



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

**ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

Διαχείριση Διαδικασιών σε Ιατρικές Εφαρμογές με τη χρήση Τρισδιάστατων Τεχνικών

Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Διπλωματική Εργασία

Γεώργιος Άγγελος Σπυρόπουλος

Σχολή Ναυτιλίας και Βιομηχανίας

Αθήνα, Ελλάδα 2023

www.tex.unipi.gr

Διπλωματική Εργασία 2023

Διαχείριση Διαδικασιών σε Ιατρικές Εφαρμογές με τη χρήση Τρισδιάστατων Τεχνικών

Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Γεώργιος Άγγελος Σπυρόπουλος



Σχολή Ναυτιλίας και Βιομηχανίας
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Αθήνα, Ελλάδα 2023

**Διαχείριση Διαδικασιών σε Ιατρικές Εφαρμογές με τη χρήση
Τρισδιάστατων Τεχνικών**

© Γεώργιος Άγγελος Σπυρόπουλος, 2023.

Επιβλέπων

Δρ. Καραλέκας Δημήτριος
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Χονδροκούκης Γρηγόριος
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Δρ. Χατζηνταή Νικολέτα
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Διπλωματική Εργασία 2023
Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Σχολή Ναυτιλίας και Βιομηχανίας
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας

Διαχείριση Διαδικασιών σε Ιατρικές Εφαρμογές με τη χρήση Τρισδιάστατων Τεχνικών

Γεώργιος Άγγελος Σπυρόπουλος
Σχολή Ναυτιλίας και Βιομηχανίας
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Περίληψη

Οι τρισδιάστατες τεχνικές είναι μία τεχνολογία που μπορεί να φέρει επανάσταση στον ιατρικό τομέα όσον αφορά την προσαρμογή και την εξατομίκευση. Διάφορες μελέτες και εν εξελίξει πρακτικές, που πληθαίνουν όλο και περισσότερο, έχουν αποδείξει τις δυνατότητες των τρισδιάστατων τεχνικών στην ιατρική. Παρόλα αυτά, για να μπορέσουν να υιοθετηθούν θα πρέπει να εξεταστεί η επίπτωση στις διαδικασίες, που μπορεί να συμβάλουν με τον βέλτιστο τρόπο. Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει πως με τη χρήση τρισδιάστατων τεχνικών διαχειρίζονται οι διαδικασίες στον ιατρικό τομέα.

Αρχικά, αναλύθηκε η τρισδιάστατη τεχνική της προσθετικής κατασκευής ή αλλιώς της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η βιβλιογραφική έρευνα κατέδειξε τις διεργασίες προσθετικής κατασκευής, εστιάζοντας στη συνέχεια στις χρήσεις της στον ιατρικό τομέα, όπου παρατηρήθηκε η αύξηση των δημοσιεύσεων τα τελευταία χρόνια. Με την χρήση της παρούσας βιβλιογραφίας, ταξινομήθηκαν οι ιατρικές εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής σε πέντε τομείς και αναλύθηκαν οι χρήσεις τους. Στη συνέχεια, εντοπίστηκε και αναλύθηκε η διαδικασία της παραγωγής προσθετικής κατασκευής για ένα ιατρικό προϊόν.

Για να υπάρξει η υιοθέτηση της προσθετικής κατασκευής στην ιατρική θα πρέπει να υπάρξει μελέτη για τις επιπτώσεις της στις ήδη υπάρχουσες διαδικασίες και η δυνατότητά της για την μεταμόρφωσή τους. Κατα συνέπεια, έξι παράγοντες διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στο αντίκτυπο των διαδικασιών διαχείρισης της προσθετικής κατασκευής. Η γέννηση ενός υβριδικού ρόλου επηρεάζει το ιατρικό οικοσύστημα και η εκάστοτε διοίκηση του κάθε οργανισμού βρέθηκε πως θα είναι από τους βασικούς παράγοντες υιοθέτησής της.

Τέλος, με την χρήση της αντίστροφης μηχανικής-τρισδιάστατης σάρωσης πραγματοποιήθηκε το πειραματικό στάδιο της σάρωσης ενός μοντέλου ανθρώπινου μηριαίου οστού και με την βοήθεια σχεδιστικού λογισμικού και της τρισδιάστατης εκτύπωσης, τυπώθηκε μία χειρουργική πλάκα.

Λέξεις Κλειδιά: Προσθετική μηχανική, ιατρικός τομέας, διαχείριση διαδικασιών, αντίστροφη μηχανική, τρισδιάστατη σάρωση, τρισδιάστατη εκτύπωση

Process management in medical applications with the use of 3D Techniques

Georgios Angelos Spyropoulos
School of Maritime and Industrial Studies
Department of Industrial Science and Technology
University of Piraeus

Abstract

3D techniques are a technology that can revolutionise the medical field in terms of customisation and personalisation. Various studies and ongoing practices, which are becoming more and more numerous, have demonstrated the potential of 3D techniques in medicine. However, before they can be adopted, their impact on the procedures that they can contribute optimally must be considered. The purpose of this thesis is to examine, using 3D techniques, the management of procedures in the medical field.

To begin with, the three-dimensional technique of additive manufacturing, or 3D printing, was discussed. The literature survey demonstrated the processes of additive manufacturing, then focusing on its uses in the medical field, which has seen an increase in publications in recent years. Using this literature, the medical applications of additive manufacturing were classified into five areas and their uses were analysed. Then, the process of additive manufacturing for a medical product was identified and analysed.

For the adoption of additive manufacturing in medicine there needs to be a study of its impact on existing procedures and its potential to transform them. Consequently, six factors play a vital role in the impact of prosthetic manufacturing management processes. The birth of a hybrid role affects the medical ecosystem and the respective management of each organization was found to be one of the key factors for its adoption.

Finally, using reverse engineering-3D scanning, the experimental stage of scanning a human femur model was carried out and with the help of a design software and 3D printing, a surgical plate was printed.

Keywords: *Additive Manufacturing, medical sector, process management, reverse engineering, 3D scanning, 3D printing*

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τον καθηγητή και επιβλέποντά μου, Δημήτριο Καραλέκα, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, για τις παροχές και για τις συμβουλές του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Κυριώς όμως θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την υποστήριξή του, όλο τον κόπο και την όμορφη διάθεση που μου έδωσε καθόλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου και της διπλωματικής μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκάρδια την Κωνσταντίνα Μάτσικα που χωρίς αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί αυτή η διπλωματική. Χάρης στην Κωνσταντίνα, τις ιδέες και την καθοδήγησή της, πραγματοποιήθηκαν όλες οι τρισδιάστατες εκτυπώσεις, οι τρισδιάστατες σαρώσεις καθώς και οι μοντελοποιήσεις.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω με όλη μου την ψυχή τον Α. Σιδερή που με βοήθησε και με συμβούλεψε στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και όσο τίποτα την Κ. Παλάσκα που ήταν δίπλα μου σε κάθε βήμα, υποστηρίζοντάς με με όλη της την δύναμη και με έκανε να πιστέψω στον εαυτό μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που πίστεψαν σε μένα και με υποστήριξαν με χαμόγελο και τέλος τους γονείς μου, τους πιο λαμπρούς ανθρώπους του κόσμου, που χωρίς αυτούς δεν θα είχα καταφέρει να πραγματοποιήσω αυτό το μεταπτυχιακό.

Άγγελος Σπυρόπουλος, Αθήνα, Ιούλιος 2023

Περιεχόμενα

1	Η προσθετική κατασκευή	1
1.1	Ιστορική αναδρομή	1
1.2	Προσθετική κατασκευή (Τρισδιάστατη εκτύπωση)	2
1.3	Διεργασίες Προσθετικής Κατασκευής	4
1.3.1	Φωτοπολυμερισμός VAT – <i>VAT photo polymerisation</i>	4
1.3.2	Εκτόξευση υλικού – <i>Material jetting</i>	4
1.3.3	Εκτόξευση συνδετικού υλικού – <i>Binder jetting</i> . .	5
1.3.4	Σύντηξη στρώματος σκόνης – <i>Powder bed fusion</i> .	5
1.3.5	Εξώθηση υλικού – <i>Material extrusion</i>	5
1.3.6	Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας – <i>Directed energy deposition</i>	5
1.3.7	Εναπόθεση φύλλων – <i>Sheet lamination</i>	5
2	Η προσθετική κατασκευή στον ιατρικό τομέα	7
2.1	Η προσθετική κατασκευή στην ιατρική και την ορθοπαιδική	7
2.2	Ιατρικές εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής	8
2.2.1	Ιατρικά μοντέλα	9
2.2.2	Εξατομικευμένα εμφυτεύματα	10
2.2.3	Εργαλεία, όργανα και εξαρτήματα για ιατρικές συσκευές	11
2.2.4	Βοηθήματα, οδηγοί στήριξης, νάρθηκες και προσθετικά	12
2.2.5	Βιοκατασκευή	12
2.3	Διαδικασία παραγωγής των ιατρικών εφαρμογών της προσθετικής κατασκευής	12
3	Διαχείριση διαδικασιών της Προσθετικής Κατασκευής	17
3.1	Εισαγωγή	17
3.2	Η προσθετική κατασκευή στη διαχείριση διαδικασιών . .	18

3.3	Βασικοί παράγοντες διαχείρισης που επηρεάζουν τις διαδικασίες χρήσης της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα	19
3.3.1	Γενικά οφέλη	20
3.3.2	Αποτελέσματα για τους ασθενείς	20
3.3.3	Ηγεσία και Διοίκηση	21
3.3.4	Κανονισμοί	22
3.3.5	Εφοδιαστική Αλυσίδα	22
3.3.6	Οικονομικά και χρηματοδότηση	23
4	Αντίστροφη μηχανική - Τρισδιάστατη σάρωση σε ιατρικές εφαρμογές	25
4.1	Αντίστροφη μηχανική	25
4.2	Τεχνικές τρισδιάστατης σάρωσης	25
4.3	Η τρισδιάστατη σάρωση στον ιατρικό τομέα	27
4.3.1	Πολυπλοκότητα	29
4.3.2	Χρόνος	29
4.3.3	Κόστος	29
4.3.4	Δεδομένα	30
4.3.5	Υλικά εκτύπωσης	30
4.4	Τρισδιάστατη σάρωση και αντίστροφη μηχανική ανθρώπινου μηριαίου οστού	31
4.4.1	Τρισδιάστατη σάρωση του μηριαίου οστού	31
4.4.2	Μετεπεξεργασία των δεδομένων στο περιβάλλον EXScan S	35
5	Σχεδιασμός εξατομικευμένης χειρουργικής πλάκας και τρισδιάστατη εκτύπωση	37
5.1	Σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου χειρουργικής πλάκας	37
5.1.1	Στερεή μοντελοποίηση (Solid Modeling)	37
5.1.1.1	Εισαγωγή αρχείου STL του μηριαίου οστού	38
5.1.1.2	Κατασκευή εξατομικευμένης χειρουργικής πλάκας πάνω στην επιφάνεια του μηριαίου οστού	39
5.1.2	Τεμαχισμός (Slicing)	42
5.1.3	Τρισδιάστατη εκτύπωση της χειρουργικής πλάκας	43

6	Επίλογος και μελλοντικές εφαρμογές	47
6.1	Το μέλλον	49
	Βιβλιογραφία	51
A'	Ξενογλωσσικοί Όροι - Ακρώνυμα - Συντομεύσεις	I

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Το χρονοδιάγραμμα της ανάπτυξης της προσθετικής κατασκευής και της βιοεκτύπωσης στον ιατρικό τομέα κατά Ghomi et al.	3
1.2	Διεργασίες προσθετικής κατασκευής κατά ASTM International	6
2.1	Επισκόπηση των προϊόντων τελικής χρήσης της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα	8
2.2	Διαδικασία παραγωγής της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα	13
3.1	Η συνάρτηση κόστους σε σχέση με τις μονάδες παραγωγής	23
3.2	Η συνάρτηση κόστους σε σχέση με την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού	24
4.1	Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής και της τρισδιάστατης σάρωσης	26
4.2	Δημοσιεύσεις για την τρισδιάστατη εκτύπωση στον ιατρικό τομέα μέχρι το 2018	29
4.3	Ρόη εργασίας και σύνδεση της τρισδιάστατης σάρωσης με την τρισδιάστατη εκτύπωση	30
4.4	Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Flashforge Creator 3 που πραγματοποιήθηκαν οι τρισδιάστατες εκτυπώσεις, διαθέσιμος προς του φοιτητές στο Εργαστήριο Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς	32
4.5	Διαδικασία εκτύπωσης του ανθρώπινου μηριαίου οστού	32
4.6	Τοποθέτηση και σταθεροποίηση του μηριαίου οστού στο δίσκο περιστροφής του Einscan SE	34
5.1	Απεικόνιση του μηριαίου οστού στο περιβάλλον του Autodesk Fusion 360	38
5.2	Απεικόνιση της αρχής της διαδικασίας σχεδίασης της πλάκας στο Autodesk Fusion 360	39

5.3	Απεικόνιση της συμβατότητας των επιφανειών πλάκας και οστού	40
5.4	Διαγώνια όψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα	40
5.5	Κάτοψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα	41
5.6	Πλάγια όψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα	41
5.7	Μπροστινή όψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα	41
5.8	Κάτοψη και πλαινή όψη της πλάκας	42
5.9	Η μετατροπή του κώδικα STL σε GCODE	43
5.10	Η τρισδιάστατα τυπωμένη χειρουργική πλάκα	45
5.11	Η τρισδιάστατα τυπωμένη χειρουργική πλάκα πάνω στο μηριαίο οστό	45

1

Η προσθετική κατασκευή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο *Hideo Kodama* από το *Nagoya Municipal Industrial Research Institute* έδωσε στη δημοσιότητα πληροφορίες σχετικά με τη δημιουργία ενός στερεού εκτυπωμένου μοντέλου για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων τη δεκαετία του 1980, γεγονός που σηματοδοτεί την αρχή της ιστορίας της προσθετικής κατασκευής. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια μέθοδο κατασκευής στερεολιθογραφίας, στην οποία τα στρώματα δημιουργούνται με τη σκλήρυνση φωτοπολυμερών με λέιζερ υπεριώδους φωτός, δόθηκε στον *Charles Hull* το 1986.

Εκείνη την εποχή, η προσθετική κατασκευή *Additive Manufacturing - AM*) εξελίχθηκε από μια νέα τεχνική που χρησιμοποιούνταν από μικρό αριθμό ατόμων σε μια κοινή τεχνολογία. Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιήθηκε κυρίως στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού προϊόντων κατά τα πρώτα χρόνια (1990-2000) για την ανάπτυξη μοντέλων οπτικής εμφάνισης, πλακέτων ηλεκτρονικών δοκιμών, τεχνολογικών πρωτοτύπων και τη μελέτη των λεγόμενων γρήγορων εργαλείων. Οι διεργασίες κρίθηκαν έτοιμες να υποστηρίξουν τη σειριακή κατασκευή κατασκευασμένων εξαρτημάτων στις αρχές της δεκαετίας του 2010.

Τα τελευταία χρόνια, οι προηγμένες μέθοδοι προσθετικής κατασκευής έχουν εξελιχθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στη βιομηχανία, ιδίως στην ανάπτυξη προϊόντων και στην κατασκευή τελικών εξαρτημάτων προοριζόμενα για τους τελικούς χρήστες. Οι μελλοντικές χρήσεις αναμένεται να περιλαμβάνουν μαζική κατασκευή, παραγωγή τελικών προϊόντων και κυρίως τρισδιάστατους εκτυπωτές για το ευρύ καταναλωτικό κοινό.

1.2 Προσθετική κατασκευή (Τρισδιάστατη εκτύπωση)

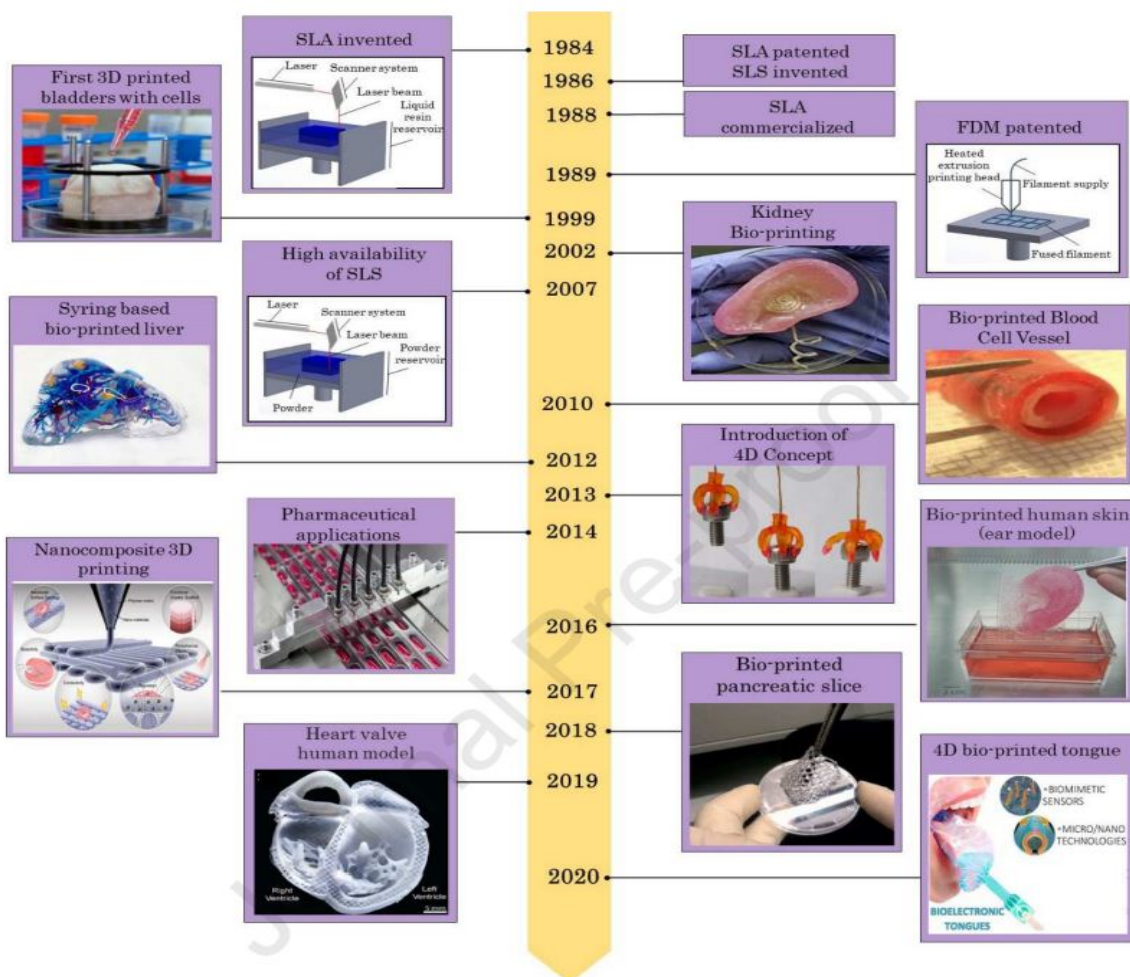
Η προσθετική κατασκευή, ή περιγραφόμενη από άλλο όρο, η *τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing)*, με βάση την επιτροπή ASTM, είναι μια διαδικασία σύνθεσης υλικών για την κατασκευή αντικειμένων από δεδομένα ενός τρισδιάστατου μοντέλου (*3D Model*), συνήθως στρώμα σε στρώμα, αντίθετα με τις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής υλικών [1]. Κατά την επιτροπή ASTM-F42 υπήρξαν διάφορες ονομασίες για την προσθετική κατασκευή κατά τη διάρκεια της σύγχρονης εξέλιξής της, συμπεριλαμβανομένων των: προσθετικών διαδικασιών, κατασκευής ελεύθερης μορφής καθώς και της γρήγορης παρασκευής. Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται και διερευνάται για χρήση σε τομείς όπως η ιατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η θαλάσσια βιομηχανία, καθώς και για βιομηχανικά ανταλλακτικά [2].

