



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ»
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΔΙΟΙΚΗΣΗ LOGISTICS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ 3D
ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΜΥΝΤΙΚΗ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

ΚΑΡΑΜΟΥΖΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2021

(Υπογραφή)

.....
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΚΑΡΑΜΟΥΖΑΣ

Copyright Αναστάσιος Δ. Καραμούζας, 2021.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ιωάννη Γιαννατσή (Επίκουρο Καθηγητή Πανεπιστημίου Πειραιώς), που μου εμπιστεύτηκε το συγκεκριμένο θέμα και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό, σε μια περίοδο όπου η τριδιάστατη εκτύπωση έχει συνεισφέρει σε αξιοσημείωτο βαθμό στην αμυντική βιομηχανία.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και όλους τους φίλους μου, για τη στήριξή τους σε όλο αυτό το δύσκολο χρονικό διάστημα της συγγραφής της εν λόγω διπλωματικής, καθώς και σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

Αναστάσιος Καραμούζας

Περίληψη

Η τεχνολογία ψηφιακής κατασκευής, γνωστή επίσης ως προσθετική κατασκευή ή/και τριδιάστατη εκτύπωση, δημιουργεί φυσικά αντικείμενα από μια γεωμετρική αναπαράσταση με διαδοχική πρόσθεση υλικών. Αυτή η συνεχώς αναδυόμενη τεχνολογία, χρησιμοποιείται ευρέως στον κόσμο, με εφαρμογές σε ποικίλους τομείς, όλο και περισσότερο για μαζική προσαρμογή, παραγωγή οποιουδήποτε τύπου σχεδίων ανοιχτού κώδικα σε διάφορους τομείς, όπως στη βιοϊατρική μηχανική, την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, την αρχιτεκτονική και τη γενικότερη παραγωγή προϊόντων. Η καινοτομία αυτή μπορεί να εκτυπώσει ένα αντικείμενο, το ένα στρώμα μετά το άλλο, με εναπόθεση υλικού στρώσης απευθείας από ένα μοντέλο σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια επισκόπηση των τύπων τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής, των εφαρμογών της τεχνολογίας αυτής, καθώς και των υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτές. Ως βασικό και κύριο θέμα της είναι η χρήση της προσθετικής κατασκευής στην αμυντική και πολεμική βιομηχανία, και να αποτιμηθεί σε τι βαθμό δύναται να διευκολύνει, τόσο την επιχειρησιακή ετοιμότητα όσο και την αμυντική ικανότητα. Συγκεκριμένα, θα αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει σε ό,τι αφορά αντικείμενα και κατασκευές που συμμετέχουν στο πεδίο της μάχης, καθώς και η πιθανή συμβολή της στην εφοδιαστική αλυσίδα ενός στρατού στις διαδικασίες μεταφοράς μερών και εξαρτημάτων στην πρώτη γραμμή της μάχης. Η παρουσία και η αντικατάσταση αυτών των μερών είναι μια δουλειά που πρέπει να γίνει γρήγορα, άρτια και όπου απαιτείται. Στην επίτευξη αυτών των στόχων, θα μπορούσε να συντελέσει καταλυτικά η μέθοδος της προσθετικής κατασκευής.

Λέξεις κλειδιά: τριδιάστατη εκτύπωση, προσθετική κατασκευή, στρατιωτικές/αμυντικές εφαρμογές, εφοδιαστική αλυσίδα

Abstract

Digital construction technology, also known as 3D printing or additional manufacturing, creates natural objects from a geometric representation by successive addition of materials. This constantly evolving technology is widely used in the world, with applications in various fields, increasingly for mass adaptation and production of any type of open source designs in various fields, such as biomedical engineering, automotive, aeronautics, architecture and general production of products. This innovation can print an object, layers by layer, by depositing layer material directly from a computer-aided design (CAD) model. This paper presents an overview of the types of additive manufacturing technologies, the applications of 3D printing technology as well as the materials used for additive manufacturing technology in the manufacturing industry. Its main theme is the use of additive manufacturing in the defense and war industry, and to what extent it has achieved, both operational readiness and defense capability, its advantages in parts and products that participate in the battlefield, while remarkable is also its contribution, which will be commented on, in the supply chain of an army, and how much it has facilitated the presence of parts and accessories on the front line of the battle. The presence and replacement of these parts is a job that needs to be done quickly, perfectly and where needed, and that is a job of additive manufacturing.

Key words: 3D printing, additive manufacturing, military/defense applications, supply chain

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Πίνακας Εικόνων.....	9
Εισαγωγή.....	11
Κεφάλαιο 1: Ιστορική Αναδρομή της Τριδιάστατης Εκτύπωσης.....	13
1.1 Πρώτη Περίοδος Ανάπτυξης (1960-1970).....	13
1.2 Η Αρχή της Τριδιάστατης Εκτύπωσης (1980-1990).....	13
1.3 Στάδιο Ανάπτυξης (1990-2010).....	16
1.4 Η Τριδιάστατη Εκτύπωση Σήμερα.....	17
Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι και Υλικά της Τριδιάστατης Εκτύπωσης.....	19
2.1 Η Έννοια της τριδιάστατης εκτύπωσης.....	19
2.2 Τρόπος Λειτουργίας του 3D Εκτυπωτή.....	19
2.3 Τεχνικές Προσθετικής Κατασκευής & Τριδιάστατης Εκτύπωσης.....	22
2.3.1. Κατασκευή με Εναπόθεση Τηγμένου Υλικού.....	22
2.3.2. Στερεολιθογραφία.....	23
2.3.3 Στερεολιθογραφία Μάσκας.....	23
2.3.4 Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός.....	24
2.3.5 Επιλεκτική Σύσσωμάτωση με Λείζερ.....	24
2.3.6 Εναπόθεση Υλικού.....	25
2.3.7 Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων.....	26
2.4 Υλικά που Χρησιμοποιούνται στην Προσθετική Κατασκευή.....	27
2.4.1 Μέταλλα.....	27
2.4.2 Πολυμερή.....	28
2.4.3 Κεραμικά.....	29
2.4.4 Σύνθετα Υλικά.....	29
2.4.5 Έξυπνα υλικά.....	30
Κεφάλαιο 3: Η Συμβολή της Τριδιάστατης Εκτύπωσης σε Στρατιωτικές Εφαρμογές.....	31
3.1 Γενικά.....	31
3.2 Στρατιωτικές Εφαρμογές.....	32
3.2.1 Τοπογραφικοί Χάρτες.....	32
3.2.2 Εκτυπωμένες Εφαρμογές.....	33
3.2.3 Όπλα - Πυρομαχικά.....	39
3.2.4 Μη Επανδρωμένα Οχήματα - Ρομπότ.....	45
3.2.5 Δορυφόροι.....	47

3.2.6 Συντήρηση Εγκαταστάσεων	48
3.2.7 Τροχοφόρα και Άρματα	50
3.2.8 Ατομική Προστασία και Ένδυση	52
3.2.9 Ιατρική Περίθαλψη	54
3.2.10 Τριδιάστατη Εκτύπωση Τροφίμων	55
3.3 Χώρες που Εφαρμόζουν την Τριδιάστατη Εκτύπωση σε Στρατιωτικές Εφαρμογές	57
<i>ΗΠΑ</i>	58
<i>Γερμανία</i>	58
<i>Ηνωμένο Βασίλειο</i>	59
<i>Ιαπωνία</i>	59
<i>Κίνα</i>	59
<i>Νότια Κορέα</i>	60
<i>Γαλλία</i>	60
<i>Σουηδία</i>	62
Κεφάλαιο 4: Βασικά Οφέλη από τη Χρήση Τριδιάστατης Εκτύπωσης στην Αμυντική Βιομηχανία	64
Κεφάλαιο 5: Προσθετική Κατασκευή και Εφοδιαστική Αλυσίδα	66
5.1 Γενικά	66
5.2 Το Μέλλον της Προσθετικής Κατασκευής για τις Ένοπλες Δυνάμεις	67
5.3 Προκλήσεις	69
Κεφάλαιο 6: Προσθετική Κατασκευή και Ελληνική Πραγματικότητα	72
Συμπεράσματα	74
Βιβλιογραφία	75

