive Remanufacturing	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology	X				X	
222	Liu et al., 2019	Mechanism and Performance of 3D Printing and Recycling for Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites [连续碳纤维增强聚乳酸复合材料3D打印及回收再利用机理与性能]	Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering						

223	Liu et al., 2019	N-doped porous carbon material prepared via direct ink writing for the removal of methylene blue	Diamond and Related Materials						
224	Ljunggren et al., 2019	Biomonitoring of Metal Exposure During Additive Manufacturing (3D Printing)	Safety and Health at Work						
225	Lo et al., 2014	Toward more realistic viscosity measurements of tyre rubber-bitumen blends	Construction and Building Materials						
226	Löschke et al., 2019	Microtimber: The development of a 3D printed composite panel made from waste wood and recycled plastics	Lecture Notes in Civil Engineering	X	X				X
227	Lozada et al., 2019	Viability study of acrylonitrile butadiene styrene polymer as fuel for hybrid rocket engines in Colombia	AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition, 2019						
228	Luo et al., 2019	Chemomechanics of dual-stage reprocessable thermosets	Journal of the Mechanics and Physics of Solids						
229	Lutter-Günther et al., 2018	Spatter formation during laser beam melting of AlSi10Mg and effects on powder quality	Procedia CIRP	X		X	X		
230	Lutter-Günther et al., 2018	Powder recycling in laser beam melting: strategies, consumption modeling and influence on resource efficiency	Production Engineering	X			X		
231	Ma et al., 2018	Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing	Construction and Building Materials						
232	Ma et al., 2017	Environmental Sustainability of Laser Metal Deposition: The Role of Feedstock Powder and Feedstock Utilization Factor	Procedia Manufacturing	X		X	X		
233	Maamoun et al., 2018	Thermal post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder	Additive Manufacturing						
234	Maciel et al., 2019	Environmental performance of 3D-Printing polymerisable ionic liquids	Journal of Cleaner Production						
235	Manideep et al., 2019	Design and development of pallet extruder	AIP Conference Proceedings						
236	Marchelli et al., 2011	The guide to glass 3D printing: Developments, methods, diagnostics and results	Rapid Prototyping Journal						

237	Marques et al., 2016	Two different techniques used in the production of foam structures: 3D printing and glass foaming	Ciencia e Tecnologia dos Materiais							
238	McIntyre & Ortiz, 2015	Multinational corporations and the circular economy: How Hewlett packard scales innovation and technology in its global supply chain	Taking Stock of Industrial Ecology							X
239	McWhorter & Delello, 2015	Green computing through virtual learning environments	Professional Development and Workplace Learning: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications	X						
240	Mechtcherine et al., 2019	Production of monolithic, load-bearing, heat-insulating wall structures by additive manufacturing with foam concrete [CONPrint3D Ultralight - Herstellung monolithischer, tragender, wärmedämmender Wandkonstruktionen durch additive Fertigung mit Schaumbeton]	Bauingenieur							
241	Mellin et al., 2016	Nano-sized by-products from metal 3D printing, composite manufacturing and fabric production	Journal of Cleaner Production							
242	Mellin et al., 2017	COPGLOW and XPS investigation of recycled metal powder for selective laser melting	Powder Metallurgy							
243	Melugiri-Shankaramurthy et al., 2019	Evaluation of cement paste containing recycled stainless steel powder for sustainable additive manufacturing	Construction and Building Materials	X		X	X			
244	Mertens et al., 2017	Analysis of thermal history effects on mechanical anisotropy of 3D-printed polymer matrix composites via in situ X-ray tomography	Journal of Materials Science							
245	Midukov et al., 2018	The preparation of fibers for cardboard production	Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya							
246	Milewski, 2017	Building, post-processing, and inspecting	Springer Series in Materials Science							
247	Millard et al., 2018	Is the maker movement contributing to sustainability?	Sustainability (Switzerland)	X						
248	Min et al., 2019	A comparative study of metal additive manufacturing processes for elevated sustainability	Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference	X		X				
249	Minetola & Eyers, 2018	Energy and Cost Assessment of 3D Printed Mobile Case Covers	Procedia CIRP							X