Χρησιμοποιώντας την παρούσα βιβλιογραφία για την προσθετική κατασκευή, θα αναφερθούμε στα πλεονεκτήματα και στους περιορισμούς, καθώς και στη σύγκρισή της με την συμβατική κατασκευή υλικών. Η προσθετική κατασκευή παρέχει τη δυνατότητα εξατομίκευσης με μικρότερο κόστος καθώς χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια. Όσον αφορά το περιβάλλον και την ανακύκλωση των υλικών, η παραγωγή αποβλήτων κατά την κατασκευή είναι σημαντικά λιγότερη από την αντίστοιχη της συμβατικής κατασκευής [3]. Επίσης, δεν απαιτούνται εξαρτήματα ή εργαλεία για το σχεδιασμό ενός προϊόντος προσθετικής κατασκευής, ανεξαρτήτως του τομέα για τον οποίο προορίζεται η χρήση του. Ο χρόνος δημιουργίας για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μπορεί να μειωθεί σημαντικά με ισχυρές ικανότητες χρήσης του αντίστοιχου λογισμικού. Η αναθεώρηση του τελικού προϊόντος μπορεί απλά να τροποποιηθεί από τον κατασκευαστή σε εύλογα μικρό χρονικό διάστημα [4, 5].

Δεν θα μπορούσαμε να μην αναφερθούμε και στους περιορισμούς της προσθετικής κατασκευής. Αρχικά, το κόστος παραγωγής κάθε προϊόντος μπορεί να είναι αρκετά υψηλό, καθώς οι πρώτες ύλες μπορεί να είναι ακριβές ή μικρής παραγωγής και κατά συνέπεια, μικρού οικονομικού μεγέθους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, απαιτούνται εξειδικευμένοι άνθρωποι πόροι για το χειρισμό των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης και τον σχεδιασμό με την βοήθεια υπολογιστή (*Computer Aided Design-CAD*) [6]. Η διαδικασία παραγωγής-εκτύπωσης, υπό κανονικές συνθήκες, δεν μπορεί να διακοπεί και τα υλικά θα πρέπει να απορριφθούν και να καταστραφούν σε περίπτωση παύσης. Τέλος, η παραδοσιακή τεχνι-

κή κατασκευής είναι συχνά σημαντικά ταχύτερη στη μαζική παραγωγή από την τρισδιάστατη εκτύπωση και το μέγεθος του παραγόμενου προϊόντος περιορίζεται από το μέγεθος της κλίνης εκτύπωσης [4]. Ενώ οι παραπάνω περιορισμοί αναφέρονται στα γενικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου, σε κλινικές εφαρμογές όπου αναφερόμαστε κυρίως σε μοναδικές είτε μικρές ποσότητες παραγωγής καθώς και σε μικρές διαστάσεις, η ταχύτητα και το μέγεθος δεν παίζουν σημαντικό ρόλο[7].

Προχωρώντας προς το μέλλον, παρόλο που οι βασικές αρχές των διαφόρων διεργασιών προσθετικής κατασκευής έχουν παραμείνει οι ίδιες, υπάρχουν τώρα περισσότεροι πόροι ανάπτυξης για να γίνει το επόμενο βήμα για αυτές τις τεχνολογίες, κάτι που θα ανοίξει το δρόμο σε νέες δυνατότητες στις ιατρικές εφαρμογές [8, 9]. Αυτό αποτυπώνεται και στην ραγδαία εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης για ιατρικές εφαρμογές, ιδίως από το 2012 και έπειτα όπως φαίνεται στην χρονική αναπαράσταση του σχήματος 1.1



Σχήμα 1.1: Το χρονοδιάγραμμα της ανάπτυξης της προσθετικής κατασκευής και της βιοεκτύπωσης στον ιατρικό τομέα κατά Ghomi et al.[8]

1.3 Διεργασίες Προσθετικής Κατασκευής

Οι διεργασίες προσθετικής κατασκευής μπορούν να χωριστούν σε επτά κύριες κατηγορίες που χρησιμοποιούν ως βάση, την ίδια αρχιτεκτονική και για τις οποίες οι φυσικές διεργασίες μετασχηματισμού των υλικών είναι παρόμοιες, όπως περιγράφεται από το ASTM κατά ISO 52900-2015 [1].

- Φωτοπολυμερισμός VAT — *VAT photo polymerisation*
- Εκτόξευση υλικού — *Material jetting*
- Εκτόξευση συνδετικού υλικού — *Binder jetting*
- Σύντηξη στρώματος σκόνης — *Powder bed fusion*
- Εξώθηση υλικού — *Material extrusion*
- Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας — *Directed energy deposition*
- Εναπόθεση φύλλων — *Sheet lamination*

Παρακάτω παρατίθενται η κάθε μία εξ' αυτών:

1.3.1 Φωτοπολυμερισμός VAT — *VAT photo polymerisation*

Με τη χρήση μιας πηγής φωτός, ένα υγρό φωτοπολυμερές κλεισμένο σε ένα δοχείο (ή δεξαμενή) σκληρύνεται επιλεκτικά. Η πλάκα δόμησης μετατοπίζεται κατακόρυφα μετά τον πολυμερισμό κάθε στρώματος ρητίνης, ώστε ο κύκλος να συνεχιστεί μέχρι να ολοκληρωθεί. Η απόσταση αυτή καθορίζεται εκ των προτέρων στις παραμέτρους παραγωγής. Ανάλογα με τον τύπο της πηγής φωτός (όπως λέιζερ ή υπεριώδες φως) και την κατεύθυνση προς την οποία κινείται η πλάκα, υπάρχουν διάφορες παραλλαγές.

1.3.2 Εκτόξευση υλικού — *Material jetting*

Η τεχνική χρησιμοποιεί κεφαλές εκτύπωσης που αφήνουν σταγονίδια υλικού στο επίπεδο του χώρου παραγωγής, όπως ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Οι φωτοευαίσθητες ρητίνες και τα κεριά σε υγρή μορφή είναι οι δύο τύποι υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

1.3.3 Εκτόξευση συνδετικού υλικού — *Binder jetting*

Βασίζεται σε μια εναπόθεση, όπως ακριβώς και η εκτόξευση υλικού. Στην περίπτωση αυτή, μια κλίνη σκόνης χρησιμεύει ως στήριγμα για το προϊόν επιτρέποντας την επιλεκτική εναπόθεση ενός υγρού συνδετικού παράγοντα. Η τεχνική εκτόξευσης συνδετικού υλικού λειτουργεί με μια ποικιλία υλικών, όπως κεραμικά, μέταλλα και πολυμερή. Ωστόσο, επειδή τα κομμάτια είναι συχνά εύθραυστα, είναι απαραίτητο ένα στάδιο μετεπεξεργασίας.

1.3.4 Σύντηξη στρώματος σκόνης — *Powder bed fusion*

Οι ακτίνες λέιζερ ή ηλεκτρονίων χρησιμοποιούνται στις τεχνικές σύντηξης κλίνης σκόνης για να λιώσουν και να συντηρήσουν τις σκόνες υλικών μεταξύ τους και να τα ενοποιήσουν. Οποιαδήποτε υλικά με βάση τη σκόνη μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία σύντηξης σε κλίνη σκόνης. Τα μεταλλικά μέρη που δημιουργούνται πρέπει να υποβάλλονται σε μεταγενέστερη επεξεργασία προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η μηχανική τους συμπεριφορά.

1.3.5 Εξώθηση υλικού — *Material extrusion*

Η διαδικασία περιλαμβάνει τη θέρμανση θερμοπλαστικού πολυμερούς υλικού πάνω από το σημείο τήξης του και την εξώθησή του μέσω ενός ακροφυσίου. Ένα δεύτερο ακροφύσιο στις μηχανές μοντελοποίησης με σύντηξη εναπόθεσης υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξώθηση του υλικού στήριξης που απαιτείται για την παραγωγή περίπλοκα διαμορφωμένων εξαρτημάτων ή για την παραγωγή τεμαχίων από πολλαπλά υλικά χωρίς στήριξη.

1.3.6 Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας — *Directed energy deposition*

Μια επιφάνεια ρευστοποιείται με τη χρήση μιας πηγής ενέργειας και ταυτόχρονα, ένα νήμα υλικού τροφοδοτείται στη λιωμένη περιοχή, ενώ υπάρχει αέριο προστασίας.

1.3.7 Εναπόθεση φύλλων — *Sheet lamination*

Για τη δημιουργία μίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, φύλλα ή πλάκες υλικού τεμαχίζονται σε μικρότερα κομμάτια με τη χρήση μίας συσκευής κοπής (όπως λέιζερ, κάποιο κοπτικό εργαλείο, ή συγκόλληση με υπερήχους), στοιβάζονται και στη συνέχεια ενώνονται μεταξύ τους με α-

πλή συγκόλληση ή συγκόλληση με υπερήχους. Σε αυτήν την διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε υλικό είναι διαθέσιμο σε μορφή λεπτού φύλλου.

Classification	Technology	Description	Materials
Binder Jetting	3D Printing Ink-jetting S-Print M-Print	Created objects by depositing a binding agent to join powdered material.	Metal, Polymer, Ceramic
Direct Energy Deposition	Direct Metal Deposition Laser Deposition Laser Consolidation Electron Beam Direct Melting	Builds parts by using focused thermal energy to fuse materials as they are deposited on a substrate.	Metal, Powder and Wire
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling	Creates objects by dispensing material through a nozzle to build layers.	Polymer
Material Jetting	Polyjet Ink-jetting Thermojet	Builds parts by depositing small droplets or build material, which are then cured by exposure to light.	Photopolymer, Wax
Powder Bed Fusion	Direct Metal Laser Sintering Selective Laser Melting Electron Beam Melting Selective Laser Sintering	Creates objects by using thermal energy to fuse regions of a powder bed.	Metal, Polymer, Ceramic
Sheet Lamination	Ultrasonic Consolidation Laminated Object Manufacture	Builds parts by trimming sheets of material and binding them together in layers.	Hybrids, Metallic, Ceramic
VAT Photopolymerisation	Stereolithography Digital Light Processing	Builds parts by using light to selectively cure layers of material in a vat of photopolymer.	Photopolymer, Ceramic

Σχήμα 1.2: Διεργασίες προσθετικής κατασκευής κατά ASTM International [1]

2

Η προσθετική κατασκευή στον ιατρικό τομέα

2.1 Η προσθετική κατασκευή στην ιατρική και την ορθοπαιδική

Την τελευταία δεκαετία, και ιδιαιτέρως μετά το 2011[10], η χρήση της προσθετικής κατασκευής και ειδικότερα της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει γίνει πιο σύνηθες και εδραιωμένη για τις ιατρικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται ολοένα και πιο έντονα από γιατρούς και ερευνητές, κυρίως λόγω της ευελιξίας της στην κατασκευή αντικειμένων καθώς κάθε ασθενής παρουσιάζει μοναδικότητα. Το πλεονέκτημα της υιοθέτησης της προσθετικής κατασκευής έναντι της συμβατικής αφαιρετικής κατασκευής είναι η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων με περίπλοκη γεωμετρία ελεύθερης μορφής. Όσον αφορά τις χειρουργικές εφαρμογές, οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να παράγουν χειρουργικούς οδηγούς και αντικείμενα ειδικά για τον ασθενή ή ακόμη και προσαρμοσμένα εμφυτεύματα που κατασκευάζονται ειδικά για τις χειρουργικές ανάγκες. Επιπλέον, παράγονται μοντέλα που βοηθούν στην εκπαίδευση και τη χειρουργική κατάρτιση και παρέχουν καλύτερη κατανόηση της πολύπλοκης ανατομίας και παθολογίας των ασθενών [5].

Έναντι της συμβατικής, η προσθετική κατασκευή παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα, ειδικότερα και στον τομέα της ορθοπαιδικής, όπως[3]:

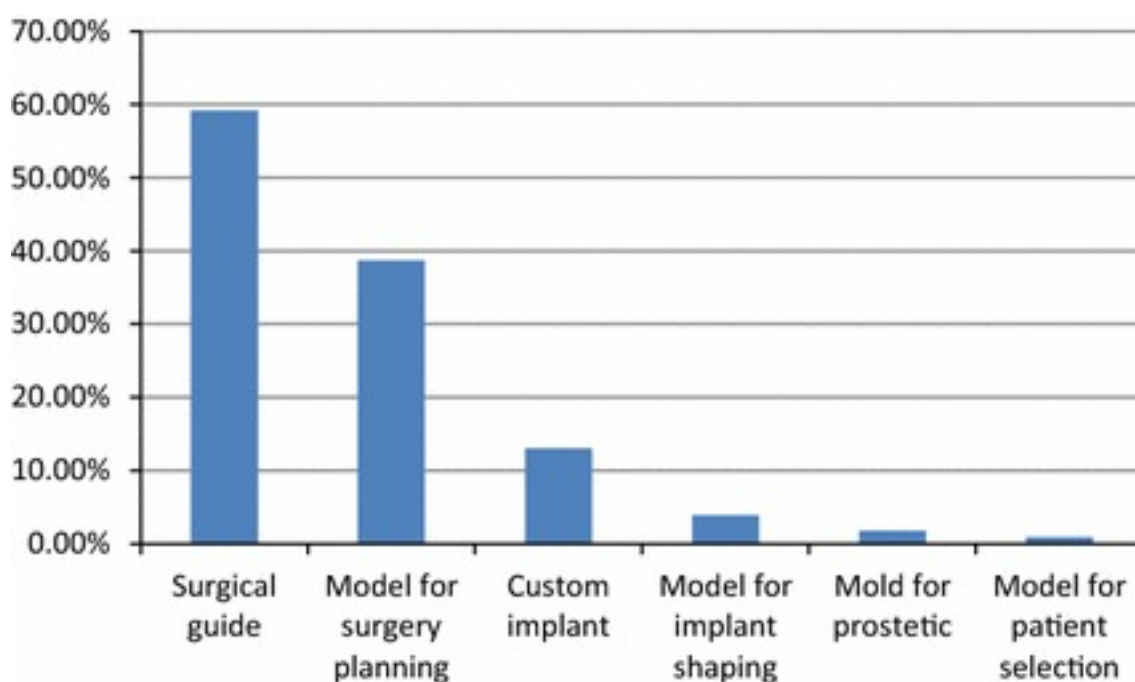
- Μοναδική κατασκευή εμφυτεύματος προσαρμοσμένο για κάθε ασθενή
- Γεωμετρία ελεύθερης μορφής κατά τη διάρκεια παραγωγής προσθετικών
- Εξαιρετικό έλεγχο των υλικών των αντικειμένων, άρα βιοσυμβασι-

μότητα με τον ασθενή

- Επιλογή υλικού ανάλογη με την σκληρότητα που απαιτείται
- Επιλογή της τραχύτητας και της δομής του υλικού
- Μονοκόμματη κατασκευή
- Ταχύτερη και αυτοματοποιημένη κατασκευή του προσθετικού
- Δυνατότητα μείωσης της αναντιστοιχίας δυσκαμψίας στις συνδέσεις οστού-εμφυτεύματος
- Εξοικονόμηση κόστους και πρώτων υλών
- Δυνατότητα περιορισμού κόστους με οικονομίες κλίμακας

2.2 Ιατρικές εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής

Οι πιο συνηθισμένες ιατρικές κλινικές εφαρμογές είναι οι χειρουργικοί οδηγοί, τα ιατρικά μοντέλα, τα εξατομικευμένα εμφυτεύματα, εργαλεία για ιατρικές συσκευές, καλούπια για ιατρικά προσθετικά και μοντέλα διαμόρφωσης εμφυτευμάτων καθώς και βιοκατασκευή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Επισκόπηση των προϊόντων τελικής χρήσης της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα [10]

Όσων αφορά τις διάφορες υποκατηγορίες εφαρμογών ιατρικής προσθετικής κατασκευής μπορούν να προσαρμοστούν για μια ευρύτερη κατηγοριοποίηση, έτσι ώστε τα εμφυτεύματα να μην είναι απαραίτητο να είναι αδρανή, και η λέξη "ιατρικά μοντέλα" θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αναφέρεται σε μοντέλα για προεγχειρητικό σχεδιασμό, διδασκαλία και εκπαίδευση που περιλαμβάνουν μετεγχειρητικά και χειρουργικά σενάρια. Στη συνέχεια θα ταξινομηθούν οι εφαρμογές με βάση τις παρακάτω κατηγορίες:

Ταξινόμηση των ιατρικών εφαρμογών της προσθετικής κατασκευής:

- Ιατρικά μοντέλα
- Εξατομικευμένα εμφυτεύματα
- Εργαλεία, όργανα και εξαρτήματα για ιατρικές συσκευές
- Βοηθήματα, οδηγοί στήριξης, νάρθηκες και προσθετικά
- Βιοκατασκευή

2.2.1 Ιατρικά μοντέλα

Τα ιατρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό ή την προσομοίωση των χειρουργικών επεμβάσεων, καθώς και για την εκπαίδευση ασθενών και φοιτητών ιατρικής. Ένα πείραμα με τη χρήση ενός τρισδιάστατου εκτυπωμένου μοντέλου για την προεγχειρητική εκπαίδευση, όχι μόνο μείωσε το κόστος αλλά και τον χρόνο της διαδικασίας [11]. Τα μοντέλα προσθετικής κατασκευής είναι σε θέση να παρέχουν καλύτερη γνώση για σύνθετες ατέλειες και δύσκολες επεμβάσεις, βοηθώντας ιδιαίτερα σε παραμορφώσεις ή ανατομικές ανωμαλίες. Συγκεκριμένες περιπτώσεις ασθενών μπορεί να έχουν διάφορες ανάγκες όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών, την ανατομική ακρίβεια, την απτική απόκριση, τη δυνατότητα μεταφοράς και αποθήκευσης ή τη ροή της ίδιας της διαδικασίας. Ένα ακόμα προτέρημα των τρισδιάστατα εκτυπωμένων ιατρικών μοντέλων είναι η δυνατότητα χρήσης τους για ακριβή αναπαράσταση του προβλήματος χωρίς την οποιαδήποτε ενόχληση του ασθενούς [3].

Όσων αφορά τον τομέα της ανατομικής εκπαίδευσης, μία μελέτη που χρησιμοποίησε την τρισδιάστατη εκτύπωση για την εκπαίδευση ανατομίας του σώματος, απέδειξε ότι είναι αποτελεσματική και επιτυχής η χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωμένων μοντέλων με βάση την αξονι-

κή τομογραφία ως ρεαλιστικές αναπαραστάσεις της πραγματικότητας. Προσθέτοντας στην κατηγορία της ανατομικής εκπαίδευσης, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να βοηθήσει στην οργάνωση και τον προεγχειρητικό σχεδιασμό, να μειώσει την διάρκεια της εγχείρησης και να ελαχιστοποιήσει τις πιθανότητες επιπλοκών κατά τη διάρκεια της [12].

Όμως, παρόλλα τα προτερήματα της προσθετικής κατασκευής στα ιατρικά μοντέλα, παρουσιάζονται και κάποια όρια στην επιτυχημένη χρήση της. Ένας από τους κύριους περιορισμούς είναι αυτός της γεωμετρίας, κάτι που παρουσιάζεται και στις συμβατικές μεθόδους. Υπό συγκεκριμένες περιπτώσεις, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δεν δύνανται να καλύψουν την ανάγκη για υψηλή ανάλυση κάποιων μοντέλων, καθώς είτε δεν έχουν την δυνατότητα, είτε δεν υπήρχε τόσο εξειδικευμένο προσωπικό για υπολογιστικό σχεδιασμό [13]. Τέλος, σε κάθε στάδιο της διαδικασίας της προσθετικής κατασκευής μπορεί να εισαχθούν αίτια σφαλμάτων. Διαφορετικές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να οδηγήσουν σε λάθη. Κατα συνέπεια, οι γιατροί και οι σχεδιαστές θα πρέπει να γνωρίζουν ποιες περιοχές των ιατρικών μοντέλων χρειάζονται πιο ακριβή απεικόνιση και ποιες μπορούν να δεχτούν ατέλειες ή κάποιου είδους τραχύτητα [14].