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Απεικόνιση των στοιχείων ενός συστήματος Στερεολιθογραφίας (Πηγή: Su and Al’Aref, 2018)	14
Εικόνα 2: Χρονοδιάγραμμα με την ιστορία της τριδιάστατης εκτύπωσης (Πηγή: Gonzalez, 2020).....	18
Εικόνα 3: Διαδικασία εκτύπωσης ενός αντικειμένου τριδιάστατα (Πηγή: Induced, 2021)	20
Εικόνα 4: Το γενικό σύστημα της προσθετικής κατασκευής (Πηγή: Manoj Prabhakar et al., 2021)	22
Εικόνα 5: Κατασκευή με εναπόθεση τηγμένου υλικού (Πηγή: Reddy Bathula, 2017)	22
Εικόνα 6: Στερεολιθογραφία (Πηγή: Reddy Bathula, 2017).....	23
Εικόνα 7: Σύγκριση μεθόδων SLA (Πηγή: Diyode, 2019).....	24
Εικόνα 8: Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Πηγή: LiveScience, 2013).....	25
Εικόνα 9: Εναπόθεση Υλικού (Πηγή: Sireesha et al., 2018)	26
Εικόνα 10: Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Πηγή: Azam et al., 2018).....	27
Εικόνα 11: Μια τριδιάστατη απεικόνιση ενός 1:250.000 τοπογραφικού χάρτη (Πηγή: ArmyRecognition, 2014)	32
Εικόνα 12: Πάνω από 20 ετών, το B-2 Spirit, γνωστό και ως Stealth Bomber, διατηρείται σε λειτουργία με τριδιάστατα εκτυπωμένα μέρη (Πηγή: Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ).....	34
Εικόνα 13: Το νέο εξάρτημα τιτανίου τριδιάστατα εκτυπωμένο για το μαχητικό F22 Raptor Stealth (Πηγή: Πολεμική Αεροπορία ΗΠΑ, 2020).....	35
Εικόνα 14: Το πρώτο μεταλλικό εξάρτημα προσθετικής κατασκευής για κινητήρα αεροσκαφών (Πηγή: Oklahoma City Air Logistics Complex, 2020).....	35
Εικόνα 15: Υποβρύχια της κατηγορίας Collins της Αυστραλιανής Ναυτικής (Πηγή: Commonwealth of Australia, 2021)	36
Εικόνα 16: Το 3D τυπωμένο με μέταλλο Gunner’s Ratchet είναι ένα εργαλείο τόσο εξειδικευμένο που θα ήταν πολύ ακριβό να δημιουργηθεί χωρίς τριδιάστατη εκτύπωση (Πηγή: All3DP.Pro, 2021)	38
Εικόνα 17: Το τριδιάστατο εκτυπωμένο υποβρύχιο (Πηγή: Insider, 2017)	39
Εικόνα 18: Ο χειριστής εν ώρα λειτουργία του OMTD (Πηγή: Insider, 2017).....	39
Εικόνα 19: Τυφέκιο AR-15 με τριδιάστατο εκτυπωμένο κάτω δέκτη (Πηγή: Dezeen, 2013)	40
Εικόνα 20: Τυφέκιο AR-15 με τριδιάστατα τυπωμένα μέρη (Πηγή: 3D PrinterChat.com, 2020).....	40
Εικόνα 21: 3D εκτυπωμένο revolver M1911 από την εταιρία imlab (Πηγή: Pinshape, 2013)	41
Εικόνα 22: Ο εκτοξευτής χειροβομβίδων RAMBO (Πηγή: U.S. Army Acquisition Support Center, 2017).....	42
Εικόνα 23: Τα εκτυπωμένα μέρη του RAMBO, εκτός από την κάννη και το μηχανισμό όπλισης (Πηγή: U.S. Army Acquisition Support Center, 2017)	43
Εικόνα 24: Μια δέσμη τριδιάστατων εκτυπωμένων σφαιρών (Πηγή: 3D PrinterChat.com, 2020).....	43
Εικόνα 25: 3D εκτυπωμένες σφαίρες του ιδρύματος EPI (Πηγή: Young, 2016).....	44
Εικόνα 26: Το πρώτο τριδιάστατο εκτυπωμένο UAV στον κόσμο (Πηγή: Stratasy, 2015)	46

Εικόνα 27: Το πρώτο μη επανδρωμένο όχημα, τριδιάστατο εκτυπωμένο από τη Ρωσία (Πηγή: 3DprinterChat.com, 2020).....	46
Εικόνα 28: Η κατασκευαστική δομή των ποδιών που εκτυπώνονται τριδιάστατα για το ρομπότ Atlas (Πηγή: Boston Dynamics, 2016).....	47
Εικόνα 29: 3D εκτυπωμένα μέρη ενός δορυφόρου (Πηγή: Softpedia News, 2014) ..	48
Εικόνα 30: Τριδιάστατη εκτύπωση δομών σκυροδέματος από Αμερικανούς Πεζοναύτες με τον εκτυπωτή Icon Vulcan (Πηγή: Icon, 2021)	48
Εικόνα 31: Η τσιμεντένια κατασκευή για την προστασία του συστήματος πολλαπλής εκτόξευσης πυραύλων (Πηγή: USMC, 2020).....	49
Εικόνα 32: Εκτέλεση της φορητής μονάδας παραγωγής πρόσθετων από την ExOne για το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ (Πηγή: ExOne, 2021).....	50
Εικόνα 33: Το νέο ελαφρύ όχημα τακτικής σημασίας του Αμερικανικού Στρατού (Πηγή: US Army, 2021)	51
Εικόνα 34: Το όχημα επόμενης γενιάς (NGCV) (Πηγή: Owen, 2021).....	52
Εικόνα 35: Απόδοση των οχημάτων μάχης επόμενης γενιάς του αμερικανικού στρατού που βρίσκονται σε εξέλιξη και θα κατασκευαστούν με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (Πηγή: gao.gov).....	52
Εικόνα 36: Annette LaFleur, επικεφαλής ομάδας για την ομάδα σχεδίου, σχεδίου και πρωτοτύπου της NSRDEC (Πηγή: 3Dprint.com, 2014).....	53
Εικόνα 37: Τριδιάστατος εκτυπωμένος επίδεσμος (Πηγή: 3DPrint.com, 2019).....	55
Εικόνα 38: Τρέχουσα τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων (Πηγή: 3Dprint.com, 2016).....	56
Εικόνα 39: Η τριδιάστατη πίτσα είναι δυνατή με τη σημερινή τεχνολογία (Πηγή: 3Dprint.com, 2016).....	57
Εικόνα 40: Τριδιάστατη εκτύπωση σε εργαστήριο του στρατού της Γαλλίας (Πηγή: 3Dprint.com ,2020).....	61
Εικόνα 41: Ο χώρος δοκιμών εκτύπωσης για το τυφέκιο της Σουηδίας AK5C (Πηγή: 3DPrint.com, 2019)	63