250	Mogas-Soldevila et al., 2014	Water-based robotic fabrication: Large-scale additive manufacturing of functionally graded hydrogel composites via multichamber extrusion	3D Printing and Additive Manufacturing						
251	Mohammadizadeh et al., 2019	3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis	Composites Part B: Engineering						
252	Mohammed et al., 2019	EcoPrinting: Investigation of Solar Powered Plastic Recycling and Additive Manufacturing for Enhanced Waste Management and Sustainable Manufacturing	2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2018	X		X			
253	Mohammed et al., 2019	Investigation of Closed-Loop Manufacturing with Acrylonitrile Butadiene Styrene over Multiple Generations Using Additive Manufacturing	ACS Sustainable Chemistry and Engineering			X			
254	Monsigny et al., 2018	Depolymerization of Waste Plastics to Monomers and Chemicals Using a Hydrosilylation Strategy Facilitated by Brookhart's Iridium(III) Catalyst	ACS Sustainable Chemistry and Engineering						
255	Morsidi et al., 2020	Fused Deposition Modelling Filament with Recyclate Fibre Reinforcement	Procedia CIRP			X			
256	Mosaddek et al., 2018	Design and Testing of a Recycled 3D Printed and Foldable Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing	2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2018	X		X			
257	Mueller et al., 2019	NASA Centennial Challenge: Three dimensional (3D) printed habitat, phase 3	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
258	Mueller et al., 2018	NASA Centennial Challenge: Three dimensional (3D) printed habitat, phase 3	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
259	Nadgorny et al., 2016	Three-Dimensional Printing of pH-Responsive and Functional Polymers on an Affordable Desktop Printer	ACS Applied Materials and Interfaces						
260	Naitove, 2014	How currier puts the 'custom' in custom blow molding	Plastics Technology						
261	Nandwana et al., 2016	Recyclability Study on Inconel 718 and Ti-6Al-4V Powders for Use in Electron Beam Melting	Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science						
262	Narayana & Venkatesh, 2019	Parametric optimization for a quality prototype from selective laser sintering: Grey taguchi method	Materials Today: Proceedings						

263	Nascimento et al., 2019	Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal	Journal of Manufacturing Technology Management	X		X	X		X
264	Navarro et al., 2018	Policies and motivations for the CO2 valorization through the sabatier reaction using structured catalysts. A review of the most recent advances	Catalysts						X
265	Nguyen et al., 2017	Characteristics of Inconel Powders for Powder-Bed Additive Manufacturing	Engineering						
266	Northwood & Faldu, 2020	Corrosion: The circular materials economy and design for sustainability	Corrosion and Prevention 2019						
267	Olesik et al., 2019	The use of shredded car windscreen waste as reinforcement of thermoplastic composites for 3D (FDM) printing [WYkorzystanie rozdrobnionych odpadów szyb samochodowych jako wzmocnienia kompozytów termoplastycznych przeznaczonych do druku 3D (FDM)]	Composites Theory and Practice						
268	Ongaro et al., 2018	Rapid prototyping for micro-engineering and microfluidic applications: Recycled pmma, a sustainable substrate material	Advances in Transdisciplinary Engineering						
269	Ordoñez & Colorado, 2020	Additive Manufacturing via the Direct Ink Writing Technique of Kaolinite-Based Clay with Electric Arc Furnace Steel Dust (EAF Dust)	Minerals, Metals and Materials Series						
270	Orhon & Altin, 2020	Utilization of alternative building materials for sustainable construction	Green Energy and Technology						
271	Oyama et al., 2019	The ZOG Method: True Printed Circuit Boards	IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology						
272	Pacewicz et al., 2018	Characteristic of materials for the 3D printed building constructions by additive printing	MATEC Web of Conferences	X					
273	Paciorek-Sadowska et al., 2019	New poly(lactide-urethane-isocyanurate) foams based on bio-poly(lactide)Waste	Polymers		X	X			
274	Pan et al., 2018	The Effects of Iron, Silicon, Chromium, and Aluminum Additions on the Physical and Mechanical Properties of Recycled 3D Printing Filaments	Advances in Polymer Technology						