2.2.2 Εξατομικευμένα εμφυτεύματα

Στόχος της προσθετικής κατασκευής είναι η χρήση εξατομικευμένων εμφυτευμάτων για την αποκατάσταση κατεστραμμένου ή ελλείποντος ιστού που έχει υποστεί βλάβη. Τα εμφυτεύματα τυποποιημένου μεγέθους στερούνται ατομικής εξειδίκευσης και δεν μπορούν να εμφυτευτούν με ακρίβεια, γεγονός που μπορεί να έχει αντίκτυπο στη μετεγχειρητική ποιότητα ζωής των ασθενών. Χρησιμοποιώντας προσθετικές τεχνολογίες, παράγονται εμφυτεύματα συγκεκριμένης περίπτωσης, όπως αρθρώσεις γόνατος και εμφυτεύματα σπονδυλικής στήλης. Δεδομένου ότι το εμφύτευμα μπορεί να εισαχθεί πλήρως ή εν μέρει στο σώμα και να έρθει σε επαφή με ανθρώπινα υγρά, όργανα ή ιστούς για μεγάλο χρονικό διάστημα, συχνά τίθενται αυστηροί περιορισμοί στο υλικό που θα χρησιμοποιηθεί, κάτι που ελέγχεται εύκολα χρησιμοποιώντας υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης. [3].

Όσων αφορά την ορθοπεδική, η εξατομικευμένη προσαρμογή είναι απαραίτητη όταν η ανατομία διαφέρει από εκείνη του γενικού πληθυσμού ή όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο άλλο εμφύτευμα (για παράδειγμα, σε περι-

πτώσεις σοβαρής οστικής απώλειας λόγω τραύματος, καρκίνου ή λοίμωξης). Παρατηρήθηκε ότι ασθενείς που είχαν εμφυτεύματα κατά παραγγελία έχασαν λιγότερο αίμα, εμφάνισαν λιγότερες ανεπιθύμητες ενέργειες και είχαν λιγότερες πιθανότητες να εισαχθούν σε μονάδα αποκατάστασης ή οξείας περίθαλψης [5].

Εκτός από τα πλεονεκτήματα και τις δυνατότητες υπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί. Το υψηλό κόστος των εμφυτευμάτων, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για το σχεδιασμό και την κατασκευή ώστε να τηρηθούν οι χειρουργικές προθεσμίες, η έλλειψη διεγχειρητικής ευελιξίας και η πρόκληση του προσδιορισμού της σωστής τοποθέτησης των εμφυτευμάτων αποτελούν μείζοντα ζητήματα. Παρόλο που το κόστος κατασκευής του προσαρμοσμένου εμφυτεύματος μπορεί να είναι μεγαλύτερο από εκείνο των εμφυτευμάτων του εμπορίου, θα πρέπει να αξιολογηθεί εξ'ολοκλήρου το κόστος, συμπεριλαμβανόμενου και με βάση τον προεγχειρητικό σχεδιασμό, της εφαρμογής της χειρουργικής διαδικασίας και των μακροπρόθεσμων κλινικών αποτελεσμάτων [15]. Τέλος, απαιτούνται προεγχειρητικές διαδικασίες προσωπικού και εξοπλισμού εκτός των ιατρών, όπως σχεδιαστών και του κατασκευαστικού εξοπλισμού των τρισδιάστατων εκτυπωτών.

2.2.3 Εργαλεία, όργανα και εξαρτήματα για ιατρικές συσκευές

Προκειμένου να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα μιας ιατρικής ή χειρουργικής επέμβασης και να μειωθούν οι συνολικές δαπάνες, η προσθετική κατασκευή επιτρέπει τη δημιουργία εξοπλισμού, οργάνων και εξαρτημάτων για ιατρικές συσκευές ειδικά για τον ασθενή. Η ανάγκη για τη διαδικασία αποστείρωσης είναι απαραίτητη, δεδομένου ότι οι εν λόγω συσκευές μπορεί να εκτεθούν για λίγο σε σωματικά υγρά, όργανα και ιστούς. Δεδομένου ότι τα εργαλεία είναι παρεμβατικά και όχι εφαρμοσμένα, είναι ασφαλής η χρήση εργαλείων που κατασκευάζονται με προσθετική μέθοδο, εφόσον η ουσία δεν είναι άμεσα επικίνδυνη ή αλλεργική για το ανθρώπινο σώμα με το οποίο έρχεται σε επαφή. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές μελέτες, τα εργαλεία όπως οι χειρουργικοί οδηγοί είναι από τις πιο διαδεδομένες χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης και χρησιμοποιούνται για την όσο δυνατότερη ευθυγράμμιση του ιατρικού εξοπλισμού και την καθοδήγηση του χειρουργού ιατρού [2, 16].

2.2.4 Βοηθήματα, οδηγοί στήριξης, νάρθηκες και προσθετικά

Τα εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής αυτής της κατηγορίας είναι είτε εξωτερικά του σώματος είτε ελαχίστως επεμβατικά, όπως οδοντοτριάτικα. Εκτός από τις βασικές συσκευές, οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής βοηθούν στην εξατομίκευση [2]. Εξατομικευμένοι νάρθηκες, υποδοχείς προθέσεων, οδηγοί κίνησης, ορθοπεδικές και στοματικές εφαρμογές είναι μερικά παραδείγματα εφαρμογών [16]. Τα εξατομικευμένα εργαλεία επιταχύνουν τη διαδικασία αποκατάστασης μετά από έναν τραυματισμό και εγγυούνται μία καλύτερη ανάρρωση. Τα περισσότερα αντικείμενα που δημιουργούνται είναι εξωτερικά, επομένως το υλικό που χρησιμοποιείται δεν πρέπει να ερεθίζει το δέρμα όταν έρχεται σε επαφή με αυτό. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής για προσθετικά είναι η εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων [7].

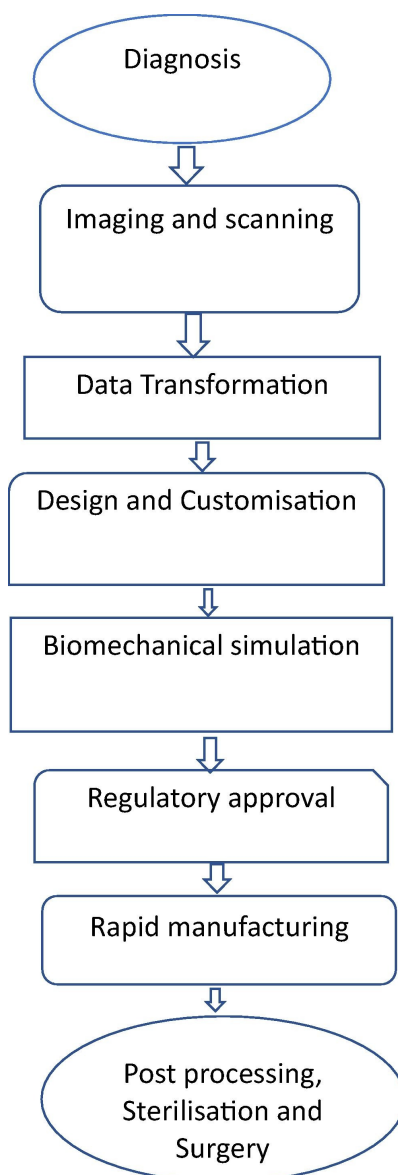
2.2.5 Βιοκατασκευή

Η μηχανική ιστών και η προσθετική κατασκευή συνδυάζονται στη βιοκατασκευή. Χρησιμοποιούνται πολλά διαφορετικά πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά, επειδή τα υλικά πρέπει να είναι φιλικά με το σώμα. Τα υλικά μπορεί να είναι απορροφήσιμα, οστεοκατευθυντικά ή οστεοεπαγωγικά [16]. Τα σχήματα μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ταιριάζουν με τα ελαττώματα του σώματος καθώς η γεωμετρία του ασθενούς πρέπει να καταγράφεται μέσω ιατρικής απεικόνισης ή τρισδιάστατης σάρωσης, προκειμένου να δημιουργηθούν προσαρμοσμένες φόρμες. Μικροδομές και μακροδομές δημιουργούνται στο στάδιο της τρισδιάστατης μοντελοποίησης και οι πορώδεις δομές χρησιμοποιούνται συχνά για την προσέλκυση κυττάρων και την προώθηση του κυτταρικού πολλαπλασιασμού. Είναι απαραίτητο ολόκληρη η διαδικασία να είναι αποστειρωμένη ή να δημιουργούνται εξαρτήματα που μπορούν να απολυμανθούν μετά την εκτύπωση [2].

2.3 Διαδικασία παραγωγής των ιατρικών εφαρμογών της προσθετικής κατασκευής

Για μεγάλο εύρος εξατομίκευσης και προσαρμογής, ειδικά στον τομέα της ιατρικής, η προσθετική κατασκευή είναι ιδανική. Ωστόσο, έχει δυσκολίες που πρέπει να επιλυθούν από πλευράς τεχνολογίας και χρημάτων, κανόνων και ποιότητας, όπως κάθε καινοτόμος κλάδος. Από τεχνο-

λογικής άποψης, η δημιουργία μιας τρισδιάστατης υπηρεσίας μπορεί να χρειαστεί μια σημαντική δαπάνη σε μετρητά και χρόνο ή νέες επενδύσεις προσωπικού για την απόκτηση τεχνικών γνώσεων. Μπορεί να διακριτοποιηθεί σε κάποια βασικά στάδια, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2. Καθώς η παρούσα εργασία αναφέρεται στον τεχνικό τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα ιατρικά και διοικητικά στάδια που αποτελούνται από την διάγνωση, την ρυθμιστική έγκριση του εκάστοτε οργανισμού, την αποστείρωση και το τελικό εγχειρητικό στάδιο, δεν θα αναλυθούν. Κατά συνέπεια, θα εξεταστούν τα στάδια της συγκέντρωσης των δεδομένων, της οπτικής επεξεργασίας τους, της τρισδιάστατης εκτύπωσης και τελικής μετεπεξεργασίας, αλλά όχι της εμβιομηχανικής προσομοίωσης.



Σχήμα 2.2: Διαδικασία παραγωγής της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα [3]

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης ιατρικών εφαρμογών είναι η συλλογή δεδομένων. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τη συλλογή ακριβών δεδομένων του ασθενούς ή του αντικειμένου που πρόκειται να αναπαραχθεί. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες ιατρικής απεικόνισης όπως αξονικές τομογραφίες (*CT Scans*), μαγνητικές τομογραφίες (*MRI Scans*) ή τρισδιάστατοι σαρωτές (*3D Scanners*) για τη λήψη λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με την ανατομική δομή ή το συγκεκριμένο αντικείμενο που εξετάζεται. Ο εξοπλισμός θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ακριβείας, έτσι ώστε να μειωθεί η απαίτηση χρόνου για τα επόμενα στάδια της διαδικασίας, όπου και χρησιμοποιούνται αυτά τα δεδομένα [17].

Μετά τη συλλογή δεδομένων, οι πληροφορίες που αποκτώνται υποβάλλονται σε επεξεργασία εικόνας. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη μετατροπή των συλλεχθέντων δεδομένων σε ψηφιακή μορφή που μπορεί εύκολα να επεξεργαστεί από λογισμικό CAD. Η ψηφιακή αναπαράσταση του αντικειμένου ή του ασθενούς τελειοποιείται, προσαρμόζεται και εξατομικεύεται σύμφωνα με τις επιθυμητές προδιαγραφές και απαιτήσεις. Τα εξελιγμένα εργαλεία λογισμικού επιτρέπουν τον χειρισμό διαφόρων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, του σχήματος και της γεωμετρίας, διευκολύνοντας τη δημιουργία ιδιαίτερων λεπτομερών και ειδικών για τον εκάστοτε ασθενή, μοντέλων. Θα πρέπει να επισυμανθεί ότι στο στάδιο του σχεδιασμού, η διαδικασία κατασκευής χρειάζεται τις απαραίτητες δεξιότητες και την ικανότητα χρήσης του σχετικού λογισμικού. Ωστόσο, το ιατρικό προσωπικό μπορεί να μην έχει αυτή την ικανότητα και να χρειάζεται πρόσθετη βοήθεια [18].

Η εμβιομηχανική προσομοίωση αποτελεί την επόμενη κρίσιμη φάση της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, χρησιμοποιούνται προηγμένοι υπολογιστικοί αλγόριθμοι για την προσομοίωση της εμβιομηχανικής συμπεριφοράς της προβλεπόμενης δομής. Το προσομοιωμένο μοντέλο υποβάλλεται σε εικονικές δοκιμές, επιτρέποντας την αξιολόγηση παραγόντων όπως η δομική ακεραιότητα, η λειτουργικότητα και η πιθανή απόκριση σε εξωτερικές δυνάμεις ή καταπονήσεις. Με την ακριβή αξιολόγηση των επιδόσεων του σχεδιασμένου αντικειμένου πριν από τη φυσική του εκδήλωση, μπορούν να εντοπιστούν και να διορθωθούν πιθανές ατέλειες του σχεδιασμού, εξασφαλίζοντας έτσι τη βέλτιστη λειτουργικότητα και ασφάλεια.

Μόλις ο σχεδιασμός υποβληθεί σε εμβιομηχανική προσομοίωση και ε-

πικύρωση, είναι έτοιμος για το στάδιο της πραγματικής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η τρισδιάστατη εκτύπωση περιλαμβάνει την κατασκευή της επιθυμητής δομής στρώμα προς στρώμα με τη χρήση εξειδικευμένων τρισδιάστατων εκτυπωτών. Ανάλογα με τη φύση του αντικειμένου και το απαιτούμενο επίπεδο ακρίβειας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες εκτύπωσης, όπως η μοντελοποίηση με τη μέθοδο της σύντηξης εναπόθεσης (*FDM*), η στερεολιθογραφία (*SLA*) ή η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (*SLS*). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα χρησιμοποιηθεί και θα αναλυθεί η μέθοδος *FDM*.

Το τελικό στάδιο στη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η μεταεπεξεργασία. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση και το φινιρίσμα του εκτυπωμένου αντικειμένου για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων. Οι τεχνικές μετα-επεξεργασίας μπορεί να περιλαμβάνουν στίλβωση, λείανση ή επίστρωση του αντικειμένου για τη βελτίωση του επιφανειακού του φινιρίσματος, καθώς και πρόσθετα βήματα όπως αποστείρωση ή τελική δοκιμή βιοσυμβατότητας για να διασφαλιστεί η καταλληλότητά του για ιατρικές εφαρμογές. Εφαρμόζονται μέτρα ποιοτικού ελέγχου για την επαλήθευση της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του τελικού προϊόντος.

3

Διαχείριση διαδικασιών της Προσθετικής Κατασκευής

3.1 Εισαγωγή

Ο ιατρικός τομέας έχει αλλάξει τον τρόπο λειτουργίας του ως αποτέλεσμα των νέων τεχνολογιών και του μεταβαλλόμενου επιχειρηματικού περιβάλλοντος τα τελευταία χρόνια. Η μέθοδος με την οποία οι επαγγελματίες υγείας αλληλεπιδρούν με τους καταναλωτές έχει επίσης εξελιχθεί, καθώς έχει γίνει πιο προσεκτική, πιο ενημερωμένη και πιο απαιτητική. Η ζήτηση των καταναλωτών έχει αλλάξει, έχοντας γίνει ακόμη πιο εξατομικευμένη και επικεντρωμένη σε συγκεκριμένα αντικείμενα. Η σημασία της τεχνολογίας έχει μεταβληθεί δραστικά από το σημερινό οικονομικό κλίμα. Αντί να είναι ένα βασικό στοιχείο παραγωγής, η τεχνολογία αποτελεί πλέον μια κρίσιμη ανταγωνιστική δύναμη που μπορεί να αλλάξει τις εταιρικές στρατηγικές και να μετασχηματίσει πλήρως ολόκληρους κλάδους και μεθόδους παραγωγής [19]. Κατα συνέπεια, το ερώτημα είναι κατά πόσον οι αλλαγές αυτές μπορούν να οδηγήσουν στο ενδεχόμενο μιας ολικής ή μερικής αναδιαμόρφωσης των παραγωγικών δραστηριοτήτων, που προσανατολίζονται σε μια προσέγγιση που δεν είναι πλέον συμβατικής παραγωγής, αλλά παραγωγής προσθετικού τύπου [20].

Κάθε πτυχή της παραγωγής έχει επωφεληθεί από την προσθετική κατασκευή, ή όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, την τρισδιάστατη εκτύπωση. Όπως είναι αναμενόμενο, η υιοθέτησή της έχει οδηγήσει σε σημαντικές οργανωτικές και επιχειρηματικές αλλαγές. Η τρισδιάστατη εκτύπωση εντάσσεται σε ένα πολύ ευρύτερο περιβάλλον, γνωστό ως τεχνολογίες που περιγράφονται από την 4η Βιομηχανική Επανάσταση (*Industry 4.0*). Η εν λόγω περίπτωση περιλαμβάνει την υιοθέτηση τεχνολογιών που έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν ολόκληρο το εταιρικό σύστημα, οδηγώντας σε μια σειρά από διαχειριστικές και οικονομι-

κές επιπτώσεις. Η εφαρμογή της καλύπτει ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, όπως η αεροδιαστημική, οι κατασκευές, η τέχνη, τα οικιακά και τον ιατρικό τομέα. Σε αυτόν, συγκεκριμένα, η υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας μπορεί να σηματοδοτήσει μια νέα εποχή, παρέχοντας τεχνολογικές λύσεις που αποσκοπούν στη βελτίωση της ζωής των ατόμων, εξασφαλίζοντας παράλληλα την οργανωτική αποτελεσματικότητα από την άποψη του κόστους που θα προκύψει και του χρόνου που θα χρειαστεί [21].

Ο ιατρικός τομέας είναι ένας από τους τομείς που επωφελούνται περισσότερο από τις εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής, όπως έχει αναλυθεί και από την πληθώρα των πιθανών εφαρμογών στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αξίζει να γίνει μία αναφορά στον ρόλο της προσθετικής κατασκευής στην διαχείριση της πανδημίας *COVID-19* και στις λύσεις που προσέφερε. Οι προμηθευτές υγειονομικής περίθαλψης και εξοπλισμού ατομικής προστασίας αγωνίζονταν να ανταποκριθούν στην ξαφνική αύξηση της ζήτησης για εξειδικευμένα προϊόντα όπως μάσκες προσώπου, ασπίδες προσώπου, κιτ δοκιμών, κ.λπ. από την αρχή της πανδημίας *COVID-19*. Η ξαφνική και πειστική ζήτηση ξεπερνούσε τις δυνατότητες της τρέχουσας παραγωγής. Η κατάσταση έγινε πολύ πιο σοβαρή ως αποτέλεσμα του μειωμένου αριθμού προσωπικού και του αποκλεισμού σε διάφορες περιοχές του κόσμου, γεγονός που επηρέασε τα παγκόσμια δίκτυα. Με την παροχή εξαρτημάτων για ιατρικές συσκευές όπως αναπνευστήρες και ρινοφαρυγγικές μπατονέτες, καθώς και εξοπλισμό ατομικής προστασίας, όπως μάσκες προσώπου και ασπίδες προσώπου, η προσθετική κατασκευή διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην καταπολέμηση του *COVID-19* [22].