Εισαγωγή

Μεταξύ των διαφορετικών διαδικασιών κατασκευής που υιοθετούνται επί του παρόντος από τη βιομηχανία, η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) ή Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing) είναι μια πρόσθετη τεχνική. Είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας δημιουργείται ένα τριδιάστατο στερεό αντικείμενο, σχεδόν οποιουδήποτε σχήματος, ξεκινώντας από ένα ψηφιακό μοντέλο. Η προσθετική κατασκευή σε στρατιωτικές εφαρμογές αποτελούσε κάποτε ένα φιλόδοξο όνειρο. Ωστόσο, ο χρόνος και οι επενδύσεις το έκαναν πραγματικό. Σήμερα, η τεχνολογία της τριδιάστατης εκτύπωσης αντιπροσωπεύει μια μεγάλη ευκαιρία για την αμυντική βιομηχανία, καθώς και για την εφοδιαστική αλυσίδα που σχετίζεται με αυτή. Αυτή η τεχνολογία έχει πολλαπλές εφαρμογές και η ταχεία αναπτυσσόμενη καινοτομία στον τομέα της άμυνας έχει παρουσιαστεί με την έλευση της ίδιας της εκτύπωσης 3D.

Απαιτούνται πέντε τεχνικά βήματα για την αναπαραγωγή ενός εξαρτήματος με τη μέθοδο της 3D εκτύπωσης. Αυτά περιλαμβάνουν την επιλογή της ανατομικής περιοχής που στοχεύουμε να αναπαράγουμε, την ανάπτυξη της τριδιάστατης γεωμετρίας μέσω της επεξεργασίας των εικόνων που προέρχονται από σάρωση CT/MRI, τη βελτιστοποίηση του αρχείου για τη φυσική εκτύπωση και την κατάλληλη επιλογή του 3D εκτυπωτή και υλικών. Αυτό το αρχείο αντιπροσωπεύει την καθοδήγηση για την επόμενη εκτύπωση, «τεμαχίζοντας» αυτό το ψηφιακά σχεδιασμένο μοντέλο σε διατομές. Αυτό το «τεμαχισμένο» σχέδιο αποστέλλεται έπειτα σε έναν τριδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος κατασκευάζει το αντικείμενο ξεκινώντας από το βασικό στρώμα και χτίζοντας μια σειρά στρωμάτων στην κορυφή έως ότου το αντικείμενο κατασκευαστεί, χρησιμοποιώντας τις πρώτες ύλες που απαιτούνται για τη σύνθεσή του. Επιτυγχάνεται επιτέλους ένα συγκεκριμένο μοντέλο για τον ασθενή, με ανατομική πιστότητα, το οποίο δημιουργήθηκε από σύνολο δεδομένων απεικονίσεων.

Οι 3D εκτυπωτές έχουν την ικανότητα να κατασκευάσουν εξαιρετικά πολύπλοκα εξαρτήματα και κομμάτια, και αυτή είναι μια δυνατότητα και ευκαιρία που προσφέρεται, την οποία ο Στρατός μπορεί να αξιοποιήσει για τη δημιουργία νέων όπλων, εργαλείων και μηχανημάτων. Ανάλογα με τις ανάγκες σχεδιάζονται νέα

αντικείμενα για να καλύψουν αποτελεσματικά και επαρκώς τις απαιτήσεις του τομέα αυτού, ενώ δίνεται και η δυνατότητα για επανασχεδιασμό και επερχόμενη βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχόντων, με χρήση ποικίλων υλικών και διαδικασιών, καταφέροντας έτσι να πετύχουμε μείωση κόστους και εξάλειψη περιορισμών που ίσως συνδέονται με μια συμβατική διαδικασία παραγωγής.

Με αυτόν τον τρόπο, η τριδιάστατη εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά τις ανάγκες ενός στρατεύματος σε υψίστης σημασίας κρίσιμα υλικά, προσφέροντας πλήρη έλεγχο και ανεξαρτησία στην παραγωγή και διανομή ανταλλακτικών, εξαρτημάτων, οπλικών συστημάτων, και κάθε είδους αντικειμένων που κρίνονται απαραίτητα στο πεδίο της μάχης, ένα χώρο όπου οι απαιτήσεις και οι ανάγκες αποτελούν έναν δύσκολο διαχειρίσιμο παράγοντα, κυρίως σε βλάβες, καταστροφές και κάθε είδους ανεπάρκεια προμήθειας. Η διαθεσιμότητα των 3D εκτυπωτών στο πεδίο της μάχης διασφαλίζει ότι ο Στρατός είναι πλέον σε θέση να τυπώνει τις δικές του ανάγκες. Στην εργασία αυτή θα αναλυθούν τόσο οι μέθοδοι ΠΚ και 3D εκτύπωσης όσο και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές, ενώ θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη συμμετοχή της τεχνολογίας αυτής σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπως σε εφαρμογές προτυποποίησης, τοπογραφικούς χάρτες, κρίσιμα ανταλλακτικά, οπλικά συστήματα και πυρομαχικά, μη επανδρωμένα οχήματα, δορυφόρους και ρομπότ, εξατομικευμένες συσκευές καθώς και συντηρήσεις στρατιωτικών εγκαταστάσεων και πεδίου, ενώ σίγουρα θα αναφερθεί και η συμμετοχή της στην εκπαίδευση του προσωπικού.

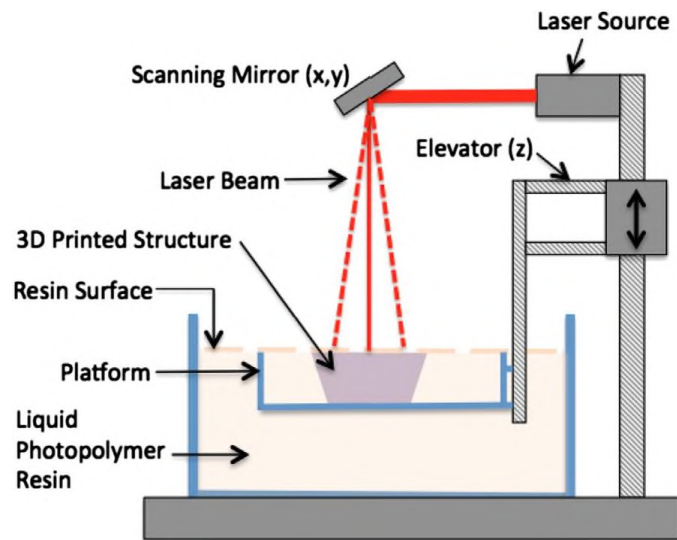
Κεφάλαιο 1: Ιστορική Αναδρομή της Τριδιάστατης Εκτύπωσης

1.1 Πρώτη Περίοδος Ανάπτυξης (1960 - 1970)

Η πρώτη έρευνα σχετικά με τη χρήση φωτοπολυμερών για τη δημιουργία τριδιάστατων αντικειμένων πραγματοποιήθηκε στη δεκαετία του 1960 στο Battelle Memorial Institute στο Οχάιο. Ο στόχος του πειράματος ήταν να πολυμερίσουν τη ρητίνη, διασταυρώνοντας δύο δέσμες λέιζερ διαφορετικών μηκών κύματος. Ο Wyn Swainson έκανε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1971, για μια παρόμοια προσέγγιση διπλής δέσμης λέιζερ που ονομάζεται φωτοχημική κατεργασία (Swainson and Box, 1977). Στη συνέχεια ίδρυσε την Εταιρία Μορφογραφικής Μηχανής στην Καλιφόρνια, αλλά αυτή η τεχνολογία δεν προχώρησε ποτέ σε ένα εμπορικά διαθέσιμο σύστημα (Su and Al'Aref, 2018). Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, η εταιρία Dynell Electronics εφηύρε τη συμπαγή φωτογραφία (solid photography). Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιούσε λέιζερ ή φρέζα για να κόψει διατομές που βασίζονται σε ένα μοντέλο στον υπολογιστή και, στη συνέχεια, στοιβάζονται μαζί για να σχηματίσουν ένα αντικείμενο (Wohlers and Gornet, 2014).