275	Pancoi et al., 2018	Effect of environmental and mechanical loading conditions on the fracture mode of laser beam melted alloy 718 at 650 °C	Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials - 2018: Proceedings of the 2018 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Material, POWDERMET 2018						
276	Park et al., 2017	Refining effect of electron beam melting on additive manufacturing of pure titanium products	Materials Letters						
277	Pattison et al., 2007	Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication	International Journal of Machine Tools and Manufacture						
278	Pavlo et al., 2018	3D-Printing Based Distributed Plastic Recycling: A Conceptual Model for Closed-Loop Supply Chain Design	2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2018 - Proceedings			X			X
279	Pearce, 2015	A novel approach to obviousness: An algorithm for identifying prior art concerning 3-D printing materials	World Patent Information	X					
280	Pearce, 2017	Life-Cycle Analysis of Distributed Manufacturing	Encyclopedia of Sustainable Technologies			X			
281	Peeters et al., 2019	A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective	Journal of Cleaner Production			X	X		
282	Peng et al., 2018	Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact	Additive Manufacturing	X					X
283	Perry et al., 2019	Pin Fin Array Heat Sinks by Cold Spray Additive Manufacturing: Economics of Powder Recycling	Journal of Thermal Spray Technology						
284	Perry et al., 2018	Pin fin array heat sinks by cold spray additive manufacturing: Economics of powder recycling	Proceedings of the International Thermal Spray Conference						
285	Peterson et al., 2019	Dynamic Nanocellulose Networks for Thermoset-like yet Recyclable Plastics with a High Melt Stiffness and Creep Resistance	Biomacromolecules						
286	Pino & Devecchi, 2019	3D printing recyclable spacewear on Mars: Equivalent system Mass tradeoff with traditional techniques	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
287	Pitt et al., 2017	Investigation into the material properties of wooden composite structures with in-	Composites Science and Technology	X	X				

		situ fibre reinforcement using additive manufacturing							
288	Plaskitt et al., 2020	Strain controlled fatigue testing of additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V	Lecture Notes in Mechanical Engineering						
289	Pollák et al., 2019	Design of the 3D printhead with extruder for the implementation of 3D printing from plastic and recycling by industrial robot	TEM Journal	X					
290	Popov et al., 2018	The effect of powder recycling on the mechanical properties and microstructure of electron beam melted Ti-6Al-4 V specimens	Additive Manufacturing	X		X	X		
291	Prater et al., 2019	NASA's in-space manufacturing project: Update on manufacturing technologies and materials to enable more sustainable and safer exploration	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
292	Prater et al., 2018	NASA's centennial challenge for 3D-printed habitat: Phase ii outcomes and phase III competition overview	2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition						
293	Qi et al., 2019	Machine Learning Algorithms on Density Prediction of Electron Beam Selective Melted Parts [基于机器学习的电子束选区熔化成形件密度预测]	Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering						
294	Quetzeri-Santiago et al., 2019	Additive manufacturing with liquid latex and recycled end-of-life rubber	3D Printing and Additive Manufacturing			X			
295	Quinn et al., 2019	The effect of metal EOS 316L stainless steel additive manufacturing powder recycling on part characteristics and powder reusability	Advances in Materials and Processing Technologies						
296	Quintana et al., 2018	Effects of Reusing Ti-6Al-4V Powder in a Selective Laser Melting Additive System Operated in an Industrial Setting	JOM	X			X		
297	Rahimizadeh et al., 2019	Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing	Composites Part B: Engineering			X			
298	Rahimizadeh et al., 2019	Recycled glass fiber composites from wind turbine waste for 3D printing feedstock: Effects of fiber content and interface on mechanical performance	Materials		X	X	X		