3.2 Η προσθετική κατασκευή στη διαχείριση διαδικασιών

Το μεγαλύτερο ζήτημα που προκύπτει όταν ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής χρησιμοποιείται σε έναν οργανισμό είναι ότι, εκτός από το αρχικό στάδιο διαμόρφωσης, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δεν απαιτούν ανθρώπινη συμμετοχή σε κανένα στάδιο της παραγωγής. Εάν το αντικείμενο που παράγεται δεν είναι έτοιμο, τότε είναι δυνατόν ο άνθρωπος να βοηθήσει κατά το στάδιο της συναρμολόγησης και του φινιρίσματος, όπως το στάδιο της μετεπεξεργασίας που έχει αναλυθεί, αλλά εάν ο εκτυπωτής αναπαράγει ένα τελικό προϊόν, τότε θα ολοκληρώσει το στόχο του εντε-

λώς αυτόνομα. Σε κάθε περίπτωση, η προσθήκη μιας νέας μηχανής στις διαδικασίες δεν σημαίνει αυτόματα ότι θα αντικαταστήσει την ανθρώπινη εργασία, μπορεί να θεωρηθεί ως μια τεχνολογία που συμπληρώνει την ανθρώπινη εργασία και διευκολύνει τη γρήγορη και εργονομική εκτέλεση. Ο εργαζόμενος θα είναι πάντα παρών στον κύκλο παραγωγής, ιδίως στα στάδια που αφορούν το λογισμικό σχεδιασμού, τη χρήση των τρισδιάστατων συστημάτων και ειδικότερα τη διαχείριση της διαδικασίας. Αυτό θα καθορίσει μια διαφορετική μορφή οργάνωσης της εργασίας και θα αλλάξει τους προηγούμενους δομικούς και τεχνολογικούς περιορισμούς που συχνά επέβαλαν την επιλογή μεταξύ συμβατικής και προσθετικής κατασκευής, άρα αμιγώς ανθρώπινης και υβριδικής εργασίας [23].

Μαζί με αυτές αλλαγές στις διαδικασίες, η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών στον ιατρικό τομέα έχει οδηγήσει σε αναδιοργάνωση των ρόλων και στη δημιουργία νέων υβριδικών μορφών εντός του νοσοκομειακού συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών αποτελεί αναμφίβολα μια επανάσταση, ώντας και μια καινοτόμα τεχνολογία που εντάσσεται στην 4η Βιομηχανική Επανάσταση, που αλλάζει τον τρόπο άσκησης της ιατρικής στο πλαίσιο των διαδικασιών παραγωγής [24].

Παράλληλα με τους χειρουργούς και τους ακτινολόγους, υπάρχει ένα άτομο που είναι ο μηχανικός τρισδιάστατης εκτύπωσης που ελέγχει το λογισμικό σχεδιασμού σε ιατρικά και νοσοκομειακά περιβάλλοντα και προσφέρει τεχνική βοήθεια κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής [25]. Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός και η υλοποίησή ενός προσθετικού προϊόντος, χρειάζονται μια ποικιλία γνώσεων φυσικής, ιατρικής και μηχανικής, αυτόματα οδηγούμαστε σε μία αλλαγή στην διαχείριση της οργανωσιακής δομής του ιατρικού περιβάλλοντος, χάρις στην εισαγωγή του μηχανικού.

3.3 Βασικοί παράγοντες διαχείρισης που επηρεάζουν τις διαδικασίες χρήσης της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα

Η επιτυχής εφαρμογή της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα εξαρτάται από διάφορους βασικούς παράγοντες διαχείρισης. Αυτοί οι παράγοντες αποτελούνται από τα γενικά οφέλη, τα αποτελέσματα στην

υγεία των ασθενών, την ηγεσία του εκάστοτε οργανισμού, είτε ιδιωτικού είτε δημοσίου, τους κανονισμούς, την εφοδιαστική αλυσίδα και τα οικονομικά. Διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη διαμόρφωση της υιοθέτησης και του αντίκτυπου των διαδικασιών προσθητικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα.

3.3.1 Γενικά οφέλη

Τα γενικά οφέλη αναφέρονται στα πλεονεκτήματα που προσφέρει η προσθητική κατασκευή στον ιατρικό τομέα, δηλαδή το πως οι οργανισμοί και οι ασθενείς την αντιλαμβάνονται. Με την αξιοποίηση αυτής της τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι πάροχοι ιατρικών υπηρεσιών μπορούν να επιτύχουν σημαντικά κέρδη όσον αφορά τη βελτιωμένη φροντίδα των ασθενών, τα θεραπευτικά αποτελέσματα και την αυξημένη αποτελεσματικότητα στην παραγωγή ιατρικών συσκευών. Η δυνατότητα δημιουργίας εξατομικευμένων εμφυτευμάτων, προσθετικών υλικών και οδηγών προσαρμοσμένων στις ατομικές ανάγκες των ασθενών και των χειρουργών μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερα κλινικά αποτελέσματα, μειωμένους χρόνους ανάρρωσης και αυξημένη ικανοποίηση των ασθενών [26]. Με την χρήση των τρισδιάστατα εκτυπωμένων χειρουργικών οδηγών, παρουσιάζεται το όφελος της καλύτερης και γρηγορότερης χειρουργικής προετοιμασίας και κατά συνέπεια, εξοικονομείται χειρουργικός χρόνος και ελαχιστοποιείται η πιθανότητα μόλυνσης του ασθενούς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Τα προηγούμενα συμβάλουν στην ελαχιστοποίηση της χρήσης των πόρων του νοσοκομείου ή του οργανισμού, βελτιώνοντας τον προγραμματισμό της χρονικής ανάθεσης του προσωπικού. Επίσης, οι γιατροί με έλλειψη στην χειρουργική εμπειρία, χάρις στην χρήση των οδηγών, μπορούν να χειριστούν περίπλοκες περιπτώσεις που παλαιότερα απαιτούσαν εξειδικευμένους και έμπειρους γιατρούς.

3.3.2 Αποτελέσματα για τους ασθενείς

Τα αποτελέσματα για τους ασθενείς αποτελούν ίσως τον πιο κρίσιμο παράγοντα κατά την εφαρμογή της προσθητικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα για όλους τους ιατρικούς παρόχους ανεξαιρέτως. Το πως αντιλαμβάνεται ο ασθενής την ιαματική διαδικασία έχει άμεσο αντίκτυπο στην διαχείριση και τις αποφάσεις της χρήσης των διαδικασιών [27]. Η εξατομίκευση και η ακρίβεια που προσφέρει αυτή η τεχνολογία έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν θετικά τα αποτελέσματα των ασθενών, εξασφαλίζοντας καλύτερα προσαρμοσμένα εμφυτεύματα, μειώ-

νοντας τον κίνδυνο επιπλοκών και επιτρέποντας ακριβέστερο χειρουργικό σχεδιασμό. Δεν υπάρχουν πολλές έρευνες οι οποίες περιγράφουν την διαδικασία υπό την οπτική των ασθενών παρά μόνο από την οπτική των διαδικασιών, καθώς υπάρχει έλλειψη περιγραφής των εξατομικευμένων εφαρμογών, κυρίως λόγω του ιατρικού απορρήτου που διακατέχει τον ιατρικό τομέα [28].

3.3.3 Ηγεσία και Διοίκηση

Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι η ηγεσία και η διοίκηση, η οποία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην προώθηση της επιτυχούς ενσωμάτωσης των διαδικασιών προσθετικής κατασκευής στους οργανισμούς υγειονομικής περίθαλψης. Η ισχυρή ηγεσία είναι απαραίτητη για την προώθηση μιας κουλτούρας καινοτομίας, την οικοδόμηση διεπιστημονικών συνεργασιών και τη διευκόλυνση της υιοθέτησης νέων τεχνολογιών. Η σχέση μεταξύ της ηγεσίας και του προσωπικού, καθώς και ο βαθμός συμμετοχής τους στη διαδικασία υλοποίησης, αποτελούν βασικά στοιχεία στην ενσωμάτωση των διαδικασιών προσθετικής κατασκευής. Τα οφέλη αυτής της τεχνολογίας δεν μπορούν αρχικά να δικαιολογηθούν από το επίπεδο της διοίκησης, επειδή συνήθως δεν είναι οι ειδικοί στον ιατρικό τομέα. Λόγω της καινοτομίας της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης υπάρχει έλλειψη συσχέτισης της διοίκησης και της εφαρμογής της στον ιατρικό τομέα. Σε πολλές έρευνες για την προσθετική κατασκευή, οι υποθέσεις που παρουσιάζονται υποδηλώνουν ότι οι αντιλήψεις της ανώτατης διοίκησης για το σχετικό πλεονέκτημα, την πολυπλοκότητα, τη συμβατότητα και τη δυνατότητα δοκιμής της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα συσχετιστούν με την πρόθεσή τους να υιοθετήσουν την τεχνολογία. Εξετάζεται επίσης πώς οι αντιλήψεις της ανώτατης διοίκησης διαφέρουν ανάλογα με την κατηγορία υιοθέτησης και τα ατομικά χαρακτηριστικά [29]. Κατά συνέπεια, υπάρχει έλλειψη εμπειρικής έρευνας σχετικά με τη διοικητική προοπτική της υιοθέτησης της τρισδιάστατης εκτύπωσης και των επιπτώσεών της για τις επιχειρήσεις και τα συστήματα καινοτομίας στον ιατρικό τομέα. Η διερεύνηση της επιχειρηματικής πλευράς της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα συνεπαγόταν την υπέρβαση της τεχνικής πλευράς της τεχνολογίας και την εξέταση του τρόπου με τον οποίο μπορεί να επηρεάσει τη δυναμική του ιατρικού τομέα σε τοπικό και παγκόσμιο πλαίσιο, καθώς και τους δια-οργανωτικούς μηχανισμούς που την διέπουν [30].

3.3.4 Κανονισμοί

Οι κανονισμοί αποτελούν επίσης κρίσιμο ζήτημα για την εφαρμογή της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα καθώς είναι η νομοθετική πτυχή της εφαρμογής της προσθετικής τεχνολογίας. Όπως συμβαίνει με κάθε ιατρική τεχνολογία, υπάρχει ανάγκη για ρυθμιστικά πλαίσια για τη διασφάλιση της ασφάλειας, της αποτελεσματικότητας και των προτύπων ποιότητας. Οι ρυθμιστικοί φορείς πρέπει να αναπτύξουν κατευθυντήριες γραμμές και πρότυπα ειδικά για τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής, εξετάζοντας πτυχές όπως οι πιστοποιήσεις υλικών, οι μέθοδοι αποστείρωσης και οι απαιτήσεις μεταγενέστερης επεξεργασίας. Με βάση τις παρούσες έρευνες φαίνεται ότι οι κανονισμοί αποτελούν εμπόδιο για την εσωτερική παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων για τη χρήση στο ανθρώπινο σώμα [31]. Ένα άλλο θέμα είναι ότι λόγω του απορρήτου που υπάρχει στις ιατρικές εφαρμογές, εμφανίζεται δυσκολία στην δημιουργία κοινών κατευθυντήριων γραμμών, κάτι που εμφανίζει πρόκληση στην εκάστοτε διοίκηση να δημιουργήσει μετά από έρευνα και ανάπτυξη τους δικούς της κανονισμούς [32].

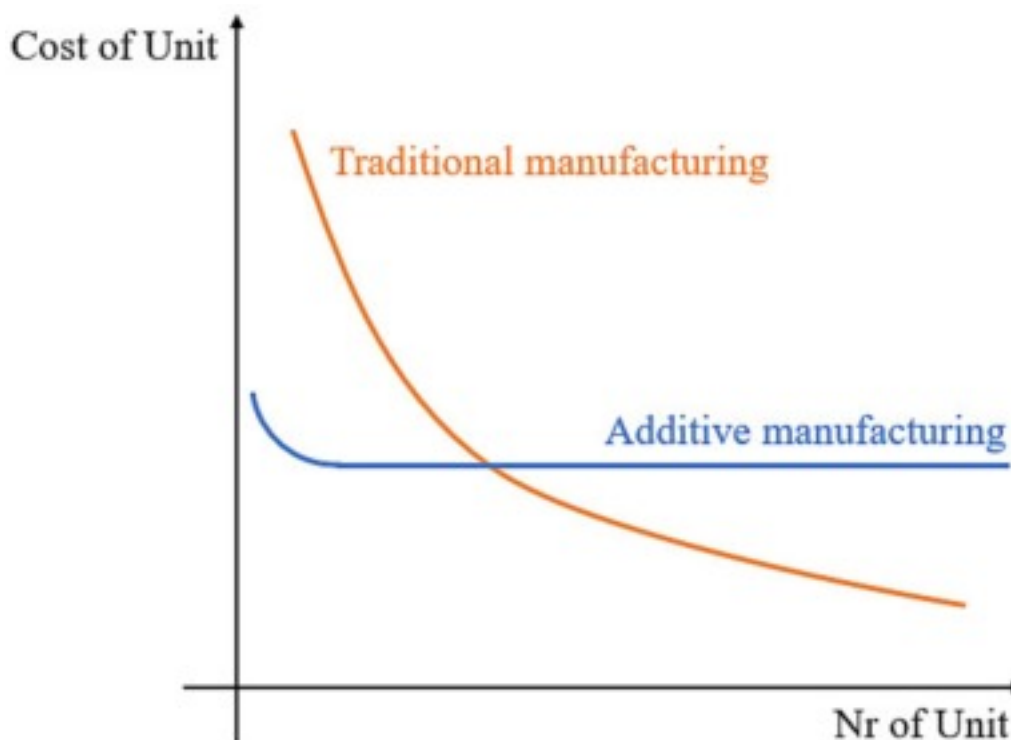
3.3.5 Εφοδιαστική Αλυσίδα

Στον ιατρικό τομέα, οι πάροχοι υγειονομικής περίθαλψης αναζητούν συνεχώς τρόπους εξοικονόμησης των οποίων δαπανών, παρέχοντας παράλληλα στους ασθενείς όσο το δυνατόν θεραπεία υψηλότερης ποιότητας. Για να το πετύχουν αυτό, αναζητούν κυρίως κατασκευαστές ιατρικού εξοπλισμού, ή γίνονται οι ίδιοι, με σκοπό τη σημαντική μείωση του κόστους. Στη συνέχεια, οι κατασκευαστές ιατρικών συσκευών προσπαθούν να μειώσουν τα περιττά υλικά και να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα των ιατρικών συσκευών. Για να ολοκληρωθεί ο κύκλος των παραπάνω διαδικασιών, απαιτούνται λειτουργικές βελτιώσεις. Εδώ, η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας είναι ζωτικής σημασίας για την παρακολούθηση της διαδρομής ενός προϊόντος κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας [33].

Η εφαρμογή της προσθετικής κατασκευής στον ιατρικό τομέα μπορεί να απλοποιήσει την εφοδιαστική αλυσίδα ενός προϊόντος και να βοηθήσει τους παραγωγούς ιατρικών συσκευών να προσφέρουν εξατομικευμένη κατασκευή, να μειώσουν το συνολικό κόστος, να μειώσουν τους συνολικούς χρόνους παράδοσης και να βελτιώσουν δραστικά τη διαχείριση των αποθεμάτων. Ειδικότερα, μπορούν να μειωθούν τα επίπεδα των απο-

θεμάτων με την εξατομικευμένη παραγωγή κατά παραγγελία που προσφέρει η προσθετική κατασκευή, εξοικονομώντας χρήματα από τα αποθέματα. Μπορούν επίσης να ενσωματωθούν διάφορες διαδικασίες για να μειώσουν την ποσότητα των εξαρτημάτων σε ένα προϊόν και να εξορθολογήσουν τις συνδέσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας [34]. Όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα 3.1, σε σύγκριση με την συμβατική κατασκευή, η προσθετική δεν επωφελείται από την οικονομία κλίμακας. Οι κύριοι λόγοι είναι η ταχύτητα και το περιορισμένο περιθώριο κατασκευής. Ως εκ τούτου, η μαζική παραγωγή τυποποιημένων εξαρτημάτων είναι πιθανόν να είναι ο τομέας των συμβατικών τεχνολογιών κατασκευής.

Με τις αλλαγές στην εφοδιαστική αλυσίδα θα προκύψουν και οι διαδικαστικές και οργανωσιακές αλλαγές στη διαχείριση. Προκειμένου οι διοικήσεις στον ιατρικό τομέα να εξαλείψουν τις επιπτώσεις της διαταραχής στην εφοδιαστική αλυσίδα πρέπει να παραχθεί ένα ευέλικτο πλάνο διαχείρισης για να ενσωματωθεί το κόστος της τεχνολογίας στις διαδικασίες [35, 36].



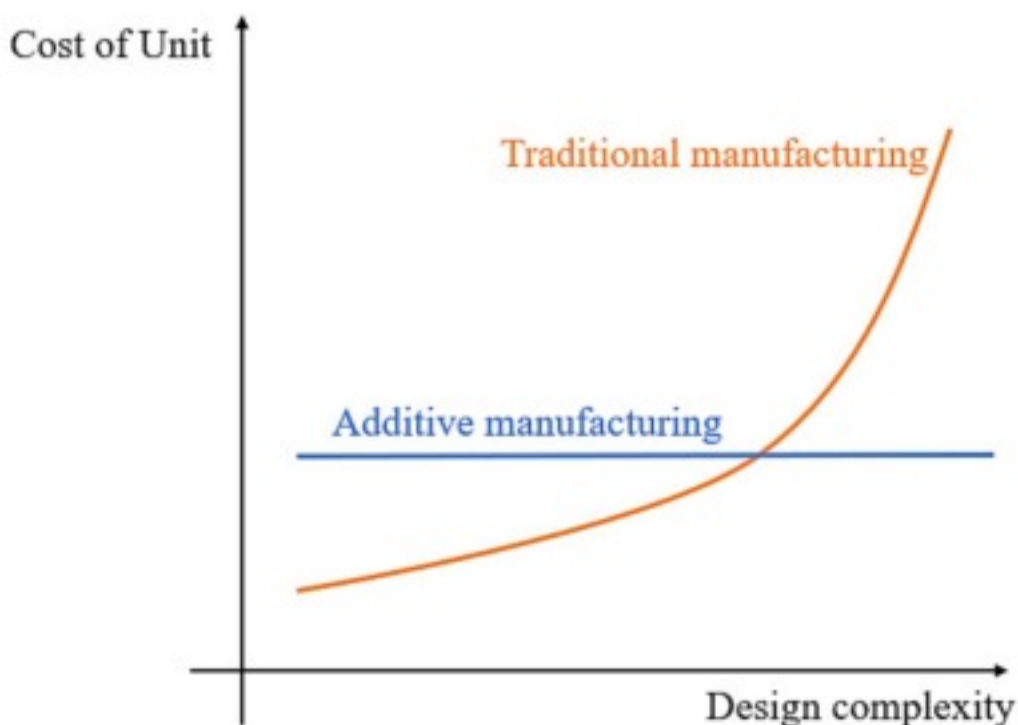
Σχήμα 3.1: Η συνάρτηση κόστους σε σχέση με τις μονάδες παραγωγής [34]

3.3.6 Οικονομικά και χρηματοδότηση

Τέλος, τα οικονομικά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της βιωσιμότητας και της επεκτασιμότητας της προσθετικής κατασκευ-

ής στην υγειονομική περίθαλψη. Ενώ το αρχικό κόστος που συνδέεται με την απόκτηση εξοπλισμού προσθετικής κατασκευής και την εκπαίδευση του προσωπικού μπορεί να είναι σημαντικό, η τεχνολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να αποφέρει μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους. Μειώνοντας την ανάγκη για εκτεταμένα αποθέματα, ελαχιστοποιώντας τις χειρουργικές αναθεωρήσεις και βελτιστοποιώντας τη φροντίδα των ασθενών, η προσθετική κατασκευή μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά αποδοτικότερη παροχή. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι στον ιατρικό τομέα που απαιτείται μεγάλη πολυπλοκότητα σχεδιασμού, η προσθετική κατασκευή σε βάθος χρόνου επιφέρει οικονομική συνεισφορά σε σχέση με την συμβατική, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.

Ωστόσο, καθώς η τρέχουσα κατάσταση της προσθετικής κατασκευής είναι ακόμη αποκεντρωμένη στον ιατρικό τομέα και η κεντρικοποίηση τίθεται όλο και περισσότερο σε εφαρμογή, ένα οικονομικό μοντέλο φαίνεται απαραίτητο για την ευρύτερη υιοθέτηση της. Εξάλλου, η επένδυση, είτε σε ιδιωτικό είτε σε δημόσιο τομέα, θα πρέπει να μην πάει χαμένη. Για ένα πιο κεντρικοποιημένο μοντέλο, οι απαιτούμενοι πόροι από την άποψη της τεχνικής υποστήριξης, της υποστήριξης της παραγωγής ή ακόμη και της νομοθετικής υποστήριξης απαιτούν αξιολόγηση όσον αφορά τα οφέλη της προσθετικής κατασκευής [25].