1.2 Η αρχή της Τριδιάστατης Εκτύπωσης (1980 - 1990)

Ο Hideo Kodama, στο Δημοτικό Ινστιτούτο Βιομηχανικής Έρευνας της Ναγκόγια στην Ιαπωνία, ήταν ένας από τους πρώτους που ανέπτυξε μια τεχνική ταχείων πρωτοτύπων χρησιμοποιώντας μία μόνο δέσμη λέιζερ (Beaman *et al.*, 1997). Αν και υπέβαλε αίτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας για αυτήν την εφεύρεση το 1980, έληξε χωρίς να προχωρήσει στα μεταγενέστερα στάδια της διαδικασίας της ιαπωνικής ευρεσιτεχνίας. Το 1980 και το 1981, δημοσίευσε μελέτες σχετικά με τα πειράματά του για την ανάπτυξη μεθόδων για αυτόματη κατασκευή τριδιάστατων μοντέλων με χρήση ακτίνων UV και φωτοευαίσθητης ρητίνης, χρησιμοποιώντας μάσκα για τον έλεγχο της έκθεσης στην πηγή UV. Περιέγραψε τεχνικές στερεοποίησης λεπτών διαδοχικών στρωμάτων φωτοπολυμερούς (Kodama, 1981), βασικές πτυχές του τι θα μετατρεπόταν αργότερα στη λεγόμενη Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA).



Εικόνα 1: Απεικόνιση των στοιχείων ενός συστήματος Στερεολιθογραφίας (Πηγή: (Su and Al'Aref, 2018))

Το 1984, ο Charles Hull εφηύρε τη Στερεολιθογραφία. Του εκδόθηκε το σχετικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1986, στο οποίο περιγραφόταν μια διαδικασία στην οποία τα υγρά πολυμερή στερεοποιούνται υπό το υπεριώδες φως για να σχηματίσουν τις διατομές ενός τριδιάστατου μοντέλου (Hull and Gabriel, 1986). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποίησε ψηφιακά δεδομένα και μια δέσμη φωτός ελεγχόμενη από υπολογιστή για να δημιουργήσει κάθε στρώμα, το ένα πάνω στο άλλο. Στη συνέχεια ο Hull ίδρυσε την 3D Systems, η οποία παράγει και διαθέτει μηχανήματα Στερεολιθογραφίας. Το πρώτο διαφημιστικό για εκτυπωτή SLA στον κόσμο δημοσιεύθηκε από την 3D Systems το 1988.

Περίπου την ίδια εποχή με το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας SLA του Hull, ο Carl Deckard, που εκείνη την εποχή ήταν ακόμα προπτυχιακός φοιτητής στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, ανέπτυξε την έννοια της επιλεκτικής συσσωμάτωσης με λέιζερ (Selective Laser Sintering - SLS). Η μέθοδος SLS βασίζεται στην επιλεκτική στερεοποίηση σκόνης χρησιμοποιώντας δέσμη λέιζερ (Mori, 1997). Έπειτα, ο Deckard ίδρυσε την Desktop Manufacturing Corporation (DTM Corp), με την οποία παράγαγε τους πρώτους εκτυπωτές SLS το 1992. Η DTM τελικά εξαγοράστηκε από την 3D Systems. Το 1993, ο Deckard ανέπτυξε το Sinterstation 2000, που εισήγαγε την τεχνολογία SLS στη βιομηχανία ¹.

Οι S. Scott και Lisa Crump ίδρυσαν την εταιρεία Stratasys και το 1989 κατέθεσαν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια μορφή ταχείας πρωτοτυποποίησης που

¹ <https://additivemanufacturing.com/2016/11/03/carl-deckard-selected-for-amug-innovators-award/>

ονομάζεται Κατασκευή με εναπόθεση τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling-FDM), στην οποία ένα πλαστικό νήμα θερμαίνεται και εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου. Η εναπόθεση του υλικού καθοδηγείται από έναν υπολογιστή, με βάση ένα προκαθορισμένο ψηφιακό μοντέλο. Κάθε στρώση διατηρείται σε θερμοκρασία ακριβώς κάτω από το σημείο στερεοποίησης, για καλύτερη πρόσφυση στο ενδιάμεσο στρώμα (Matias and Rao, 2015). Η Stratasys ανέπτυξε στο τέλος θερμοπλαστικά και εκτυπωτικά συστήματα για τριδιάστατη εκτύπωση.

Αργότερα το 1989, ο Hans Langer στη Γερμανία δημιούργησε την Electro Optical Systems (EOS), με έμφαση στη συσσωμάτωση και στην άμεση τήξη μετάλλου με λέιζερ. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στην επιλεκτική έκθεση πούδρας μετάλλου σε ακτινοβολία λέιζερ προκειμένου να επιτευχθεί τήξη (Bineli *et al.*, 2001). Η EOS διέθεσε το πρώτο της εμπορικό σύστημα το 1994, και αναγνωρίζεται σήμερα για βιομηχανικά πρωτότυπα. Η EOS απέκτησε το δικαίωμα σε όλες τις πατέντες της DTM σχετικά με τη συσσωμάτωση με λέιζερ το 2004 (Santos *et al.*, 2006).

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, αρκετές άλλες τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης διερευνούνταν. Η Βαλλιστική Κατασκευή Σωματιδίων, κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον William Masters, αφορούσε στην εναπόθεση μικροσταγονιδίων τηγμένου συνθετικού κεριού μέσω μιας κεφαλής που κινείται στο επίπεδο X-Y για να σχηματιστούν λεπτές στρώσεις. Η σταθερή πλατφόρμα κινείται στον άξονα Z για να επιτρέψει κάθε στρώμα του 3D αντικειμένου να προστεθεί στην κατασκευή (Cooper, 2001). Ο Michael Feygin κατέθεσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην τεχνολογία συγκόλλησης επάλληλων φύλλων το 1995, η οποία βασίζεται στον αυτοματοποιημένο σχηματισμό στρωμάτων από φύλλα, τα οποία στη συνέχεια συγκολλούνται διαδοχικά προκειμένου να σχηματίσουν ένα στερεό αντικείμενο. Ωστόσο, η εταιρεία του Feygin, η Helisys Inc., σύντομα έφυγε από την αγορά λόγω οικονομικών δυσκολιών (Chua, Leong and Lim, 2003). Η στερεοποίηση συμπαγούς υλικού εφευρέθηκε από τον Itzhak Pomerantz, ο οποίος σχεδίασε ένα οπτικό σύστημα μάσκας για να εκθέσει επιλεκτικά τα στρώματα φωτοευαίσθητης ρητίνης. Το εναπομείναν υγρό στη συνέχεια αφαιρείται και αντικαθίσταται από κερί, το οποίο κατεργάζεται στη συνέχεια για να σχηματιστεί ένα επίπεδο υπόστρωμα για το επόμενο στρώμα του αντικειμένου.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, η βιομηχανία παραγωγής εξοπλισμού ΠΚ χωρίστηκε σε 2 τομείς εστίασης: στα συστήματα υψηλών επιδόσεων για πολύπλοκα εξαρτήματα και ειδικές εφαρμογές (π.χ. ιατρικά εμφυτεύματα, εξαρτήματα

αεροναυπηγικής) και στους πιο φιλικούς προς το χρήστη και οικονομικού 3D εκτυπωτές που χρησιμοποιούνται κυρίως στη διαδικασία ανάπτυξης ιδεών και προϊόντων για λειτουργικά πρωτότυπα.. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1990, παρέμειναν μόνο τρεις από τις πρωτοπόρες εταιρείες: η 3D Systems, η Statasys και η EOS (Wohlers and Gornet, 2014).