299	Rahito et al., 2019	Additive manufacturing for repair and restoration in remanufacturing: An overview from object design and systems perspectives	Processes	X				X	
300	Rau, 2019	3D printing: don't add to plastic pollution	Nature						
301	Razumov et al., 2019	Morphology of High-Strength Heat-Resistant Steel Powder for Machines for Additive Production from Shavings	Metal Science and Heat Treatment						
302	Reda et al., 2019	Polymer concrete	Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete						
303	Reddy & Raju, 2018	Design and Development of mini plastic shredder machine	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering						
304	Reich et al., 2019	Mechanical properties and applications of recycled polycarbonate particle material extrusion-based additive manufacturing	Materials			X			
305	Ribeyre et al., 2018	Measuring electrostatic properties of metallic powders with granucharge instrument	Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials - 2018: Proceedings of the 2018 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Material, POWDERMET 2018						
306	Roman et al., 2018	Solid-State Nanopore Easy Chip Integration in a Cheap and Reusable Microfluidic Device for Ion Transport and Polymer Conformation Sensing	ACS Sensors						
307	Romero-Alva et al., 2018	Design of a 3D Printer and Integrated Supply System	Proceedings of the 2018 IEEE 25th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2018	X		X	X		
308	Rossi et al., 2019	Design, assembly and operation of a primary Zinc-Air flow battery equipped with an automatic control system [Progettazione, costruzione ed esercizio di una batteria primaria a flusso zinco-aria equipaggiata con sistema di controllo automatico]	Metallurgia Italiana						
309	Ruan et al., 2019	Research progress in recycling and reuse of carbon fiber reinforced resin composites [碳纤维增强树脂基复合材料的回收及其再利用研究进展]	Fangzhi Xuebao/Journal of Textile Research						

310	Runaghan, 2019	The future city ecosystem	50 Forward 50 Back: The Recent History and Essential Future of Sustainable Cities - Proceedings of the CTBUH 10th World Congress							
311	Rusenova et al., 2018	Load-Bearing Capacity and Deformation of Jammed Architectural Structures	3D Printing and Additive Manufacturing							
312	Saboori et al., 2019	An investigation on the effect of powder recycling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by Directed Energy Deposition	Materials Science and Engineering A	X						
313	Saboori et al., 2019	Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair	Applied Sciences (Switzerland)							
314	Salehi et al., 2018	An investigation into interaction between magnesium powder and Ar gas: Implications for selective laser melting of magnesium	Powder Technology							
315	Samarjy & Kaplan, 2018	Additive manufacturing and recycling by a laser-induced drop jet from a sheet edge	Journal of Laser Applications							
316	Samarjy & Kaplan, 2017	Using laser cutting as a source of molten droplets for additive manufacturing: A new recycling technique	Materials and Design	X						
317	Sanchez et al., 2019	Multicatalysis Combining 3D-Printed Devices and Magnetic Nanoparticles in One-Pot Reactions: Steps Forward in Compartmentation and Recyclability of Catalysts	ACS Applied Materials and Interfaces							
318	Santander et al., 2020	Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach	Resources, Conservation and Recycling	X		X				
319	Santecchia et al., 2020	Material reuse in laser powder bed fusion: Side effects of the laser—metal powder interaction	Metals	X		X	X			
320	Sauerwein et al., 2019	Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy	Journal of Cleaner Production	X			X	X	X	
321	Sauerwein & Doubrovski, 2018	Local and recyclable materials for additive manufacturing: 3D printing with mussel shells	Materials Today Communications		X	X				X
322	Sawyer, 2016	Staying true to the mission of introducing technology	Manufacturing Engineering							

323	Scheitler et al., 2017	Laser metal deposition of NiTi shape memory alloy on Ti sheet metal: Influence of preheating on dissimilar build-up	Journal of Laser Applications						
324	Schirmeister et al., 2019	3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication	Additive Manufacturing	X					
325	Schmiege et al., 2018	Development and performance of a 3D-printable poly(ethylene glycol) diacrylate hydrogel suitable for enzyme entrapment and long-term biocatalytic applications	Engineering in Life Sciences						
326	Sears & Ho, 2018	Impact evaluation of in-space additive manufacturing and recycling technologies for on-orbit servicing	Journal of Spacecraft and Rockets						
327	Sgambati et al., 2018	Urban: Conceiving a lunar base using 3D printing technologies	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC	X					
328	Shah et al., 2018	Autonomous Robotic Vehicle for Oil Spills Cleaning with Nano Particles	MARSS 2018 - International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales						
329	Shakor et al., 2019	Heat curing as a means of postprocessing influence on 3D printed mortar specimens in powderbased 3D printing	Indian Concrete Journal						
330	Shi et al., 2017	Recyclable 3D printing of vitrimer epoxy	Materials Horizons						
331	Shi et al., 2018	Preparation and selective laser sintering of a new nylon elastomer powder	Rapid Prototyping Journal						
332	Shi et al., 2017	Renewable metal-organic-frameworks-coated 3D printing film for removal of malachite green	RSC Advances						
333	Sibisi et al., 2020	Review on direct metal laser deposition manufacturing technology for the Ti-6Al-4V alloy	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	X			X		
334	Sibisi et al., 2019	Morphological characterization of recycled powder and microstructures of Ti-6Al-4V components synthesized by LENS additive manufacturing	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering						
335	Sillani et al., 2019	Selective laser sintering and multi jet fusion: Process-induced modification of the raw materials and analyses of parts performance	Additive Manufacturing	X		X	X		
336	Silva et al., 2017	A Hybrid Processing Approach to the Manufacturing of Polyamide Reinforced Parts with Carbon Fibers	Procedia Manufacturing						