Σχήμα 3.2: Η συνάρτηση κόστους σε σχέση με την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού [34]

4

Αντίστροφη μηχανική - Τρισδιάστατη σάρωση σε ιατρικές εφαρμογές

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αντίστροφη μηχανική και η τεχνική της τρισδιάστατης σάρωσης (*3D Scanning*). Σκοπός είναι να περιγραφούν οι διαδικασίες αυτές, δεδομένου ότι αποτελούν κρίσιμα στοιχεία των πειραματικών μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια αναλύονται οι λεπτομέρειες σχετικά με την τεχνολογία τρισδιάστατης σάρωσης, την ιατρική απεικόνιση και τη χρήση της αντίστροφης μηχανικής στον ιατρικό τομέα.

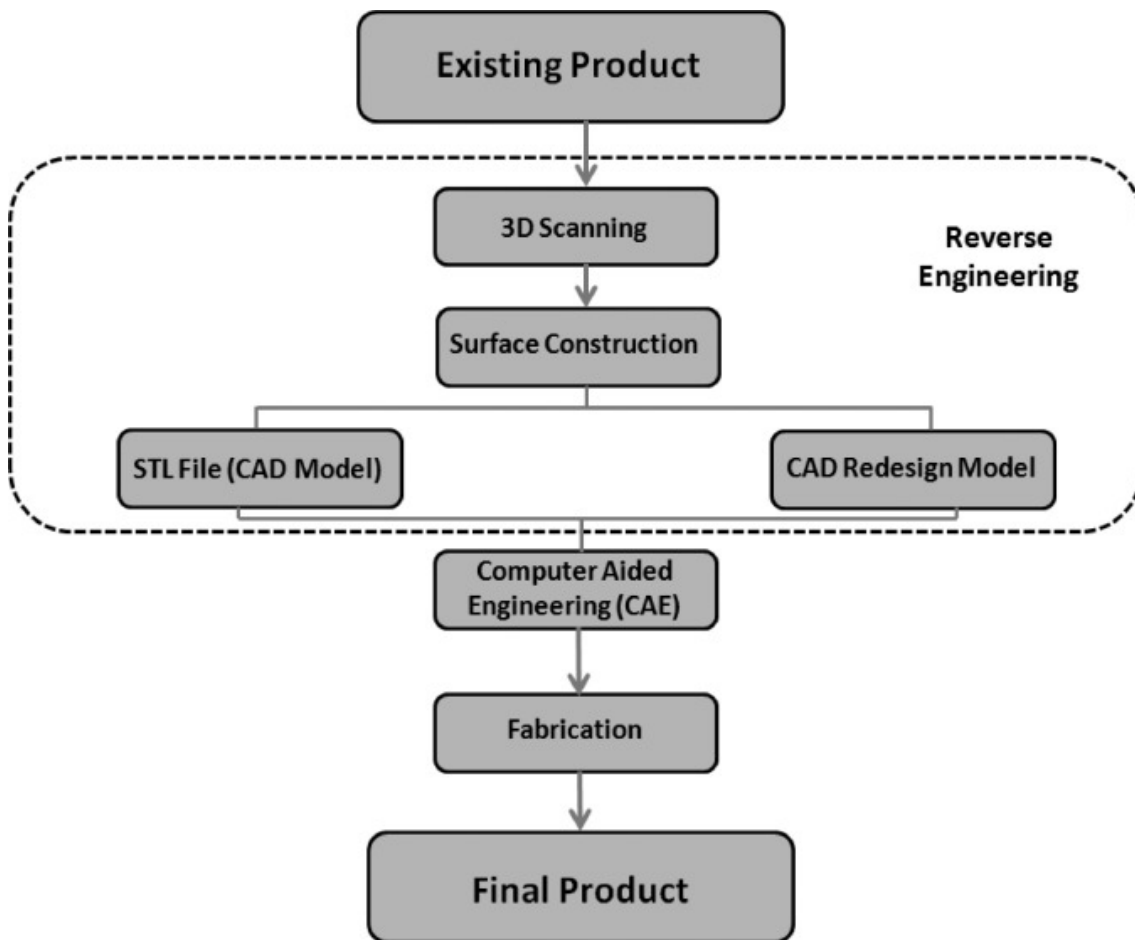
4.1 Αντίστροφη μηχανική

Η αντίστροφη μηχανική είναι η πρακτική της εξέτασης αντικειμένων για να μάθουμε τον σχεδιασμό τους. Η τυπική προσέγγιση της συμβατικής μηχανικής, η οποία ξεκινά με μια διαδικασία σχεδιασμού για την κατασκευή ενός προϊόντος, είναι το αντίστροφο αυτής της προσέγγισης. Υπάρχουν διάφορες βιομηχανίες στις οποίες χρησιμοποιείται η αντίστροφη μηχανική, όπως η πληροφορική, τα αμυντικά συστήματα, ο ιατρικός τομέας, τα ηλεκτρονικά καθώς και η αυτοκινητοβιομηχανία [37].

4.2 Τεχνικές τρισδιάστατης σάρωσης

Το σχήμα, το μέγεθος και ενίοτε το χρώμα ενός φυσικού αντικειμένου μπορούν να καταγραφούν ψηφιακά με τη χρήση τρισδιάστατων σαρωτών. Η καταγραφή της επιφάνειας ή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου είναι το αρχικό στάδιο της τρισδιάστατης σάρωσης. Μετά την επεξεργασία, τα δεδομένα μετατρέπονται σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, παράγοντας έτσι πρακτικά ένα ψηφιακό αντίγραφο (*Digital*

twin). Ένα ψηφιακό αντίγραφο επιτρέπει την πρόσθετη μοντελοποίηση. Η διαδικασία είναι πολύ διαδομένη και τα δεδομένα που παράγονται από τους σύγχρονους σαρωτές είναι συμβατά με πολλές εφαρμογές λογισμικού για τον πρόσθετο σχεδιασμό και τη περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία [38]. Στο σχήμα 4.1 παρατηρείται η διαδικασία που ακολουθείται κατά την αντίστροφη μηχανική και την τρισδιάστατη σάρωση.



Σχήμα 4.1: Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής και της τρισδιάστατης σάρωσης [38]

Κάθε τρισδιάστατος σαρωτής χρησιμοποιεί έναν φυσικό μηχανισμό για τη σάρωση. Ωστόσο, είτε υπάρχει φυσική επαφή με το αντικείμενο είτε όχι, οι μέθοδοι σάρωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τεχνολογίες επαφής, μη επαφής και υβριδικές [37]. Οι σαρωτές επαφής περιλαμβάνουν έναν φυσικό ανιχνευτή που κινείται πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου για τη συλλογή των χαρακτηριστικών του. Αυτές οι μέθοδοι, ωστόσο, απαιτούν μεγαλύτερη προσπάθεια και προορίζονται για αντικείμενα με πολύ βασικές γεωμετρικές μορφές. Προκειμένου να μπορούν

να σκανάρουν και μαλακά υλικά οι ανιχνευτές αυτοί πρέπει επίσης να διατηρούν και μια συγκεκριμένη πίεση [39]. Οι τεχνικές μη επαφής χρησιμοποιούν πηγές ενέργειας που μπορούν να προβληθούν, όπως το φως ή λέιζερ. Η επιστροφή αυτής της ακτινοβολούμενης ενέργειας αποδίδει τις πληροφορίες της επιφάνειας. Οι σαρωτές μη επαφής είναι η προτιμητέα μέθοδος για μεγαλύτερα, πιο περίπλοκα αντικείμενα με ποικίλες καμπυλότητες και μορφές ελεύθερης μορφής, καθώς και για τις ιατρικές εφαρμογές [40].

Ένα αντικείμενο πρέπει να προετοιμαστεί ώστε να μπορεί να σαρωθεί σωστά. Τόσο η τοποθέτηση όσο και το φινίρισμα της επιφάνειας μπορούν να θεωρηθούν προετοιμασία. Η επιλογή της σωστής τεχνικής ή της σωστής διαδικασίας σάρωσης είναι μεγάλης σημασίας. Έτσι διασφαλίζεται ότι καταγράφονται όλα τα χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου, όπως οι οπές και οι σχισμές.

Σε πρώτο στάδιο, το αντικείμενο σαρώνεται με τρισδιάστατο σαρωτή. Ένα νέφος (*cloud*) δεδομένων σημείων μεταφέρεται στο κατάλληλο πρόγραμμα. Με άλλα λόγια, η διαδικασία ψηφιοποίησης χρησιμοποιεί διακριτά σημεία και μπορεί να περιγραφεί ως μία διαδικασία μετατροπής του αναλογικού αντικειμένου σε ψηφιακό, για την προσέγγιση του. Αυτά είναι οι κύριες γεωμετρικές αναφορές που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του επιφάνειας. Οι τρισδιάστατοι σαρωτές χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές για να αποτυπώσουν τις λεπτομέρειες της επιφάνειας των αντικειμένων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι τεχνικές διαφέρουν μεταξύ ενεργών και παθητικών συστημάτων. Η κύρια διαφορά μεταξύ αυτών των συστημάτων είναι ότι τα ενεργά συστήματα προβάλλουν ενέργεια και μετρούν τη μεταδιδόμενη ή ανακλώμενη ενέργεια για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας, ενώ τα παθητικά συστήματα αναλύουν εικόνες της γεωμετρίας.

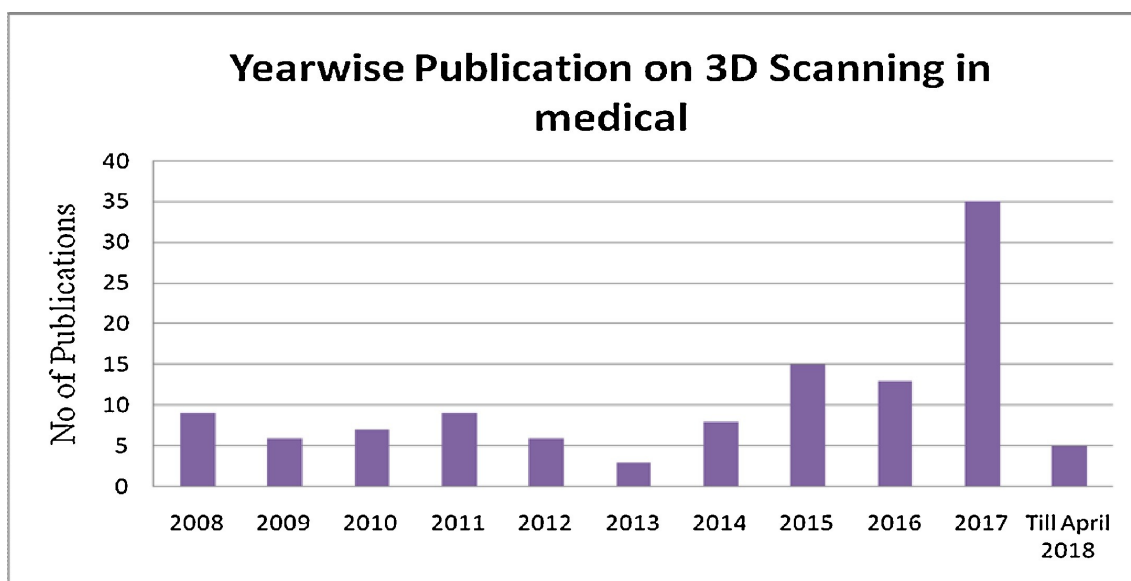
4.3 Η τρισδιάστατη σάρωση στον ιατρικό τομέα

Το ανθρώπινο σώμα είναι ένα εξελιγμένο μηχανικό θαύμα. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, η αντίστροφη μηχανική μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μηχανισμός εκμάθησης ενός αντικειμένου όταν λείπουν τα δεδομένα. Υπό αυτή την έννοια, το ανθρώπινο σώμα μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένα σύστημα στο οποίο μπορούν να αναδημιουργηθούν με αντίστροφη μηχανική τα διαφορετικά μέρη του για να εξεταστούν [38].

Τα εσωτερικά μέρη του σώματος μπορούν να χαρτογραφηθούν τρισδιάστατα με τη χρήση ιατρικής απεικόνισης, ενώ τα εξωτερικά μέρη του σώματος μπορούν να σαρωθούν με τη χρήση τρισδιάστατων σαρωτών. Αυτές οι τεχνολογίες καθιστούν δυνατή τη συλλογή δεδομένων από το σώμα ενός ασθενούς, ιατρικών συσκευών ή ακόμη και μοντέλων. Εάν ο στόχος της διαδικασίας για τις ιατρικές εφαρμογές είναι να μάθουμε περισσότερα για τα εσωτερικά όργανα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτο βήμα μια διαδικασία τρισδιάστατης σάρωσης ή ιατρικής απεικόνισης. Οι εφαρμογές για την τρισδιάστατη βιομοντελοποίηση και απεικόνιση κυμαίνονται από τη σάρωση εμφυτευμάτων, οδηγών πριονίσματος και οδηγών τρυπανιών, εξειδικευμένων για τον ασθενή, μέχρι και δεδομένα προεγχειρητικής τρισδιάστατης ιατρικής απεικόνισης για τον ίδιο [40].

Από μια ευρεία οπτική γωνία, τα ιατρικά εμφυτεύματα, η εκμάθηση των εξωτερικών χαρακτηριστικών ενός ασθενούς (σχήμα, μέγεθος, επιφάνεια ή ένα συγκεκριμένο μέρος του σώματος) και τα ψηφιακά μοντέλα για χρήση σε εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας είναι μερικές από τις συχνές χρήσεις της τρισδιάστατης σάρωσης στον ιατρικό τομέα [41]. Η δημιουργία αντικειμένων όπως τα εμφυτεύματα είναι μια πολύ γρήγορη διαδικασία χάρη στη χρήση ενός τρισδιάστατου σαρωτή και του αντίστοιχου λογισμικού του.

Κάποιους από τους στόχους για τον ιατρικό τομέα είναι η ανακατασκευή ενός κρανίου, η μείωση του χειρουργικού χρόνου, η επίτευξη του πιο ακριβούς αποτελέσματος και η αύξηση της ποιότητας των εμφυτευμάτων, ενώ παράλληλα η δημιουργία εξελιγμένων ιατρικών μοντέλων σε λιγότερο χρόνο και με χαμηλότερο κόστος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2, τα τελευταία χρόνια και μέχρι το 2018, οι χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον ιατρικό τομέα έχει δει σημαντική άνοδο. Οι απαιτήσεις του ιατρικού τομέα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε κύριες κατηγορίες για την χρήση της τρισδιάστατης σάρωσης.



Σχήμα 4.2: Δημοσιεύσεις για την τρισδιάστατη εκτύπωση στον ιατρικό τομέα μέχρι το 2018 [41]

4.3.1 Πολυπλοκότητα

Οι συμβατικές τεχνικές κατασκευής δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις περίπλοκες και οργανικές μορφές του εξωτερικού στρώματος του σώματος. Οποιοδήποτε μοντέλο θελήσουμε μπορεί να αποτυπωθεί άμεσα με τη χρήση της τρισδιάστατης σάρωσης. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σάρωση και την εκτύπωση κάθε είδους περίπλοκου ιατρικού μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων λεπτών ικριωμάτων που κατασκευάζονται άψογα σε ψηφιακό περιβάλλον. Ο σχεδιασμός των ζητούμενων μοντέλων επιτυγχάνεται πλέον εύκολα με τη χρήση της τρισδιάστατης σάρωσης.

4.3.2 Χρόνος

Η δυνατότητα δημιουργίας και επανάληψης σχεδίων με μεγάλη ταχύτητα είναι ένα από τα προτερήματα της τρισδιάστατης σάρωσης. Είναι ένα κρίσιμο εργαλείο και βοηθά στην πιο γρήγορη αποκατάσταση των ασθενών. Επηρεάζει τον τρόπο κατασκευής της ιατρικής συσκευής ή του εμφυτεύματος.

4.3.3 Κόστος

Τα ιατρικά δεδομένα διαφέρουν από ασθενή σε ασθενή, επομένως δημιουργούνται συγκεκριμένα, εξιδεικευμένα εξαρτήματα με τη χρήση τρισδιάστατων σαρωτών και εκτυπωτών. Με την τρισδιάστατη σάρωση χρη-

σιμοποιούνται μηχανήματα για τη δημιουργία ενός μοντέλου με μικρότερο κόστος.

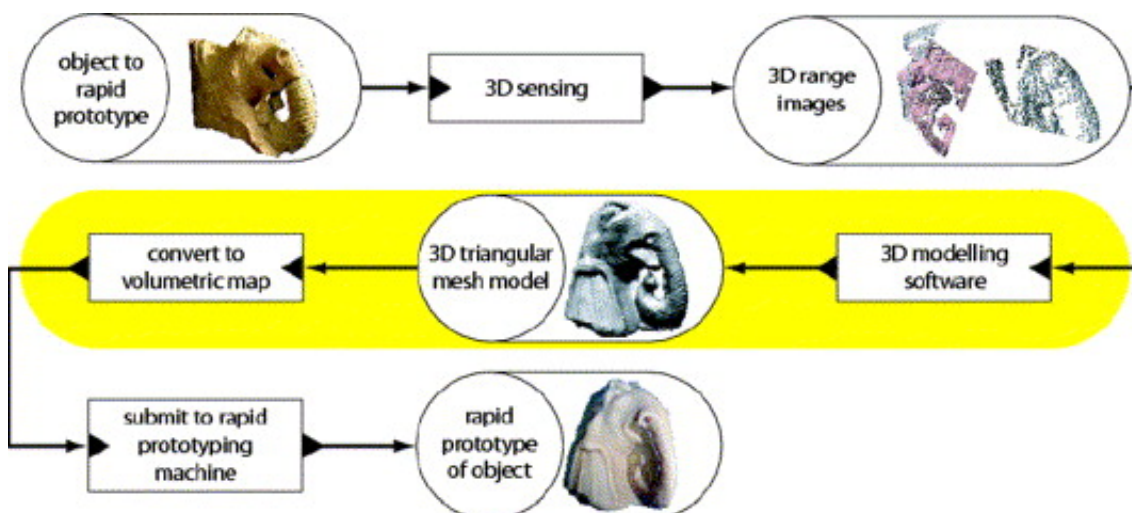
4.3.4 Δεδομένα

Τα δεδομένα σάρωσης για κάθε ασθενή μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν με τους σημερινούς εκτυπωτές. Τα δεδομένα αναπαρίστανται με ακρίβεια ως σύνολο σημείων, δημιουργώντας μια τρισδιάστατη επιφάνεια που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο να μετρηθεί. Για αυτά τα δεδομένα υπάρχει επίσης η δυνατότητα αποθήκευσης και περαιτέρω ανάλυσης.

4.3.5 Υλικά εκτύπωσης

Χρησιμοποιώντας ορισμένες μεθόδους τρισδιάστατης σάρωσης είναι δυνατή η μεμονωμένη εκτύπωση ενός τρισδιάστατου φυσικού μοντέλου που χρησιμοποιεί διάφορα υλικά. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να απεικονίσει ένα θραύσμα οστού, πριν από τη δημιουργία του χειρουργικού μοντέλου και να βοηθήσει τον χειρουργό να κατανοήσει το μοναδικό πρόβλημα με τον ασθενή.

Τέλος, η χρήση της αντίστροφης μηχανικής και ιδιαίτερα της τρισδιάστατης σάρωσης ακολουθείται από την χρήση της προσθετικής κατασκευής και ιδιαίτερα της τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.