1.3 Στάδιο Ανάπτυξης (1990 - 2010)

Στη δεκαετία του '90, πολλές και νεοσύστατες εταιρείες άρχισαν να εμφανίζονται και να πειραματίζονται με τις διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής πρόσθετων κατασκευών. Το 2006, κυκλοφόρησε ο πρώτος εμπορικά διαθέσιμος εκτυπωτής SLS , αλλάζοντας το παιχνίδι όσον αφορά τη δημιουργία βιομηχανικών εξαρτημάτων κατά παραγγελία.²

Τα εργαλεία CAD (Computer Aided Design) έγιναν επίσης πιο ευρέως διαθέσιμα εκείνη την εποχή, επιτρέποντας στους χρήστες να αναπτύξουν τριδιάστατα μοντέλα στους υπολογιστές τους. Αυτό είναι ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία στα πρώτα στάδια της δημιουργίας της τριδιάστατης εκτύπωσης.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, τα μηχανήματα ήταν πολύ διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούμε τώρα. Ήταν δύσκολα στη χρήση, ακριβά και πολλές από τις τελικές εκτυπώσεις απαιτούσαν πολλή μετεπεξεργασία. Αλλά, καινοτομίες εισάγονταν καθημερινά και ανακαλύψεις, μέθοδοι και πρακτικές ωρίμαζαν και αναπτύσσονταν. Η ανάπτυξη συστημάτων ανοικτού κώδικα (Open Source) το 2005, άλλαξε το πλαίσιο για την τριδιάστατη εκτύπωση, δίνοντας στους χρήστες μεγαλύτερη πρόσβαση σε αυτήν την τεχνολογία. Ο Δρ Adrian Bowyer δημιούργησε το RepRap Project, το οποίο ήταν μια πρωτοβουλία ανοικτού κώδικα για τη δημιουργία ενός τριδιάστατου εκτυπωτή που θα μπορούσε να κατασκευάσει έναν άλλο 3D εκτυπωτή, μαζί με άλλα 3D εκτυπωμένα αντικείμενα (Matias and Rao, 2015).

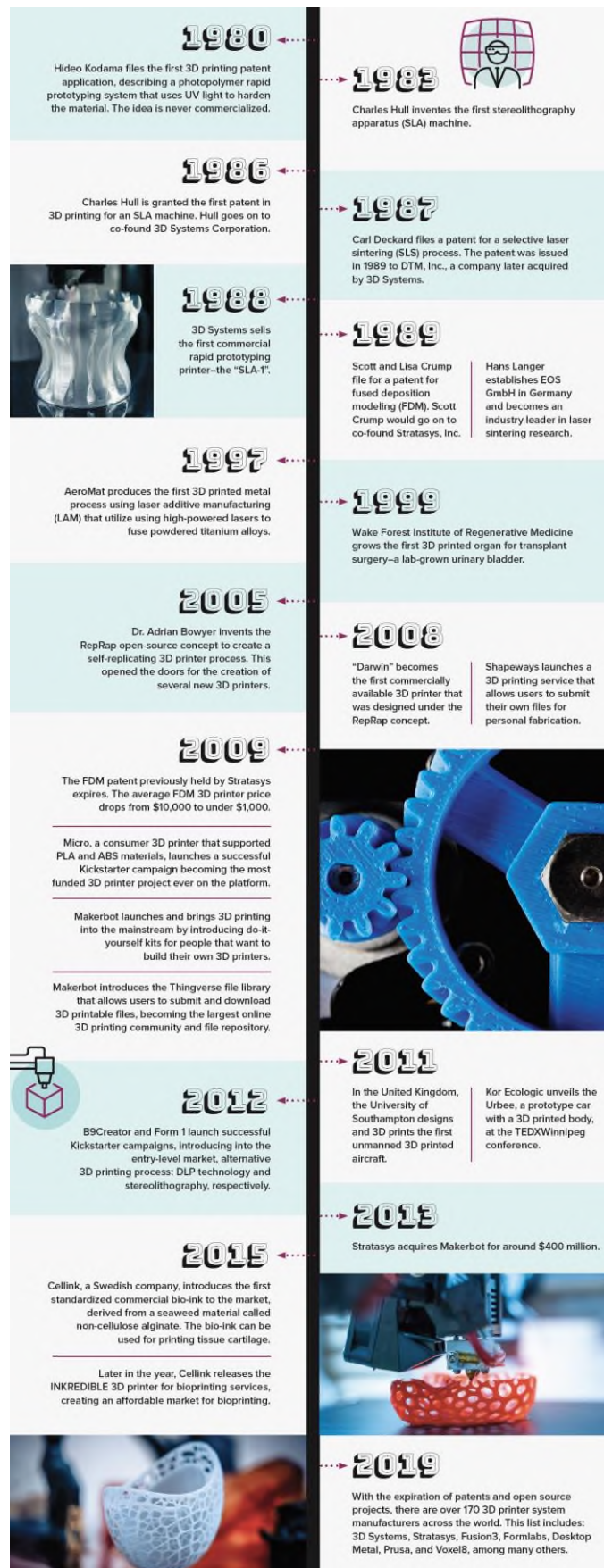
Το 2008, εκτυπώθηκε το πρώτο προσθετικό πόδι φέρνοντας την τριδιάστατη εκτύπωση στο προσκήνιο και γνωρίζοντας τον όρο σε εκατομμύρια σε όλο τον κόσμο. Στη συνέχεια, το 2009, τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, που αφορούσαν στην τεχνολογία FDM και κατατέθηκαν στη δεκαετία του '80, έληξαν, αλλάζοντας την

² <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented>

ιστορία της τριδιάστατης εκτύπωσης και ανοίγοντας την πόρτα για περαιτέρω καινοτομίες (Hoskins and Palsenbarg, 2013). Επειδή, η τεχνολογία ήταν πλέον πιο διαθέσιμη σε νέες εταιρείες και ανταγωνισμό, οι τιμές των τριδιάστατων εκτυπωτών άρχισαν να μειώνονται και η τριδιάστατη εκτύπωση έγινε όλο και πιο προσιτή.