337	Singh et al., 2018	Additive Manufacturing of Syntactic Foams: Part 1: Development, Properties, and Recycling Potential of Filaments	JOM			X			
338	Singh et al., 2018	Recycling of polymer waste with SiC/Al ₂ O ₃ reinforcement for rapid tooling applications	Materials Today Communications			X			
339	Singh et al., 2019	Thermomechanical investigations of SiC and Al ₂ O ₃ -reinforced HDPE	Journal of Thermoplastic Composite Materials						
340	Singh et al., 2019	Metal matrix composite from recycled materials by using additive manufacturing assisted investment casting	Composite Structures						
341	Singh et al., 2019	Multi-material additive manufacturing of sustainable innovative materials and structures	Polymers						
342	Singh et al., 2019	Sustainability of Recycled ABS and PA6 by Banana Fiber Reinforcement: Thermal, Mechanical and Morphological Properties	Journal of The Institution of Engineers (India): Series C						
343	Singh et al., 2019	Investigations on 3D printed thermosetting and ceramic-reinforced recycled thermoplastic-based functional prototypes	Journal of Thermoplastic Composite Materials	X					
344	Singh et al., 2019	On the additive manufacturing of an energy storage device from recycled material	Composites Part B: Engineering			X			
345	Singh et al., 2019	Mechanical and morphological investigations of 3D printed recycled ABS reinforced with bakelite-SiC-Al ₂ O ₃	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science						
346	Singh et al., 2016	Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament	Measurement: Journal of the International Measurement Confederation			X			
347	Singh et al., 2017	Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review	Journal of Cleaner Production			X	X	X	X
348	Singh & Singh, 2016	Experimental investigations for use of nylon6 industrial waste as FDM feedstock filament for investment casting applications	Indian Journal of Engineering and Materials Sciences						
349	Slotwinski et al., 2014	Characterization of metal powders used for additive manufacturing	Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology						

350	Son et al., 2018	Closed-loop supply chain planning model of rare metals	Sustainability (Switzerland)			X			
351	Spoerk et al., 2019	Mechanical recyclability of polypropylene composites produced by material extrusion-based additive manufacturing	Polymers	X				X	
352	Stephen et al., 2018	Completing the value chain for plastic recyclers in Nigeria: An integration of renewable solar and conventional gas energy sources for fuel production	Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition 2018, NAIC 2018			X			
353	Stolz & Mülhaupt, 2020	Cellular, Mineralized, and Programmable Cellulose Composites Fabricated by 3D Printing of Aqueous Pastes Derived from Paper Wastes and Microfibrillated Cellulose	Macromolecular Materials and Engineering	X	X	X			
354	Stoof & Pickering, 2018	Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene	Composites Part B: Engineering						
355	Suárez & Domínguez, 2020	Sustainability and environmental impact of fused deposition modelling (FDM) technologies	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	X					
356	Sudbrack et al., 2018	Impact of powder variability on the microstructure and mechanical behavior of selective laser melted alloy 718	Minerals, Metals and Materials Series						
357	Sun et al., 2019	Vanadium redox flow batteries fabricated by 3D printing and employing recycled vanadium collected from ammonia slag	ECS Transactions						
358	Sun et al., 2018	The effect of recycling on the oxygen distribution in Ti-6Al-4V powder for additive manufacturing	Materials at High Temperatures						
359	Sundqvist & Samarjy, 2019	High-speed imaging of droplet behaviour during the CYCLAM drop-deposition technique	Procedia Manufacturing	X		X		X	X
360	Surrey et al., 2018	From powder to solid: The material evolution of Ti-6Al-4V during laser metal deposition	Key Engineering Materials						
361	Sutton et al., 2020	Characterization of AISI 304L stainless steel powder recycled in the laser powder-bed fusion process	Additive Manufacturing	X		X	X		
362	Svoboda et al., 2019	3D print application in furniture manufacturing	Digitalisation and Circular Economy: Forestry and Forestry Based Industry Implications - Proceedings of Scientific Papers						