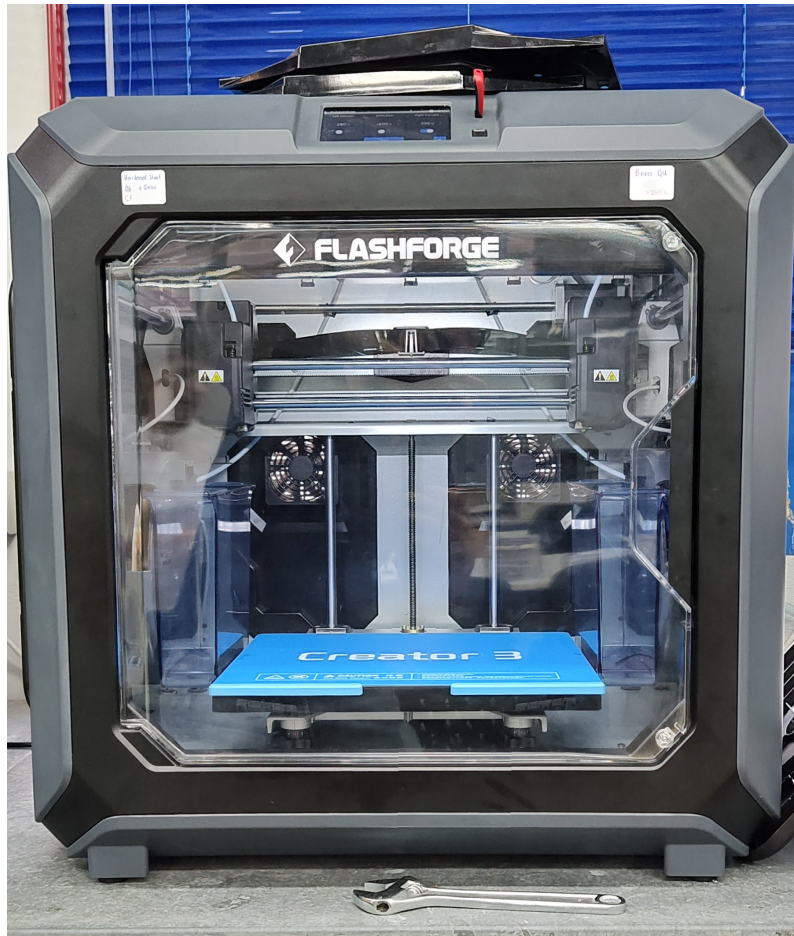
Σχήμα 4.3: Ρόη εργασίας και σύνδεση της τρισδιάστατης σάρωσης με την τρισδιάστατη εκτύπωση [42]

4.4 Τρισδιάστατη σάρωση και αντίστροφη μηχανική ανθρώπινου μηριαίου οστού

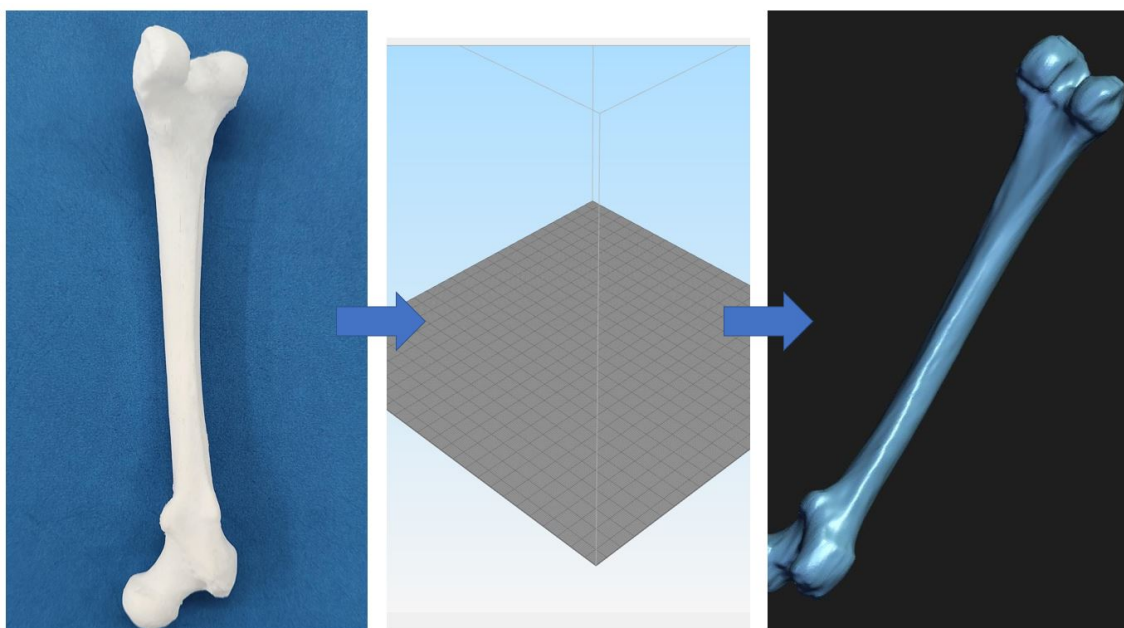
Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής και της τρισδιάστατης σάρωσης χρησιμοποιήθηκαν για να σκαναριστεί ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο ανθρώπινο μηριαίο οστό.

4.4.1 Τρισδιάστατη σάρωση του μηριαίου οστού

Πριν τεθεί σε εφαρμογή ο τρισδιάστατος σαρωτής, τυπώθηκε τρισδιάστατα ένα ανθρώπινο μηριαίο οστό χρησιμοποιώντας ένα αρχείο STL (*Standard Triangle Language*) από το αρχείο του διαδικτύου GrabCAD. Το αρχείο είναι μία τρισδιάστατη αναπαράσταση ενός δεξιού ανδρικού ανθρώπινου μηριαίου οστού που προήλθε από εικονική αξονική τομογραφία (*CT Scan*). Για λόγους πρακτικότητας και χωρητικότητας του τρισδιάστατου σαρωτή στο επόμενο βήμα της σάρωσης, το μηριαίο οστό τυπώθηκε σε κλίμακα 20% του αρχικού μοντέλου. Για την εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Flashforge Creator 3, ο οποίος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4, διαθέσιμος προς τους φοιτητές στο Εργαστήριο Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς, καθώς και η παραμετροποίηση των συνθηκών εκτύπωσης έγιναν με το πρόγραμμα Simplify3D. Η διαδικασία εκτύπωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5.



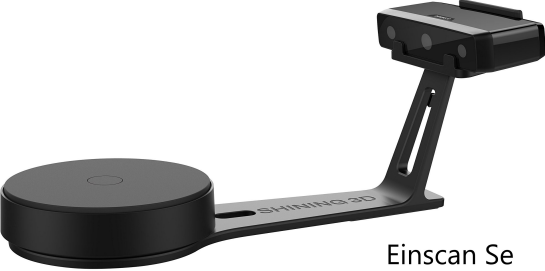
Σχήμα 4.4: Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Flashforge Creator 3 που πραγματοποιήθηκαν οι τρισδιάστατες εκτυπώσεις, διαθέσιμος προς του φοιτητές στο Εργαστήριο Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς



Σχήμα 4.5: Διαδικασία εκτύπωσης του ανθρώπινου μηριαίου οστού

Για την τρισδιάστατη σάρωση χρησιμοποιήθηκε ο σαρωτής Einscan SE της εταιρείας Shining3D. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του σαρωτή.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου σαρωτή

 <p>Einscan Se</p>	Σαρωτής
Μέθοδος σάρωσης	Δομημένου φωτός (Structured light)
Πηγή φωτός	LED (Light emitting diode)
Χρήση δίσκου περιστροφής	Ναι
Μέθοδος ευθυγράμμισης	Αυτόματη
Εύρος	200×150 mm
Ακρίβεια	≤0.1 mm
Ανάλυση κάμερας	1.3 Mega Pixels
Μέγιστος όγκος σάρωσης με τη χρήση δίσκου	200×200×200mm
Ταχύτητα σάρωσης	<2 mins
Τύποι εξαγωγής των αρχείων σάρωσης	OBJ,STL,ASC,PLY
Βάρος	2.5 kg
Διαστάσεις	570×210×210 mm
Λογισμικό	EXScan S (Shining3D)

Αρχικά, το πρώτο στάδιο είναι η σωστή τοποθέτηση του αντικειμένου που θα σκαναριστεί, στην συγκεκριμένη περίπτωση του μηριαίου οστού. Το μηριαίο οστό τοποθετήθηκε στην αρχή σε όρθια κάθετη θέση αλλά λόγω της περιορισμένης ογκομετρικής σάρωσης του τρισδιάστατου σαρωτή Einscan SE, υπήρξε αστοχία στην απόκτηση των πληροφοριών της επιφάνειας.

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, το μοντέλο του μηριαίου οστού τοποθετήθηκε έτσι ώστε το ύψος της σάρωσης να ελαχιστοποιηθεί και να μεγιστοποιηθεί η αποτύπωση του στο λογισμικό. Έτσι το μηριαίο οστό τοποθετήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Χάρης στην διαγώνια τοποθέτηση του πάνω στο δίσκο περιστροφής, τα δεδομένα της τρισδιάστατης σάρωσης ήταν επιτυχή.

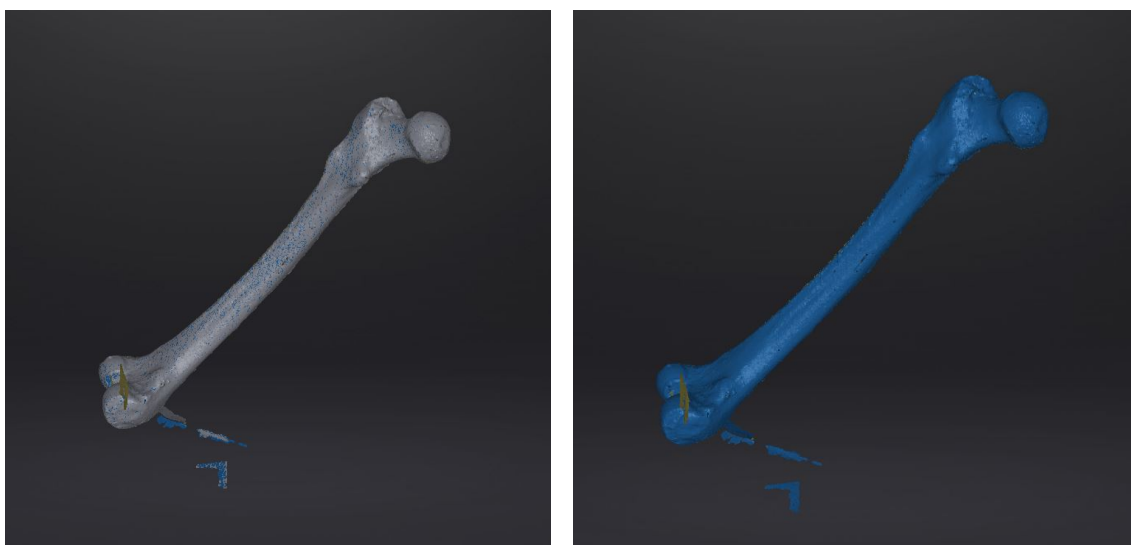


Σχήμα 4.6: Τοποθέτηση και σταθεροποίηση του μηριαίου οστού στο δίσκο περιστροφής του Einscan SE

Έγιναν 16 περιστροφές του δίσκου οδηγώντας σε πολλαπλές σαρώσεις του μηριαίου οστού, με στόχο την όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια της επιφάνειας και των χαρακτηριστικών της. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία της μετεπεξεργασίας του μοντέλου, δηλαδή του φινιρίσματος των δεδομένων, της επιδιόρθωσης τους καθώς και της ευθυγράμμισης των πολλαπλών λήψεων σε μία τελική.

4.4.2 Μετεπεξεργασία των δεδομένων στο περιβάλλον EXScan S

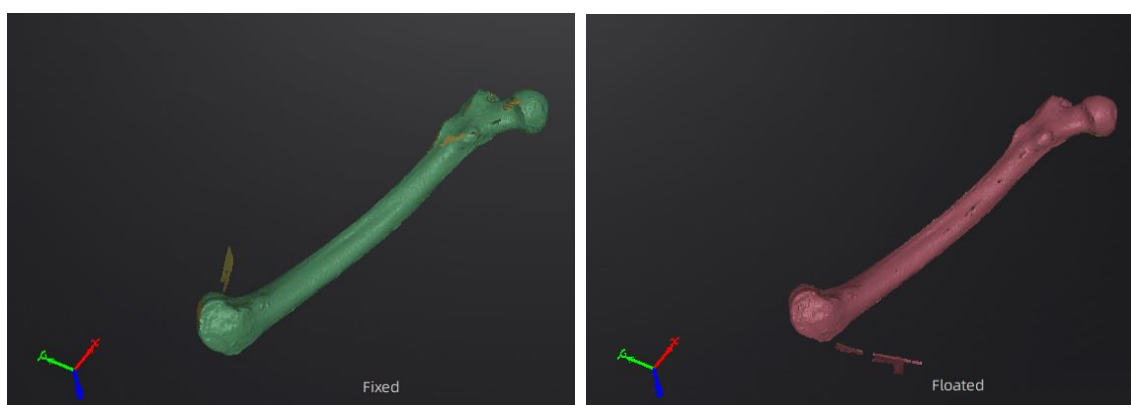
Δεδομένα απεικόνισης



Επεξεργασία

Τα αρχεία που εξάγει το λογισμικό EXScan S είναι σε μορφή .ASC. Αυτά τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν ένα νέφος σημείων. Οι αρχικές σαρώσεις που απεικονίζονται σε γκρι χωρίς την επιλογή των σημείων και σε μπλε με την επιλογή ολόκληρων των σημείων σάρωσης.

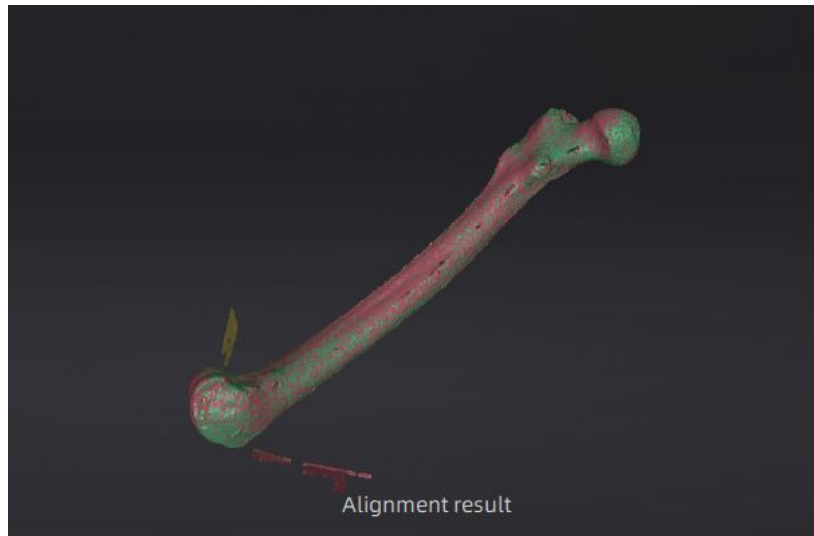
Δεδομένα απεικόνισης



Επεξεργασία

Για την μεγιστοποίηση της ποιότητας της σάρωσης, ξαναγίνεται η ίδια διαδικασία με 16 περιστροφές και δημιουργούνται ακόμα περισσότερα δεδομένα νέφους σημείων.

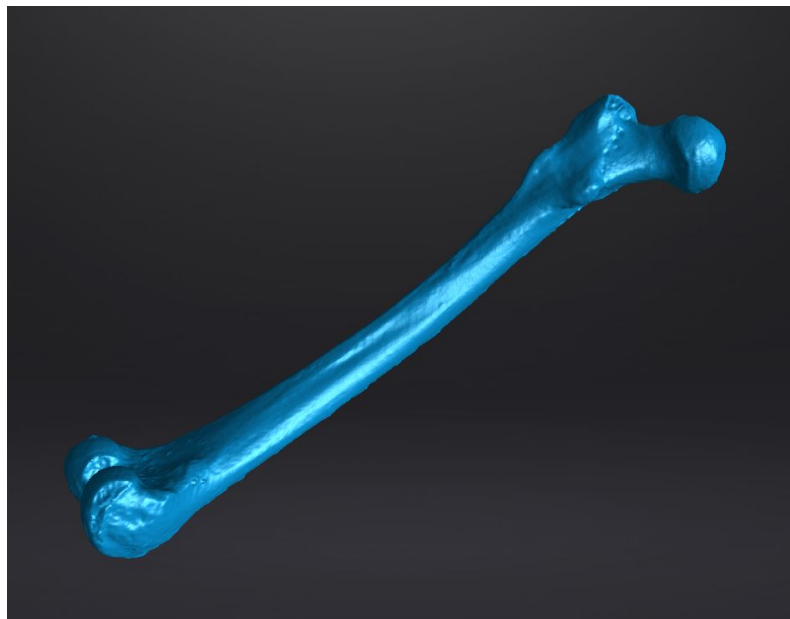
Δεδομένα απεικόνισης



Συγχώνευση

Το αποτέλεσμα από τις δύο αναλύσεις, η τελική ευθυγράμμιση και η συγχώνευση τους.

Δεδομένα απεικόνισης



Τελικό μοντέλο

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η επιλογή δημιουργίας unwatertight μοντέλου μορφής *CAD*, και ειδικότερα σε μορφή *STL*. Το τελικό μοντέλο έχει 2,5 εκατομμύρια σχεδιαστικά πολύγωνα.

5

Σχεδιασμός εξατομικευμένης χειρουργικής πλάκας και τρισδιάστατη εκτύπωση

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τον σχεδιασμό του τρισδιάστατου μοντέλου της χειρουργικής πλάκας με βάση το σκαναρισμένο μηριαίο οστό και η τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσής της. Σκοπός είναι να εξεταστεί η συμβατότητα με το μοντέλο του ανθρώπινου μηριαίου οστού και να αξιολογηθεί η διαδικασία σε σύνολο με τις υπόλοιπες.

5.1 Σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου χειρουργικής πλάκας

Για την σχεδίαση της χειρουργικής πλάκας, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό *STL* μοντέλο του μηριαίου οστού που αποκτήθηκε από το τρισδιάστατο σκανάρισμα στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.1.1 Στερεή μοντελοποίηση (Solid Modeling)

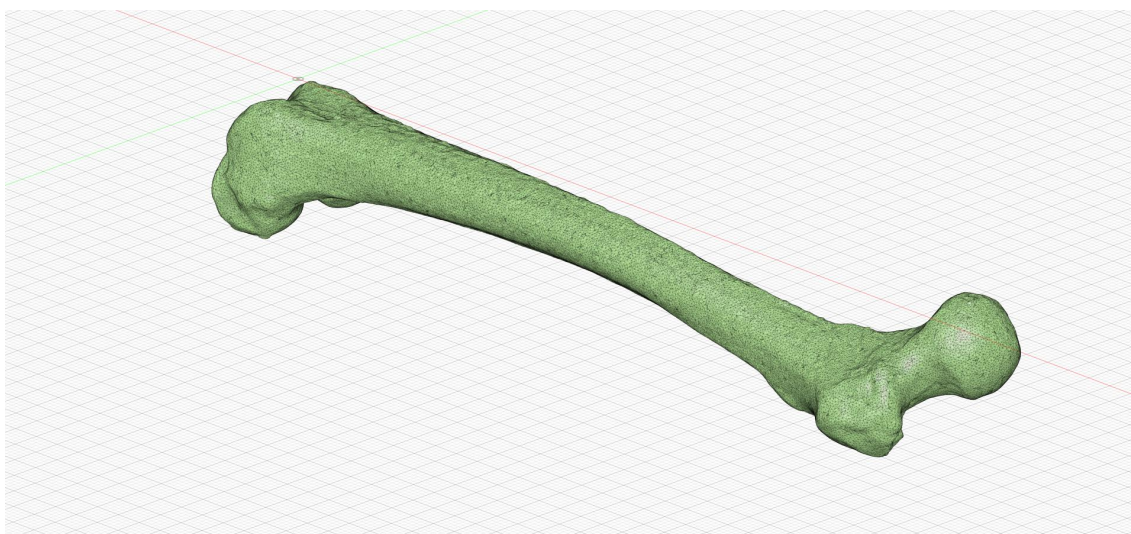
Για να μπορέσει να σχεδιαστεί η εξατομικευμένη πλάκα με βάση το μηριαίο οστό, θα πρέπει να εισαχθεί σε κάποιο λογισμικό το μοντέλο *STL* του μηριαίου οστού για περαιτέρω επεξεργασία. Επιπλέον, για την παραγωγή της χειρουργικής πλάκας, θα εξεταστούν και τα χαρακτηριστικά του οστού και η επιφάνειά του.

Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα λογισμικά σχεδιασμού στερεής μοντελοποίησης όπως Autodesk Inventor, FreeCAD, Rhinoceros Autodesk Fusion 360 και AutoCAD. Επιλέχθηκε το Autodesk Fusion 360 καθώς έχει ενσωματωμένες δυνατότητες για τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Μπορεί να διαχειριστεί εξαιρετικά τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής με σκο-

πό την τρισδιάστατη εκτύπωση. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό της χειρουργικής πλάκας στο Autodesk Fusion 360.

5.1.1.1 Εισαγωγή αρχείου STL του μηριαίου οστού

Αρχικά, εισήχθη το αρχείο *STL* του μηριαίου οστού στο Autodesk Fusion 360. Μία οπτική αναπαράσταση του περιβάλλοντος και της παρουσίας του ίδιου του οστού φαίνεται στην εικόνα 5.1.



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση του μηριαίου οστού στο περιβάλλον του Autodesk Fusion 360

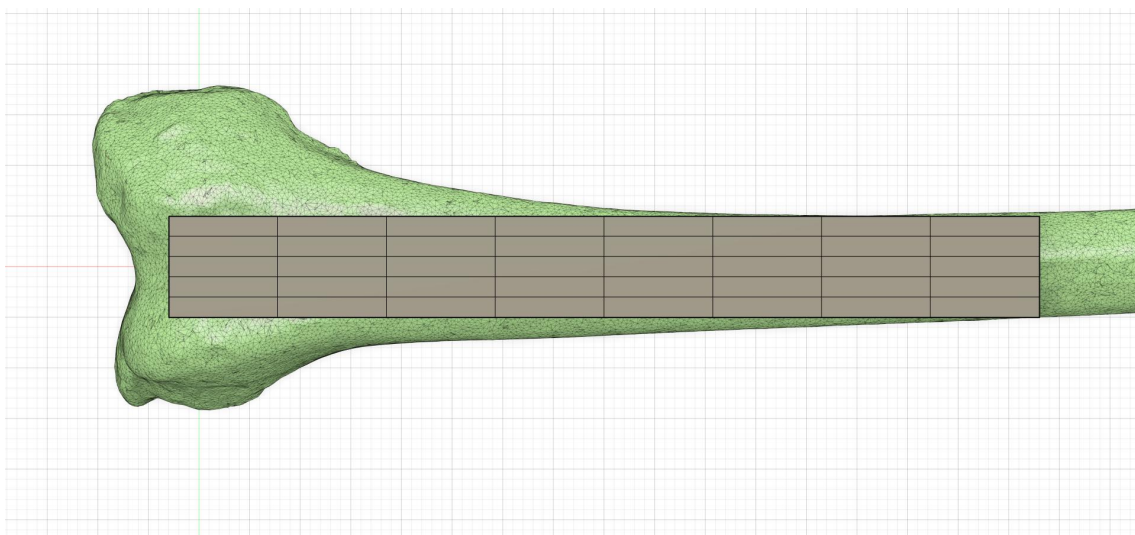
Τα χαρακτηριστικά του μηριαίου οστού παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μηριαίου οστού

Επιφάνεια	8834,06 mm ²
Πυκνότητα	1,24 g/cm ³
Μάζα	0,454 g
Όγκος	27.847,889 mm ³
Υλικό	PLA

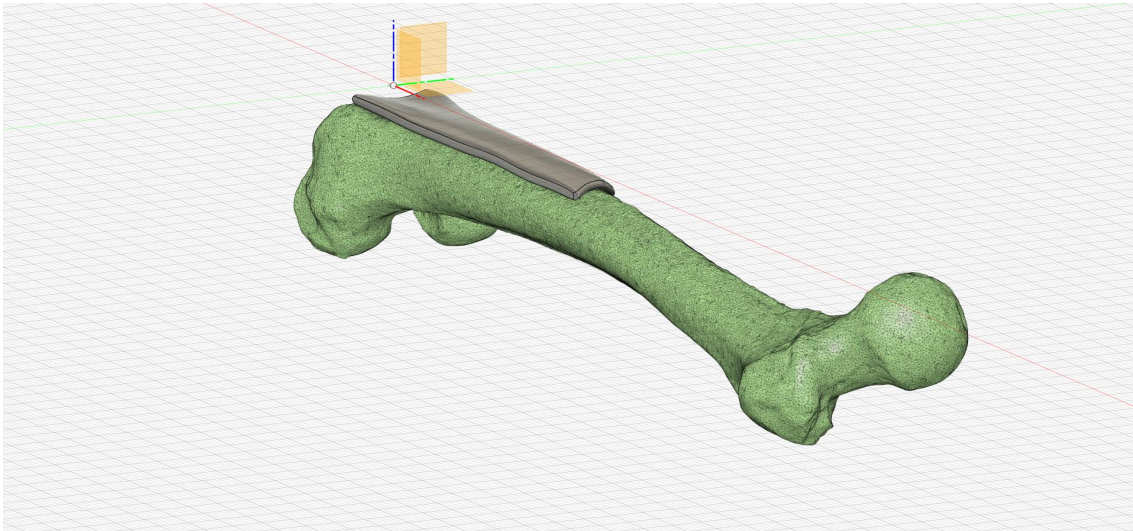
5.1.1.2 Κατασκευή εξατομικευμένης χειρουργικής πλάκας πάνω στην επιφάνεια του μηριαίου οστού

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες του Autodesk Fusion 360, και συγκεκριμένα την λειτουργία: Create Mesh Plane, δημιουργήθηκε ένα επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, στο οποίο βασίστηκε ο περαιτέρω σχεδιασμός της χειρουργικής πλάκας.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση της αρχής της διαδικασίας σχεδίασης της πλάκας στο Autodesk Fusion 360

Με χρήση της εντολής "Pull", την αύξηση του πάχους και το στοργγύλεμα και φινίρισμα των γωνιών του σχήματος [43], επιτυγχάνεται η εξατομίκευση της πλάκας πάνω στο μηριαίο οστό. Το λογισμικό ταιριάζει τα διανύσματα της πλάκας και του μηριαίου οστού, δημιουργώντας απόλυτη συμβατότητα της κάτω επιφάνειας της πλάκας και αντίστοιχα της πάνω επιφάνειας του οστού, όπως φαίνεται από την απεικόνιση της διαδικασίας στην εικόνα 5.3.

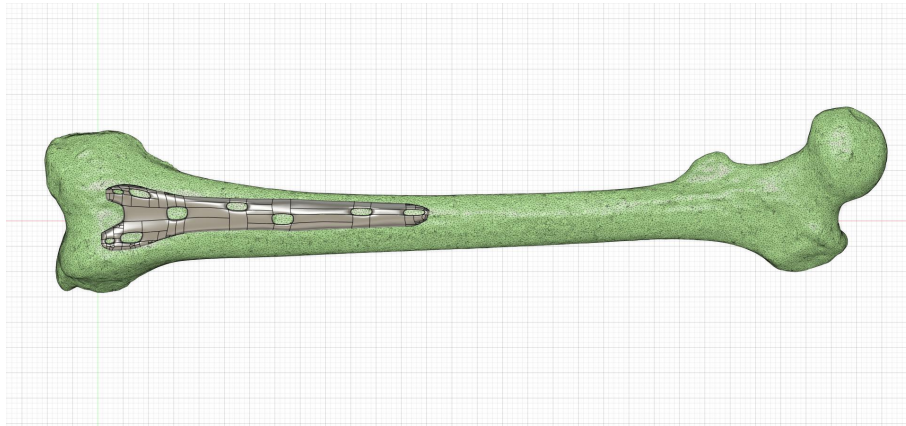


Σχήμα 5.3: Απεικόνιση της συμβατότητας των επιφανειών πλάκας και οστού

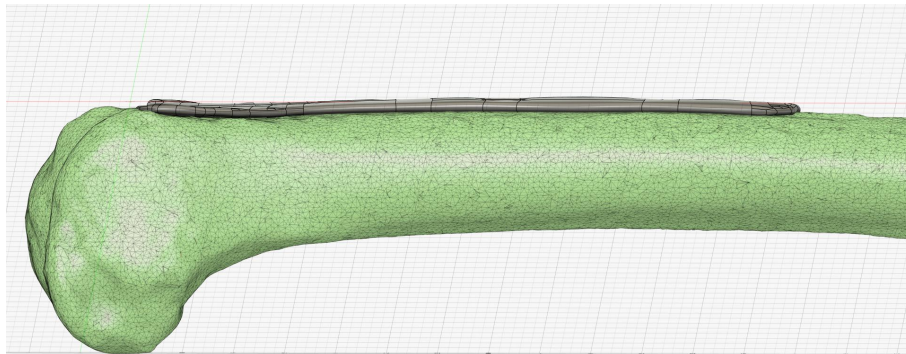
Τέλος, μορφοποιώντας την πλάκα και τοποθετώντας τις οπές στις οποίες θα μπορέσουν να περαστούν οι χειρουργικές βίδες οστεοσύνθεσης, καταλήγουμε στις απεικονίσεις 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 όπως φαίνονται μέσα από το περιβάλλον του Autodesk Fusion 360.



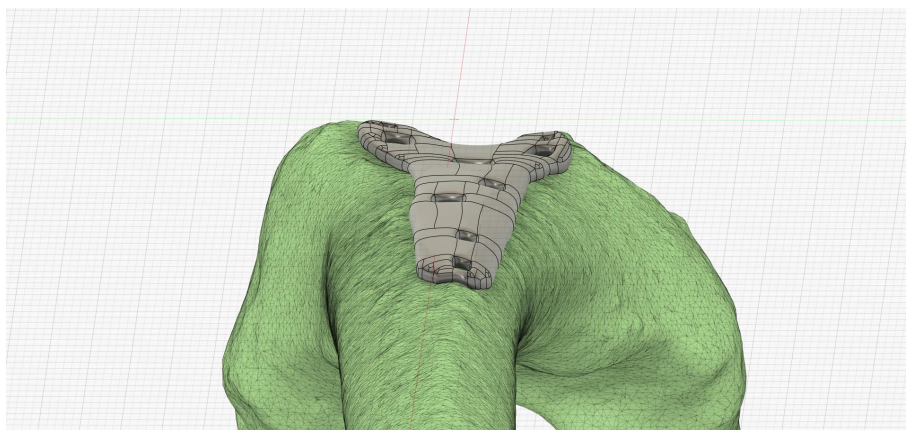
Σχήμα 5.4: Διαγώνια όψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα



Σχήμα 5.5: Κάτοψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα

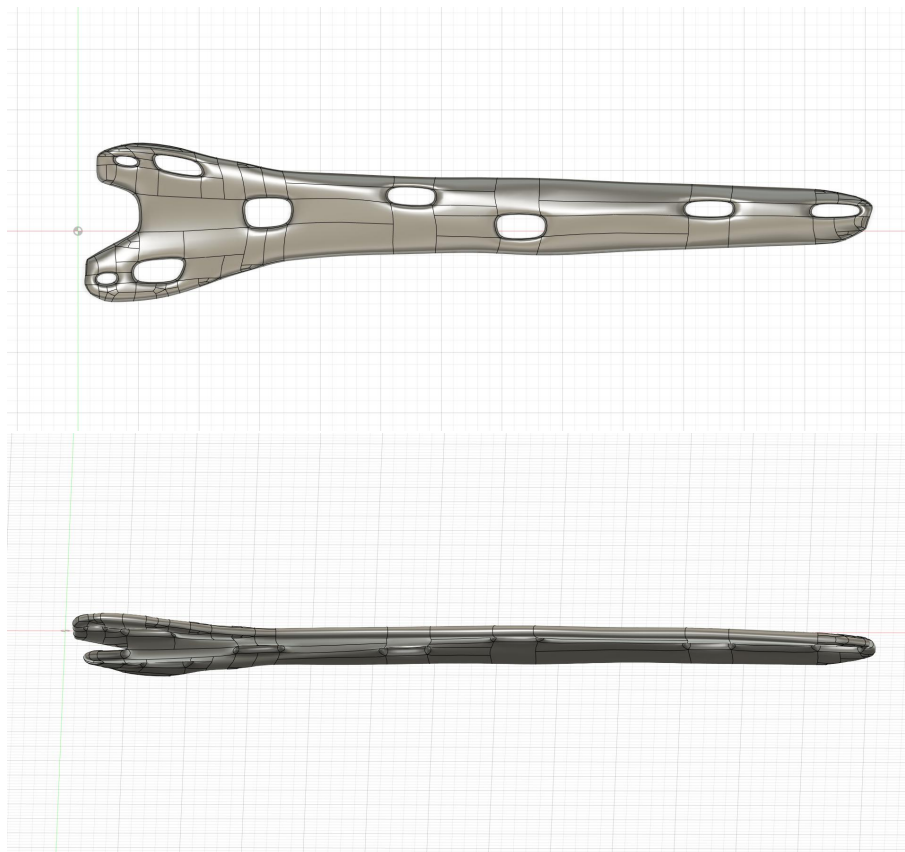


Σχήμα 5.6: Πλάγια όψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα



Σχήμα 5.7: Μπροστινή όψη του οστού μαζί με την ολοκληρωμένη χειρουργική πλάκα

Στο σχήμα 5.8 αποτυπώνεται το τελικό σχέδιο της αυτόνομης χειρουργικής πλάκας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της.



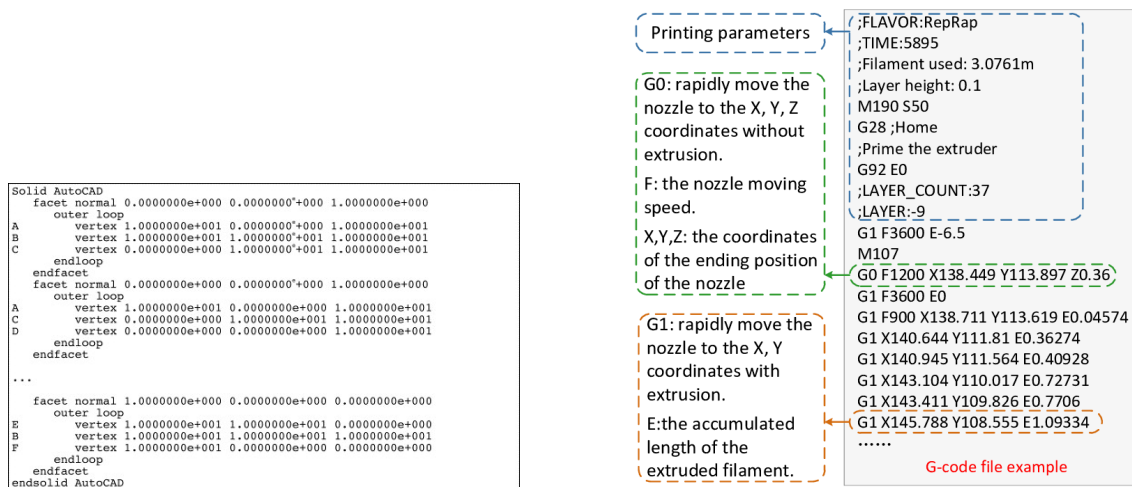
Σχήμα 5.8: Κάτοψη και πλαινή όψη της πλάκας

5.1.2 Τεμαχισμός (Slicing)

Οι πληροφορίες που απαιτούνται για την παραγωγή οποιουδήποτε εξαρτήματος σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή πρέπει να είναι σε μορφή που μπορεί να διαβάσει ο επεξεργαστής του. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι πρακτικά αριθμητικά ελεγχόμενες συσκευές με την πλειονότητα των κοινών τρισδιάστατων εκτυπωτών χρησιμοποιεί τη γλώσσα GCODE, που είναι μια γλώσσα λογισμικού βασισμένη σε κείμενο.

Οι γεωμετρικές και οι χαρακτηριστικές λεπτομέρειες ενός εξαρτήματος περιγράφονται στο CAD μοντέλο, όπως στο σχήμα 5.8 το οποίο δεν μπορεί απλά να φορτωθεί σε ένα λογισμικό τεμαχισμού για την παραγωγή του GCODE, ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 5.9. Για να τεμαχιστεί το μοντέλο, θα πρέπει να μεταφραστεί σε μία μορφή την οποία "διαβάζει" ο τρισδιάστατος εκτυπωτής. Η μορφή αρχείου *STL* είναι η πιο συχνή και χρησιμοποιείται παγκόσμια, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι πληροφορίες αποθηκεύονται στα αρχεία *STL* ως διανύσματα όπου οι κορυφές τους δημιουργούν τρίγωνα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9. Το μόνο πρόβλημα παρουσιάζεται στο ότι στα αρχεία *STL* δεν μπορούν να περι-

ληφθούν οι πληροφορίες του χρώματος και της υφής. Για αυτό τον λόγο, ελήφθη από το Autodesk Fusion 360, το μοντέλο της πλάκας σε μορφή αρχείου *STL*.



Σχήμα 5.9: Η μετατροπή του κώδικα STL σε GCODE [44]

Υπάρχουν διάφορα λογισμικά που μπορούν να μετατρέψουν μοντέλα CAD σε μορφές αρχείων που μπορούν να κατανοήσουν οι επεξεργαστές των τρισδιάστατων εκτυπωτών. Ως παράδειγμα, κάποια προγράμματα τεμαχισμού είναι το Cura, το Slic3r και το Simplify3D. Δεδομένου ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση περιλαμβάνει το "χτίσιμο" του υλικού σε επίπεδα, το μοντέλο CAD πρέπει να τεμαχιστεί, να ανακτηθεί το επεξεργαστεί το προφίλ του αντικειμένου προς εκτύπωση και να δημιουργηθούν οι εντολές κίνησης του εκτυπωτή για να μπορέσει να δημιουργήσει τα επίπεδα. Οι πληροφορίες για κάθε κορυφή των τριγώνων εξάγονται από το αρχείο *STL* και αποθηκεύονται σε πίνακες. Οι συντεταγμένες του z-άξονα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου και το πάχος των επιπέδων του αντικειμένου ορίζεται από τον χρήστη του λογισμικού.

5.1.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση της χειρουργικής πλάκας

Η τεχνική προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιείται στους εκτυπωτές Μοντελοποίησης Σύντηξης Εναπόθεσης (*Fused Deposition Modeling—FDM*) βασίζεται στην εξώθηση υλικού. Σε αυτό το σενάριο, το νήμα *PLA* λιώνει από ένα εργαλείο εξώθησης, το οποίο στη συνέχεια ακολουθεί το προφίλ του τεμαχισμένου μοντέλου. Αυτό πραγματοποιείται καθώς ο εξωθητής ανυψώνεται κατά σταθερά συνήθως βήματα, μεγέθους χιλιοστών, ή όπως έχει οριστεί από τον χρήστη [45].

Η χειρουργική πλάκα τυπώθηκε τρισδιάστατα χρησιμοποιώντας τον εκτυπωτή Flashforge Creator 3, ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 4.4. Το αρχείο STL που δημιουργήθηκε από το λογισμικό εισήχθη στη συνέχεια στο λογισμικό τεμαχισμού που χρησιμοποιήθηκε για αυτόν τον εκτυπωτή, όπως και στο υποκεφάλαιο 4.4.1, το Simplify3D. Στη συνέχεια, το τεμαχισμένο μοντέλο εισάγεται στο κέντρο ελέγχου του λογισμικού όπου το μοντέλο τοποθετήθηκε στην ζητούμενη θέση και προσανατολισμό για την εκτύπωση.

Στον πίνακα 5.2 μπορούμε να δούμε τις ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση της χειρουργικής πλάκας.