1.4 Η τριδιάστατη Εκτύπωση Σήμερα

Στη δεκαετία του 2010, οι τιμές των τριδιάστατων εκτυπωτών άρχισαν να μειώνονται, καθιστώντας τους διαθέσιμους στο ευρύ κοινό. Ταυτόχρονα με τη μείωση των τιμών, αυξήθηκαν αντίστοιχα η ποιότητα και η ευκολία εκτύπωσης. Τα υλικά που χρησιμοποιούν οι εκτυπωτές έχουν επίσης εξελιχθεί και πλέον υπάρχει μια ποικιλία πλαστικών και νημάτων που είναι ευρέως διαθέσιμα. Υλικά, όπως ίνες άνθρακα και γυαλιού, μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε σύνθετα υλικά 3D εκτύπωσης. Ορισμένοι πειραματίζονται ακόμη και με μη συμβατικά υλικά εκτύπωσης όπως η σοκολάτα ή τα ζυμαρικά! Το 2019, ολοκληρώθηκε το μεγαλύτερο στον κόσμο λειτουργικό κτίριο το οποίο κατασκευάστηκε με τριδιάστατη εκτύπωση (Hossain *et al.*, 2020). Η τριδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται πλέον σταθερά στην ανάπτυξη διαφόρων εφαρμογών στον τομέα της ιατρικής και των υπηρεσιών υγείας περίθαλψης, ενώ πολλές βιομηχανίες και τομείς έχουν υιοθετήσει την τεχνολογία στην καθημερινή ροή εργασίας τους. Η τεχνολογία των 3D εκτυπωτών βρίσκει επίσης εφαρμογή στους τομείς του κοσμήματος, των υποδημάτων, του βιομηχανικού σχεδιασμού, της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και των κατασκευών, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, στην εκπαίδευση, στη χαρτογράφηση πληροφοριακών συστημάτων, σε έργα πολιτικών μηχανικών, καθώς και στον τομέα της Άμυνας (Gebhardt, 2013; Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019a).



Εικόνα 2: Χρονοδιάγραμμα με την ιστορία της τριδιάστατης εκτύπωσης (Πηγή: Gonzalez, 2020)

Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι και Υλικά της Τριδιάστατης Εκτύπωσης

2.1 Η Έννοια της Τριδιάστατης Εκτύπωσης

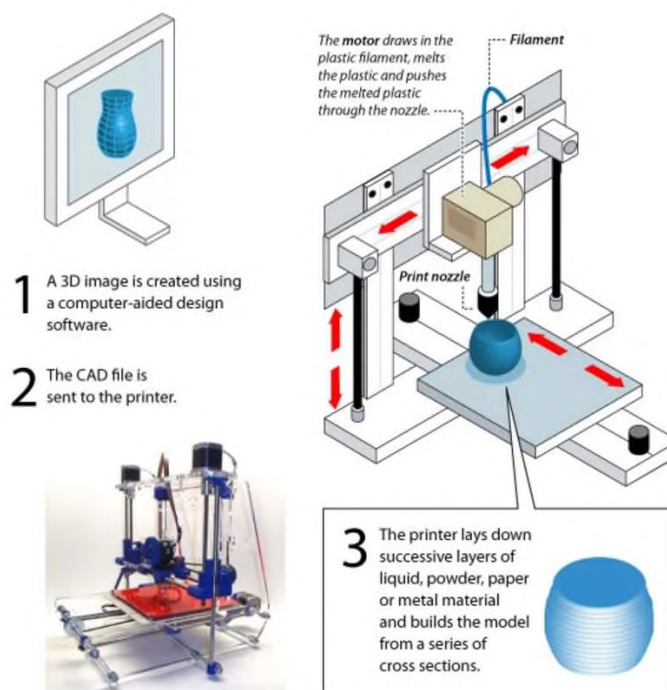
Η τριδιάστατη εκτύπωση (3D printing) αφορά συνήθως μεθόδους προσθετικής κατασκευής, στις οποίες κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στην τριδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, κυρίως κεραμικά και πολυμερή. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμό προσθετικής κατασκευής, οι τριδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Για τον λόγο αυτό πολλοί πιστεύουν ότι στα επόμενα χρόνια η παγκόσμια παραγωγή αγαθών θα στραφεί προς αυτή την κατεύθυνση, αντικαθιστώντας σταδιακά τις παραδοσιακές τεχνικές (Monahan, 2016). Δεν είναι λίγοι αυτοί που πιστεύουν ότι η τριδιάστατη εκτύπωση θα αποτελέσει μία «νέα βιομηχανική επανάσταση», καθώς θα φέρει αποκέντρωση των παραγωγικών διαδικασιών, ανοίγοντας τον δρόμο για παραγωγή τοπική και μικρής κλίμακας, προσαρμοσμένη στις τρέχουσες ανάγκες.

Οι τριδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων από σχεδιαστές, μηχανικούς και ομάδες ανάπτυξης νέων προϊόντων, έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής (Kumar, Pandey and Wimpenny, 2019). Η νέα τεχνολογία διαχείρισης και διακίνησης υλικών (ως έχουν ή με αναπαραγωγή τους), ονομάζεται (ψηφιακό) MatterNet, κατά αναλογία της τεχνολογίας του διαδικτύου (internet), που επιτρέπει την διαχείριση και μεταφορά των πληροφοριών (κειμένων, σταθερών ή κινούμενων εικόνων και ήχου) (Jordan, 2018).

2.2 Τρόπος Λειτουργίας του 3D Εκτυπωτή

Η βασική ιδέα πίσω από την τριδιάστατη εκτύπωση/προσθετική κατασκευή προσομοιάζει τις μεθόδους σχηματισμού πετρωμάτων σε μεγάλα βάθη, όπου σταγόνες του νερού εναποθέτουν λεπτές στρώσεις μετάλλων σχηματίζοντας σταλακτίτες και σταλαγμίτες. Ένα σύγχρονο αντίστοιχο παράδειγμα είναι ο κοινός

επιτραπέζιος εκτυπωτής. Όπως ακριβώς ένας εκτυπωτής ψεκασμού μελάνης εναποθέτει μεμονωμένες σταγόνες του μελανιού για να σχηματίσουν μια εικόνα, ένας 3D εκτυπωτής προσθέτει υλικό μόνο όπου χρειάζεται, ακολουθώντας εντολές από ένα ψηφιακό αρχείο.



Εικόνα 3: Διαδικασία εκτύπωσης ενός αντικείμενου τριδιάστατα (Πηγή: Induced, 2021)

Η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης εφαρμόζεται σε συστήματα με διάφορα μεγέθη και σχέδια· ανεξάρτητα όμως από το είδος του 3D εκτυπωτή ή από το υλικό που χρησιμοποιείται, η διαδικασία της 3D εκτύπωσης ακολουθεί τα ίδια βασικά βήματα. Ξεκινά με τη δημιουργία ενός 3D σχεδίου από το αντικείμενο που θέλει κανείς να εκτυπώσει, χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD (Oropallo and Pieg1, 2016). Το ψηφιακό μοντέλο μπορεί επίσης να προκύψει μέσω της χρήσης κάποιου τριδιάστατου σαρωτή, είτε κατεβάζοντας απλώς κάποιο αρχείο από τη διαδικτυακή αγορά.