363	Tahmasebinia et al., 2018	Three-dimensional printing using recycled high-density polyethylene: Technological challenges and future directions for construction	Buildings	X					
364	Tan et al., 2018	Microstructural characterization and properties of selective laser melted maraging steel with different build directions	Science and Technology of Advanced Materials						
365	Tan et al., 2017	An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process	Additive Manufacturing	X					
366	Tang et al., 2015	Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting	JOM						
367	Tang et al., 2019	Aging and Microstructure Evolution of Polyamide-12 during Selective Laser Sintering [激光选区烧结尼龙12的老化及微观结构演变]	Materials China						
368	Tauber et al., 2019	Design and mechanical performance of 3-D printed T-shaped rod connector manufactured by FDM technology	Digitalisation and Circular Economy: Forestry and Forestry Based Industry Implications - Proceedings of Scientific Papers	X					
369	Tebaldo & Faga, 2017	Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of titanium aluminides produced by electron beam melting	Journal of Materials Processing Technology						
370	Teixeira et al., 2018	Educational robotics insertion in high schools to promote environmental awareness about E-Waste	Proceedings - 15th Latin American Robotics Symposium, 6th Brazilian Robotics Symposium and 9th Workshop on Robotics in Education, LARS/SBR/WRE 2018				X		
371	Tempelman et al., 2014	Manufacturing and Design: Understanding the principles of how things are made	Manufacturing and Design: Understanding the principles of how things are made						
372	Terrassa et al., 2018	Reuse of powder feedstock for directed energy deposition	Powder Technology						
373	Thibaut et al., 2019	A fibrous cellulose paste formulation to manufacture structural parts using 3D printing by extrusion	Carbohydrate Polymers		X				
374	Thomas et al., 2019	3D printed spacers based on TPMS architectures for scaling control in membrane distillation	Journal of Membrane Science						

375	Thotakura et al., 2020	Evaluation of structure and magnetic properties of maraging steel powder feedstock for additive manufacturing of magnetic components	Journal of Alloys and Compounds						
376	Tian et al., 2017	Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites	Journal of Cleaner Production			X		X	
377	Ting et al., 2019	Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties	Journal of Material Cycles and Waste Management	X	X	X			
378	Tonn & Stiefel, 2014	Willow pond: A decentralized low-carbon future scenario	Futures						
379	Tradowsky et al., 2016	Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development	Materials and Design						
380	Trombettoni et al., 2018	Recent advances in sulfonated resin catalysts for efficient biodiesel and bio-derived additives production	Progress in Energy and Combustion Science						
381	Tubío et al., 2016	3D printing of a heterogeneous copper-based catalyst	Journal of Catalysis						
382	Tur et al., 2019	Beverage Container Collecting Machine Project	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science			X		X	
383	Turku et al., 2018	Characterization of polystyrene wastes as potential extruded feedstock filament for 3D printing	Recycling	X		X			
384	Turner et al., 2019	Sustainable production in a circular economy: A business model for re-distributed manufacturing	Sustainability (Switzerland)	X				X	X
385	Ujeniya & Rachchh, 2019	A review on Manufacturing, Machining, and recycling of 3D printed composite materials.	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering		X				
386	ul et al., 2019	Removal of SiC from Silicon After Electron Beam Melting Technique on Industrial Scale	Silicon						
387	Unruh, 2018	Circular Economy, 3D Printing, and the Biosphere Rules	California Management Review	X					X
388	van et al., 2017	Concepts for external light trapping and its utilization in colored and image displaying photovoltaic modules	Progress in Photovoltaics: Research and Applications						