Πίνακας 5.2: Ρυθμίσεις τρισδιάστατης εκτύπωσης της χειρουργικής πλάκας

Υλικό	PLA
Ποιότητα τύπωσης	Υψηλή
Εξωθητήρας	Δεξιός
Πάχος επιπέδων	0.4 mm
Ταχύτητα εκτύπωσης	Υψηλή
Θερμοκρασία εκτύπωσης	210°C

Η τυπωμένη πλάκα περιείχε όσο το δυνατόν λιγότερες δομές στήριξης καθώς τυπώθηκε σε κάθετο προσανατολισμό χάρις στην χρήση ενός κάθετου κυλίνδρου με τρεις "γέφυρες" συνένωσης ως την βασική της στήριξη.

Καθώς ο τρισδιάστατος εκτυπωτής δεν διέθετε την απαραίτητη ευκρίνεια για την σωστή εκτύπωση της πλάκας στο αρχικό της μέγεθος, επιλέχθηκε η επιπλέον μεγέθυνσή της κατά 100%, αποκτώντας το διπλάσιο μέγεθος. Για να μπορέσει να εκτιμηθεί η συμβατότητα της πλάκας με το μηριαίο οστό, πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη εκτύπωση του στο ίδιο μέγεθος με την χειρουργική πλάκα. Λόγω του μεγέθους του εκτυπωτή τυπώθηκε το μισό μηριαίο οστό, καθώς δεν επηρεάζει την τοποθέτηση της πλάκας πάνω σε αυτό.

Τέλος, στο σχήμα 5.10 φαίνεται η τρισδιάστατα τυπωμένη χειρουργική πλάκα μετά την αφαίρεση των δομών στήριξης και στο σχήμα 5.11 τοποθετημένη πάνω στο μοντέλο του μηριαίου οστού.



Σχήμα 5.10: Η τρισδιάστατα τυπωμένη χειρουργική πλάκα



Σχήμα 5.11: Η τρισδιάστατα τυπωμένη χειρουργική πλάκα πάνω στο μηριαίο οστό

6

Επίλογος και μελλοντικές εφαρμογές

Σε έναν ευμετάβλητο παγκόσμιο περιβάλλον, η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη. Παρά το γεγονός ότι έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για τον ιατρικό τομέα και την ιατρική εκπαίδευση, η προσθετική κατασκευή έχει επί του παρόντος πολλές ανεκμετάλλευτες δυνατότητες λόγω των δυσκολιών της. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο μέσω της ανάπτυξης ενός τρισδιάστατου προσθετικού μοντέλου, μίας χειρουργικής πλάκας, την ανάδειξη και τη διαχείριση των διαδικασιών της προσθετικής κατασκευής που ακολουθούνται στον ιατρικό τομέα.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα για την προσθετική κατασκευή και την τρισδιάστατη εκτύπωση. Αναφέρθηκαν, χρησιμοποιώντας την τωρινή βιβλιογραφία, τα πλεονέκτηματά καθώς και οι περιορισμοί της. Παρατηρήθηκαν οι διαφορές σε σχέση με τη συμβατική κατασκευή και περιγράφηκαν οι διεργασίες της με βάση το ASTM [1]. Όσον αφορά την χρήση της στον ιατρικό τομέα, αναφέρθηκαν οι κύριες ιατρικές εφαρμογές της και διαπιστώθηκε η σημαντική αύξηση της χρήσης της καθώς και η πληθώρα των εφαρμογών της. Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.6, οι διαδικασίες που ακολουθούνται προσφέρουν έναντι της συμβατικής κατασκευής, ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό εξατομίκευσης και παραγγελίας κατ' ανάγκης του ασθενούς.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μία βιβλιογραφική ανασκόπηση για να περιγραφούν οι πτυχές που σχετίζονται με τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις διαδικασίες της προσθετικής κατασκευής. Με τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι έχει αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των ερευνών σχετικά με τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής και τρισδιάστατης εκτύπωσης τα τελευταία χρόνια, στον ιατρικό τομέα. Παρατηρήθηκε ότι η εισαγωγή της προσθετικής κατασκευής στην ιατρική δημιουργεί έναν επιπλέον υβριδικό ρόλο εργασίας,

αυτόν του μηχανικού σχεδιασμού, ρόλος που θα πρέπει να ταιριάζει και να κατανοεί το ιατρικό περιβάλλον και να έχει τις απαραίτητες γνώσεις για να υποστηρίζει το ιατρικό προσωπικό.

Αναγνωρίστηκαν κάποιοι βασικοί τομείς όπου η προσθετική κατασκευή ή αλλάζει τις διαδικασίες του ιατρικού τομέα, αυτοί των αποτελεσμάτων, της ηγεσίας, των κανονισμών, της εφοδιαστικής αλυσίδας και των οικονομικών. Με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα βελτιωθούν οι διαδικασίες ως προς την ταχύτητα, την εξυπηρέτηση, την ελαχιστοποίηση των αναγκαίων πόρων και τον προγραμματισμό του ιατρικού προσωπικού. Οι ασθενείς μπορούν να είναι δέκτες μίας πολύ πιο εξατομικευμένης ιατρικής μεταχείρισης, προσαρμοσμένης στις ανάγκες τους. Συμπεράσθηκε ότι η ανωτάτη διοίκηση του εκάστοτε οργανισμού, παίζει σημαντικό ρόλο στην υιοθέτηση και προώθηση της τεχνολογίας και είναι υπεύθυνη για την επιλογή και βελτιστοποίηση των αντίστοιχων διαδικασιών. Όσον αφορά την εφοδιαστική αλυσίδα και τα οικονομικά, συμπεραίνουμε ότι με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να διαχειρισθεί καλύτερα η διαδικασία της διαχείρισης των αποθεμάτων σε ιατρικές συσκευές, μοντέλα και εμφυτεύματα, οδηγώντας έτσι στην εξοικονόμηση χρημάτων και τον εξορθολογισμό της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μία έρευνα για την αντίστροφη μηχανική και υπό την αιγίδα της, την τρισδιάστατη σάρωση στον ιατρικό τομέα. Παρατηρήθηκε ότι η αντίστροφη μηχανική χρησιμοποιείται για την στερεά μοντελοποίηση, τον χειρουργικό σχεδιασμό και έλεγχο καθώς και για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής είναι μια σπουδαία τεχνολογία υποστήριξης για τον ιατρικό τομέα, καθώς προσφέρει εφαρμόσιμες εναλλακτικές τεχνικές για τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών, με τις απαιτήσεις να αναλύονται σε πέντε κατηγορίες, πολυπλοκότητα, χρόνο, κόστος, δεδομένα και υλικά εκτύπωσης.

Ένα τρισδιάστατα τυπωμένο μηριαίο οστό, σαρώθηκε τρισδιάστατα χρησιμοποιώντας τον σαρωτή Einscan SE, παρουσιάζοντας κατά τη διάρκεια τα βήματα της διαδικασίας της αντίστροφης μηχανικής. Η ταχύτητα και ευκολία στη σάρωση του μηριαίου οστού καθιστά την τρισδιάστατη σάρωση μία καινοτόμα και πολλά υποσχόμενη διαδικασία στον ιατρικό τομέα. Στη συνέχεια, το μοντέλο του μηριαίου οστού εισήχθη στο λογισμικό Autodesk Fusion 360 και με την βοήθειά του, σχεδιάστηκε μία χειρουργική πλάκα υποστήριξης του. Όπως και στην τρισδιάστατη

σάρωση, η ταχύτητα σχεδιασμού και η δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας, δείχνει το δρόμο για ένα λαμπρό μέλλον στις ιατρικές εφαρμογές, με την χρήση των σωστών υλικών. Τέλος, η χειρουργική πλάκα τυπώθηκε με την χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή και τοποθετήθηκε πάνω στο μηριαίο οστό.

Συμπερασματικά, όλοι οι στόχοι αυτής της διπλωματικής εργασίας επιτεύχθηκαν, δηλαδή η βιβλιογραφική μελέτη για τις ιατρικές εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής, η ανάλυση των διαδικασιών, η ανάλυση της αντίστροφης μηχανικής στον ιατρικό τομέα, η διαδικασία μετατροπής δεδομένων ιατρικών εικόνων για σκοπούς τρισδιάστατης εκτύπωσης και τέλος η μελέτη περίπτωσης μίας τρισδιάστατα τυπωμένης χειρουργικής πλάκας.

6.1 Το μέλλον

Έχοντας ήδη ξεκινήσει, στο μέλλον η προσθετική κατασκευή θα έχει τη δυνατότητα της γρήγορης και ποιοτικής εξυπηρέτησης με ιατρικά προϊόντα προσαρμοσμένα στις ατομικές ανάγκες του εκάστοτε ασθενή. Αυτό θα μεταβάλλει το ιατρικό περιβάλλον δημιουργώντας μία αλλαγή στις διαδικασίες. Πιθανές τοποθετήσεις πάνω σε αυτή την διπλωματική εργασία είναι:

- Περαιτέρω εξέταση του ιατρικού μοντέλου από την πλευρά της διαχείρισης έργων σε ιατρικό και νοσοκομειακό περιβάλλον, σε δημόσια και ιδιωτική διοίκηση. Συνεντεύξεις σε διοικητικό και εργατικό προσωπικό των νοσοκομείων για να ερευνηθεί που μπορεί η αντίστροφη μηχανική και η τρισδιάστατη εκτύπωση να συμβάλλει καινοτόμα στις διαδικασίες και στην διαχείριση του εκάστοτε οργανισμού.
- Ανάλυση της δυνατότητας για αυτοματοποίηση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, δημιουργίας μίας βάσης δεδομένων των ασθενών και χρήση αυτής για την ανάπτυξη εξατομικευμένων εμφυτευμάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies.
- [2] Mika Salmi. Additive Manufacturing Processes in Medical Applications. *Materials*, 14(1):191, January 2021.
- [3] Mohd. Javaid and Abid Haleem. Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review. *Alexandria Journal of Medicine*, 54(4):411–422, December 2018. Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1016/j.ajme.2017.09.003>.
- [4] Abid Haleem and Mohd Javaid. 3D printed medical parts with different materials using additive manufacturing. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 8(1):215–223, March 2020.
- [5] Kwok Chuen Wong. 3D-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthopedic Research and Reviews*, 8:57–66, October 2016. Publisher: Dove Press.
- [6] Aamer Nazir, Aashir Azhar, Usman Nazir, Yun-Feng Liu, Waqar S. Qureshi, Jia-En Chen, and Eisa Alanazi. The rise of 3D Printing entangled with smart computer aided design during COVID-19 era. *Journal of Manufacturing Systems*, 60:774–786, July 2021.
- [7] David H. Ballard, Patrick Mills, Richard Duszak, Jeffery A. Weisman, Frank J. Rybicki, and Pamela K. Woodard. Medical 3D Printing Cost-Savings in Orthopedic and Maxillofacial Surgery: Cost Analysis of Operating Room Time Saved with 3D Printed Anatomic Models and Surgical Guides. *Academic Radiology*, 27(8):1103–1113, August 2020. Publisher: Elsevier.
- [8] Erfan Rezvani Ghomi, Fatemeh Khosravi, Rasoul Esmaeely Neisiany, Sunpreet Singh, and Seeram Ramakrishna. Future of additive

- manufacturing in healthcare. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 17:100255, March 2021.
- [9] Sunpreet Singh and Seeram Ramakrishna. Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 2:105–115, June 2017.
- [10] Philip Tack, Jan Victor, Paul Gemmel, and Lieven Annemans. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *BioMedical Engineering OnLine*, 15(1):115, October 2016.
- [11] F. Rengier, A. Mehndiratta, H. von Tengg-Kobligk, C. M. Zechmann, R. Unterhinninghofen, H.-U. Kauczor, and F. L. Giesel. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(4):335–341, July 2010.
- [12] Hammad H. Malik, Alastair R. J. Darwood, Shalin Shaunak, Priyantha Kulatilake, Abdulrahman A. El-Hilly, Omar Mulki, and Aroon Baskaradas. Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications. *The Journal of Surgical Research*, 199(2):512–522, December 2015.
- [13] Michael P. Chae, Warren M. Rozen, Paul G. McMenamain, Michael W. Findlay, Robert T. Spychal, and David J. Hunter-Smith. Emerging Applications of Bedside 3D Printing in Plastic Surgery. *Frontiers in Surgery*, 2:25, 2015.
- [14] Mika Salmi, Kaija-Stiina Paloheimo, Jukka Tuomi, Jan Wolff, and Antti Mäkitie. Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery: Official Publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 41(7):603–609, October 2013.
- [15] Colleen M. Wixted, Jonathan R. Peterson, Rishin J. Kadakia, and Samuel B. Adams. Three-dimensional Printing in Orthopaedic Surgery: Current Applications and Future Developments. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. Global Research & Reviews*, 5(4):e20.00230–00211, April 2021.
- [16] Jukka Tuomi, Kaija-Stiina Paloheimo, Juho Vehviläinen, Roy Björkstrand, Mika Salmi, Eero Huottilainen, Risto Kontio, Stephen

- Rouse, Ian Gibson, and Antti A. Mäkitie. A novel classification and online platform for planning and documentation of medical applications of additive manufacturing. *Surgical Innovation*, 21(6):553–559, December 2014.
- [17] Marco Keller, Alissa Guebeli, Florian Thieringer, and Philipp Honigmann. Overview of In-Hospital 3D Printing and Practical Applications in Hand Surgery. *BioMed Research International*, 2021:e4650245, March 2021. Publisher: Hindawi.
- [18] David H. Ballard, Anthony Paul Trace, Sayed Ali, Taryn Hodgdon, Matthew E. Zygmunt,Carolynn M. DeBenedectis, Stacy E. Smith, Michael L. Richardson, Midhir J. Patel, Summer J. Decker, and Leon Lenchik. Clinical Applications of 3D Printing: Primer for Radiologists. *Academic Radiology*, 25(1):52–65, January 2018.
- [19] The future of manufacturing.
- [20] Mojtaba khorram niaki and Fabio Nonino. Additive manufacturing management: a review and future research agenda. *International Journal of Production Research*, 55:1–21, September 2016.
- [21] Sarah Trenfield, Christine Madla, Abdul Basit, and Simon Gaisford. The Shape of Things to Come: Emerging Applications of 3D Printing in Healthcare. pages 1–19. August 2018.
- [22] Md. Sarower Tareq, Tanzilur Rahman, Mokarram Hossain, and Peter Dorrington. Additive manufacturing and the COVID-19 challenges: An in-depth study. *Journal of Manufacturing Systems*, 60:787–798, July 2021.
- [23] Zhang Feixiang, Zong Liyong, and Kuang Xia. Study of Impact of 3D Printing Technology and Development on Creative Industry. *Journal of Social Science Studies*, 3:57, February 2016.
- [24] Aaron Gordon and Julien Pollack. Managing Healthcare Integration: Adapting Project Management to the Needs of Organizational Change. *Project Management Journal*, 49(5):5–21, October 2018. Publisher: SAGE Publications Inc.
- [25] Victor Verboeket, Siavash H. Khajavi, Harold Krikke, Mika Salmi, and Jan Holmstrom. Additive Manufacturing for Localized Medical

- Parts Production: A Case Study. *IEEE Access*, 9:25818–25834, 2021.
- [26] Bhuvnesh Chatwani, Deepanshu Nimesh, Kuldeep Chauhan, Mohd Shuaib, and Abid Haleem. Current Status, Applications, and Factors Affecting Implementation of Additive Manufacturing in Indian Healthcare Sector: A Literature-Based Review. In Ranganath M. Singari, Kaliyan Mathiyazhagan, and Harish Kumar, editors, *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, pages 1015–1030, Singapore, 2021. Springer Nature.
- [27] Federico Caviggioli and Elisa Ughetto. A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society. *International Journal of Production Economics*, 208(C):254–268, 2019. Publisher: Elsevier.
- [28] Mohd Javaid and Abid Haleem. Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review. *Alexandria Journal of Medicine*, 54, October 2017.
- [29] Dara G. Schniederjans. Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis. *International Journal of Production Economics*, 183:287–298, January 2017.
- [30] Federica Pascucci, Andrea Perna, Andrea Runfola, and Gian Luca Gregori. The Hidden Side of 3D Printing in Management. In *Symphonya. Emerging Issues in Management*, pages 91–107, December 2018. ISSN: 1593-0319, 1593-0300 Issue: 2.
- [31] Manish Shukla, Ivan Todorov, and Dharm Kapletia. Application of additive manufacturing for mass customisation: understanding the interaction of critical barriers. *Production Planning & Control*, 29(10):814–825, July 2018. Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1474395>.
- [32] Sam Tavassoli, Milan Brandt, Ma Qian, Pia Arenius, Babak Kianian, Olaf Diegel, Anne-Laure Mention, Ivan Cole, Aly Elghitany, and Leon Pope. Adoption and Diffusion of Disruptive Technologies: The Case of Additive Manufacturing in Medical Technology Industry in Australia. *Procedia Manufacturing*, 43:18–24, January 2020.
- [33] 3D Opportunity In Medical Technology: Additive Manufacturing

Comes To Life.

- [34] Flaviana Calignano and Vincenza Mercurio. An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 7:100103, June 2023.
- [35] Sebastian Mohr and Omera Khan. 3D Printing and Its Disruptive Impacts on Supply Chains of the Future. *Technology Innovation Management Review*, 5:20–25, November 2015.
- [36] Brogan Rylands, Tillman Bohme, Robert Gorkin III, Joshua Fan, and Thomas Birtchnell. 3D Printing - To print or not to print? Aspects to consider before adoption - A supply chain perspective. *Australian Institute for Innovative Materials - Papers*, January 2015.
- [37] Wego Wang. Reverse Engineering: Technology of Reinvention.
- [38] Abid Haleem, Mohd Javaid, Ravi Pratap Singh, Shanay Rab, Rajiv Suman, Lalit Kumar, and Ibrahim Haleem Khan. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 3:161–171, June 2022.
- [39] Robin H. Helle and Hirpa G. Lemu. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Materials Today: Proceedings*, 45:5255–5262, January 2021.
- [40] Zhaohui Geng and Bopaya Bidanda. Review of reverse engineering systems – current state of the art. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(2):161–172, April 2017. Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1302787>.
- [41] Abid Haleem and Mohd. Javaid. 3D scanning applications in medical field: A literature-based review. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7(2):199–210, June 2019.
- [42] Andrew Willis, Jasper Speicher, and David B. Cooper. Rapid prototyping 3D objects from scanned measurement data. *Image and Vision Computing*, 25(7):1174–1184, July 2007.
- [43] Hans K. Uthoff, Philippe Poitras, and David S. Backman. Internal plate fixation of fractures: short history and recent developments.

Journal of Orthopaedic Science, 11(2):118–126, March 2006.

- [44] Zhenyu Li, Daofu Gong, Lei Tan, Xiangyang Luo, Fenlin Liu, and Adrian Bors. Self-embedding watermarking method for G-code used in 3D printing. December 2021.
- [45] Anketa Jandyal, Ikshita Chaturvedi, Ishika Wazir, Ankush Raina, and Mir Irfan Ul Haq. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, 3:33–42, January 2022.

Α'

Ξενογλωσσικοί Όροι - Ακρώνυμα - Συντομεύσεις

Ορολογία	
Ξενογλωσσικός Όρος	Ελληνικός Όρος
Additive Manufacturing	Προσθετική κατασκευή
3D Printing	Τρισδιάστατη εκτύπωση
3D Model	Τρισδιάστατο μοντέλο
CAD (Computer Aided Design)	Σχεδιασμός με την βοήθεια υπολογιστή
Computerised Tomography <i>CT Scan</i>	Αξονική τομογραφία
Magnetic Resonance Imaging <i>MRI Scan</i>	Μαγνητική τομογραφία
3D Scanner	Τρισδιάστατος σαρωτής

Industry 4.0	4η Βιομηχανική επανάσταση
Digital twin	Ψηφιακό αντίγραφο
Cloud	Νέφος αποθήκευσης
Fused Deposition Modeling (FDM)	Μοντελοποίηση σύντηξης ενσπόθησης
Polylactic acid (PLA)	Πολυγαλακτικό οξύ

Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας
Κατεύθυνση Διοίκησης Έργων και Ανάπτυξης Προϊόντων
Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Αθήνα, Ελλάδα