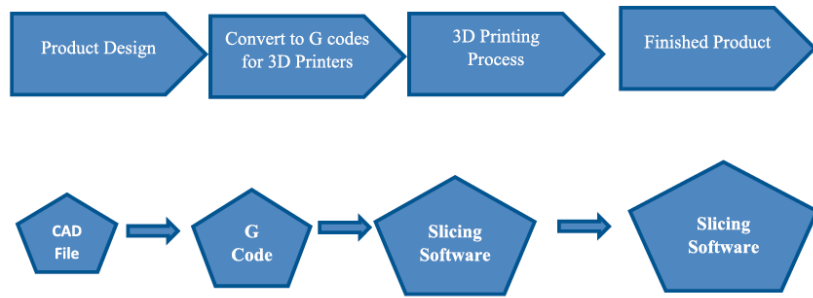
Η προετοιμασία του εκτυπωτή περιλαμβάνει καταρχάς το γέμισμά του με τις πρώτες ύλες (όπως πλαστικά, πούδρες μετάλλων). Πρέπει μάλιστα να διαλέξει κανείς το υλικό με το οποίο θα επιτύχει καλύτερα τις συγκεκριμένες ιδιότητες που απαιτούνται για το αντικείμενο που θέλει να παραγάγει. Η ποικιλία των υλικών που χρησιμοποιούνται στους 3D εκτυπωτές είναι πολύ μεγάλη, περιλαμβάνει πλαστικά, κεραμικά, ρητίνη, μέταλλα, άμμο, υφάσματα, βιοϋλικά, γυαλί (Bell, 2019) ακόμα και

τρόφιμα. Επιπλέον, απαιτείται προετοιμασία της πλατφόρμας κατασκευής, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις, ίσως χρειαστεί να καθαριστεί ή να εφαρμόσει μια κόλλα για να αποτραπεί η μετακίνηση και στρέβλωση του αντικειμένου από τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης.

Μόλις φορτωθεί το ψηφιακό μοντέλο στον εκτυπωτή, το μηχάνημα αναλαμβάνει αυτόματα τη δημιουργία του επιθυμητού αντικειμένου. Ενώ οι διεργασίες εκτύπωσης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας του 3D εκτυπωτή, η εξώθηση υλικού (η οποία περιλαμβάνει έναν αριθμό διαφορετικών τύπων διεργασιών) είναι η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται στους επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές.

Η εξώθηση υλικού λειτουργεί σαν ένα πυροβόλο όπλο κόλλας. Το υλικό εκτύπωσης, κατά κανόνα ένα πλαστικό νήμα, θερμαίνεται μέχρις ότου υγροποιηθεί και εξωθείται μέσω του ακροφυσίου εκτύπωσης (η άκρη από την οποία εκτινάσσεται το νήμα) εκτύπωσης (Al-Maliki and Al-Maliki, 2015). Χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το ψηφιακό αρχείο, η γεωμετρική δομή αναλύεται σε λεπτές διδιάστατες διατομές, ώστε ο εκτυπωτής να ξέρει ακριβώς πού να τοποθετήσει το πλαστικό υλικό (πολυμερές) μέσω του ακροφυσίου, σχηματίζοντας λεπτές στρώσεις, συχνά 0,1 χιλιοστά πάχους. Το πολυμερές στερεοποιείται γρήγορα και συνδέεται με το κάτω στρώμα του υλικού, πριν χαμηλώσει η πλατφόρμα και η κεφαλή εκτύπωσης προσθέσει άλλο στρώμα. Ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, η όλη διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά έως λίγες ημέρες.

Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση, κάθε αντικείμενο απαιτεί μία ελάχιστη μετεπεξεργασία η οποία περιλαμβάνει ποικιλία πρακτικών (απλών ή περισσότερο σύνθετων), από την απλή αποκόλληση του αντικειμένου από την πλατφόρμα εκτύπωσης, έως την αφαίρεση δομών στήριξης από το αντικείμενο (προσωρινό υλικό που τυπώνεται για τη στήριξη προεξοχών επί του αντικειμένου), το βούρτσισμα, το φινίρισμα κτλ. Αυτό το βήμα απαιτεί συχνά εξειδικευμένες δεξιότητες και υλικά. Το παραχθέν αντικείμενο, συχνά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ή να ολοκληρωθεί μέχρις ότου λειανθεί, βερνικωθεί ή βαφτεί ώστε να ολοκληρωθεί ο αρχικός σχεδιασμός του. Το υλικό το οποίο έχει επιλεγεί είναι αυτό το οποίο θα καθορίσει ποια μέθοδος μετεπεξεργασίας είναι η πιο κατάλληλη (Ngo *et al.*, 2018).

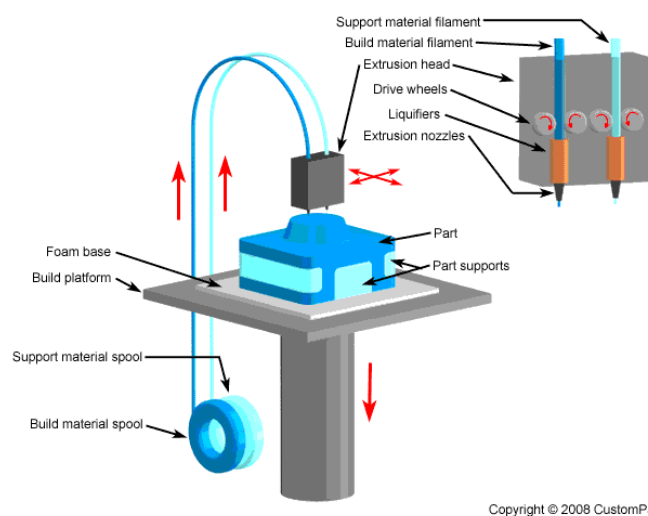


Εικόνα 4: Το γενικό σύστημα της προσθετικής κατασκευής (Πηγή: Manoj Prabhakar et al., 2021)

2.3 Τεχνικές Προσθετικής Κατασκευής & Τριδιάστατης Εκτύπωσης

2.3.1. Κατασκευή με Εναπόθεση Τηγμένου Υλικού

Η κατασκευή με εναπόθεση τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM) βασίζεται στην εξώθηση θερμοπλαστικού νήματος και είναι μια εξαιρετικά δημοφιλής και φθηνή μέθοδος τριδιάστατης παραγωγής στον κόσμο. Περιλαμβάνει ένα καρούλι νήματος το οποίο τροφοδοτείται απευθείας στο ακροφύσιο κάποιου εκτυπωτή. Το ακροφύσιο του εκτυπωτή θερμαίνεται στην απαραίτητη θερμοκρασία ενώ ένας κινητήρας εξωθεί το νήμα στο ακροφύσιο. Το ακροφύσιο κινείται βάσει των συντεταγμένων που αναφέρονται, εναποθέτοντας το υλικό στην πλάκα ώστε να στερεοποιηθεί και να ανανεωθεί. Αυτός ο κύκλος εκτύπωσης επαναλαμβάνεται, δημιουργώντας το ένα στρώμα μετά το άλλο, έως ότου αναπτυχθεί πλήρως το αντικείμενο (Baich, Manogharan and Marie, 2015; Ferreira *et al.*, 2017; Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019a).

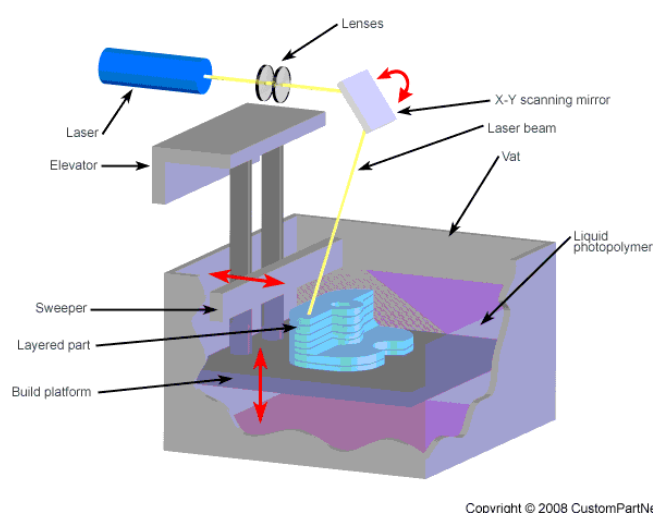


Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 5: Κατασκευή με εναπόθεση τηγμένου υλικού (Πηγή: Reddy Bathula, 2017)