389	van et al., 2015	3D printing with biomaterials: Towards a sustainable and circular economy	3D Printing with Biomaterials: Towards a Sustainable and Circular Economy	X	X					X
390	Veer et al., 2017	The strength and ductility of glass fibre reinforced 3D-printed polypropylene	Heron							
391	Voet et al., 2018	Biobased Acrylate Photocurable Resin Formulation for Stereolithography 3D Printing	ACS Omega	X	X					
392	Volfson et al., 2019	Effect of the technological additives on the properties of recycled polyolefins	Key Engineering Materials							
393	Vutova et al., 2011	Electron Beam Melting and Recycling of Hafnium	Supplemental Proceedings: General Paper Selections							
394	Waheed et al., 2019	Three-Dimensional Printing of Abrasive, Hard, and Thermally Conductive Synthetic Microdiamond-Polymer Composite Using Low-Cost Fused Deposition Modeling Printer	ACS Applied Materials and Interfaces							
395	Walachowicz et al., 2017	Comparative Energy, Resource and Recycling Lifecycle Analysis of the Industrial Repair Process of Gas Turbine Burners Using Conventional Machining and Additive Manufacturing	Journal of Industrial Ecology	X					X	
396	Walde et al., 2019	Characterizing the Effect of Thermal Processing on Feedstock Al Alloy Powder for Additive Manufacturing Applications	Journal of Materials Engineering and Performance							
397	Walsh et al., 2018	Progress in electrochemical flow reactors for laboratory and pilot scale processing	Electrochimica Acta							
398	Wang et al., 2020	Influence of spatter particles contamination on densification behavior and tensile properties of CoCrW manufactured by selective laser melting	Optics and Laser Technology							
399	Wang et al., 2018	Closed-loop recycling of polyamide12 powder from selective laser sintering into sustainable composites	Journal of Cleaner Production	X		X	X			
400	Wang et al., 2019	Investigating the machinability of 3D printed recycled carbon fiber	International SAMPE Technical Conference							
401	Wang et al., 2019	Investigating the void content, fiber content, and fiber orientation of 3D printed recycled carbon fiber	Key Engineering Materials							

402	Wang et al., 2017	Multi-mode Switching Control System for Hybrid Suspension Based on Model Reference	Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery						
403	Wang et al., 2020	Friction Stir Processing of Magnesium Alloys: A Review	Acta Metallurgica Sinica (English Letters)						
404	Wang et al., 2019	Aging Behavior of TC4 Titanium Alloy Powder Recycled in Selective Laser Melting Process [TC4钛合金粉末在SLM工艺中的循环老化行为]	Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering						
405	Watson & Taminger, 2018	A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption	Journal of Cleaner Production	X					
406	Whyman et al., 2018	Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets	International Journal of Advanced Manufacturing Technology						
407	Wilkinson & Cope, 2015	3D Printing and Sustainable Product Development	Green Information Technology: A Sustainable Approach	X	X	X		X	
408	Windows-Yule et al., 2020	Particle distributions in binary gas-fluidised beds: Shape matters – But not much	Chemical Engineering Science						
409	Wlodarczyk et al., 2017	3D processing of (bio)degradable materials	Current Advances in Biopolymer Processing and Characterization						
410	Woern et al., 2018	Fused particle fabrication 3-D printing: Recycled materials' optimization and mechanical properties	Materials	X		X			
411	Woern et al., 2018	RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament	HardwareX			X			
412	Woern & Pearce, 2018	3-D printable polymer pelletizer chopper for fused granular fabrication-based additive manufacturing	Inventions						
413	Wolff, 2014	A pathway to approval for additive-made devices: Devices made with additive manufacturing techniques often replace a similar, or predicate, device made in a different manner	Manufacturing Engineering						
414	Wörner et al., 2016	The technology of graded concrete – From the development of concrete mixtures and the conceptual design to the automatized manufacturing [Gradientenbetontechnologie: Von der	Beton- und Stahlbetonbau						

		Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung]							
415	Wu, 2019	Education for environment sustainability: 3D printing's role in transformation of plastic industry	International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology	X		X			
416	Wu & Wu, 2019	The role of educational action research of recycling process to the green technologies, environment engineering, and circular economies	International Journal of Recent Technology and Engineering	X		X			X
417	Xu et al., 2017	Long-fiber reinforced thermoplastic composite lattice structures: Fabrication and compressive properties	Composites Part A: Applied Science and Manufacturing						
418	Xu et al., 2018	Environment-friendly and reusable ink for 3D printing of metallic structures	Materials and Design	X			X		
419	Xu et al., 2020	Fabrication on a recycled and wide-band absorber by 3d printing	Materials Science Forum						
420	Yang et al., 2020	Waste paper-derived magnetic carbon composite: A novel eco-friendly solid acid for the synthesis of n-butyl levulinate from furfuryl alcohol	Renewable Energy						
421	Yang et al., 2014	Advanced shape memory technology to reshape product design, manufacturing and recycling	Polymers						
422	Yang et al., 2019	Design and experiment of integrated pressure-compensating emitter made of thermoplastic elastomer [一体化压力补偿式热塑性弹性材质滴头设计与试验]	Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering						
423	Ye et al., 2019	A Versatile Approach for Enzyme Immobilization Using Chemically Modified 3D-Printed Scaffolds	ACS Sustainable Chemistry and Engineering						
424	Yi et al., 2018	Fully Water-Soluble, High-Performance Transient Sensors on a Versatile Galactomannan Substrate Derived from the Endosperm	ACS Applied Materials and Interfaces						
425	Yu et al., 2019	Fabrication of 4N5 grade tantalum wire from tantalum scrap by EBM and drawing	Archives of Metallurgy and Materials						
426	Yüce et al., 2019	Quantitative inkjet application on self-printed, binder-free HPTLC layers for	Analytica Chimica Acta						

		submicromole-scaled analytical 1H NMR spectroscopy							
427	Yuzhakova et al., 2017	Modeling of regeneration process of special alloys' spent powders after layer-by-layer manufacturing of polymetallic products	Tsvetnye Metally						
428	Zaccardi et al., 2019	Space-grade polyethylene/carbon nanocomposites fabricated by 3D-printing	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC						
429	Zakirov & Tyagunin, 2019	The hardware-software complex for the processing of plastic waste to the filament for a 3D printer	AIP Conference Proceedings						
430	Zampetakis et al., 2020	Cactus-based solids and bio-composites for energy dissipation in defence and biomedical applications.	ECCM 2018 - 18th European Conference on Composite Materials						
431	Zander, 2019	Recycled Polymer Feedstocks for Material Extrusion Additive Manufacturing	ACS Symposium Series	X		X	X		
432	Zander & Gillan, 2018	3D printing feedstocks from recycled materials	Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings						
433	Zander et al., 2019	Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials	Additive Manufacturing	X		X			
434	Zander et al., 2018	Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material	Additive Manufacturing	X		X			
435	Zander et al., 2019	Recycled cellulose polypropylene composite feedstocks for polymer additive manufacturing	Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings						
436	Zander et al., 2019	Recycled Cellulose Polypropylene Composite Feedstocks for Material Extrusion Additive Manufacturing	ACS Omega		X	X			
437	Zapico et al., 2019	Characterisation of 17-4PH metallic powder recycling to optimise the performance of the selective laser melting process	Journal of Materials Research and Technology	X	X	X	X		
438	Zhang et al., 2018	Reprocessable thermosets for sustainable three-dimensional printing	Nature Communications			X	X	X	
439	Zhang et al., 2019	Novel 3d printed device for dual-signaling ratiometric photoelectrochemical readout of biomarker using λ -exonuclease-assisted recycling amplification	Analytical Chemistry						

440	Zhang et al., 2017	Carbon Emissions Quantitative Methodology of Product Fused Deposition Manufacturing	Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering						
441	Zhang et al., 2019	3D printing of thermoreversible polyurethanes with targeted shape memory and precise in situ self-healing properties	Journal of Materials Chemistry A						
442	Zhao et al., 2018	Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment	Journal of Cleaner Production			X			
443	Zhao et al., 2018	Enhanced mechanical properties of self-polymerized polydopamine-coated recycled PLA filament used in 3D printing	Applied Surface Science						
444	Zhong & Pearce, 2018	Tightening the loop on the circular economy: Coupled distributed recycling and manufacturing with recyclebot and RepRap 3-D printing	Resources, Conservation and Recycling	X		X			X
445	Zhou et al., 2019	A novel 3D-printable hydrogel with high mechanical strength and shape memory properties	Journal of Materials Chemistry C						
446	Zhu et al., 2019	Effect of Powder Aging on Tensile Properties of Selective Laser Sintering PA2200	Gaofenzi Cailiao Kexue Yu Gongcheng/Polymeric Materials Science and Engineering						