2.3.2. Στερεολιθογραφία

Η Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA), αποτέλεσε τη βάση για το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα τριδιάστατης εκτύπωσης στον κόσμο. Ο Chuck Hull επινόησε τη στερεολιθογραφία το 1986, την οποία κατέγραψε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και εφήυρε τους τριδιάστατους εκτυπωτές για να εμπορευματοποιήσει την τεχνολογία αυτή. Ένα σύστημα SLA χρησιμοποιεί γαλβανόμετρα που κατευθύνουν μια εστιασμένη ακτίνα λέιζερ κατά τους άξονες X και Y. Με τον τρόπο αυτό, φωτοευαίσθητη ρητίνη εκτίθεται επιλεκτικά σε ακτινοβολία και στερεοποιείται η απαιτούμενη διατομή/στρώση. Οι περισσότερες μέθοδοι SLA κατασκευάζουν τμήματα χρησιμοποιώντας λέιζερ στερεάς κατάστασης (Li *et al.*, 2019; Manoj Prabhakar *et al.*, 2021; Thavornnyutikarn *et al.*, 2017).

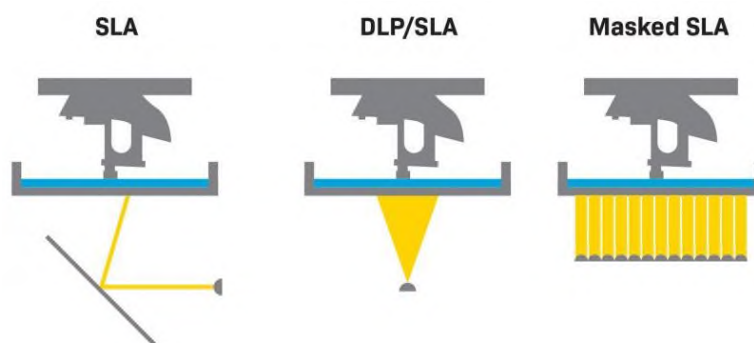


Εικόνα 6: Στερεολιθογραφία (Πηγή: Reddy Bathula, 2017)

2.3.3 Στερεολιθογραφία Μάσκας

Στη Στερεολιθογραφία Μάσκας (Masked Stereolithography), μια συστοιχία LED χρησιμοποιείται ως πηγή φωτός που εκπέμπεται προς μια οθόνη LCD. Η οθόνη LCD χρησιμοποιείται ως μια μάσκα, προκειμένου να δημιουργήσει την εικόνα κάθε στρώματος του αντικειμένου. Η ψηφιακή μάσκα LCD είναι κατασκευασμένη από τετραγωνικά εικονοστοιχεία όπως το OLP. Το μέγεθος των pixel και η ανάλυση της μάσκας LCD καθορίζει και την ακρίβεια κατασκευής. Σε σύγκριση με τη μέθοδο DLP, που αναλύεται παρακάτω, η MSLA χρησιμοποιεί πολλές μικρού μεγέθους

πηγές φωτός εκπομπής αντί μίας, όπως μια δίοδος λέιζερ ή ένας λαμπτήρας DLP. Η MSLA μπορεί να επιτύχει πολύ μικρότερους χρόνους εκτύπωσης από την SLA, συγκρίσιμους με αυτούς της DLP, καθώς στερεοποιείται ένα ολόκληρο στρώμα και όχι η περιοχή. Λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους, η MSLA θεωρείται η φθηνότερη εναλλακτική για την ανάπτυξη εκτυπωτών ρητίνης (Lopes *et al.*, 2014).



Εικόνα 7: Σύγκριση μεθόδων SLA (Πηγή: Diyode,2019)

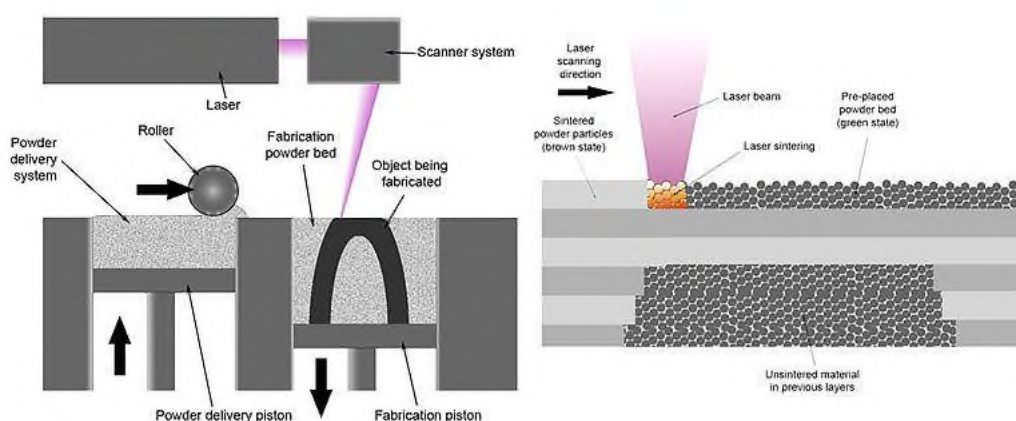
2.3.4 Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός

Η τεχνική της Ψηφιακής Επεξεργασίας Φωτός (Digital Light Process - DLP) προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την μέθοδο SLA. Μία σημαντική διαφορά είναι ότι η DLP χρησιμοποιεί έναν ψηφιακό προβολέα φωτός για να προβάλλει μια εικόνα της διατομής μιας στρώσης, στερεοποιώντας σε όλη την περιοχή σε ένα βήμα. Η εικόνα για κάθε στρώση σχηματίζεται σε μια ψηφιακή οθόνη, και συνεπώς η στρώση αποτελείται από μικρά ορθογώνια μπλοκ που ονομάζονται voxels. Σε αντίθεση με τη SLA, η DLP μπορεί να επιτύχει ταχύτερους χρόνους εκτύπωσης, καθώς εκτίθεται ταυτόχρονα ολόκληρο το στρώμα αντί να εκτελείται σάρωση της διατομής. Η εικόνα σχηματίζεται μέσω μιας ψηφιακής συσκευής DMD (Digital Micromirror Device) που περιλαμβάνει μια σειρά μικροστοιχείων που ελέγχει τα σημεία στην επιφάνεια της ρητίνης που θα εκτεθούν στο φως και δημιουργεί έτσι το σχετικό μοτίβο φωτός (Cooperstein, Layani and Magdassi, 2015).

2.3.5 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ

Η Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering – SLS) χρησιμοποιείται για την επεξεργασία διαφόρων υλικών σε μορφή πούδρας (μεταλλικά

κράματα, πολυμερή, υβριδικά υλικά και κεραμικά). Ένα υψηλής ισχύος λέιζερ εστιάζεται σε μια ακριβή θέση στην επιφάνεια μιας συμπιεσμένης στρώσης πούδρας, παρέχοντας έτσι την ενέργεια που απαιτείται για τη συσσωμάτωση των κόκκων, τοπικά. Η εστιασμένη ακτίνα σαρώνει όλη τη διατομή σχηματίζοντας έτσι την αντίστοιχη στρώση. Στη συνέχεια ένας κύλινδρος απλώνει ένα νέο στρώμα πούδρας για να επαναληφθεί η διαδικασία της σάρωσης. Με αυτό τον τρόπο, νέα στρώματα σχηματίζονται και συνδέονται με τα αμέσως προηγούμενα (Takezawa, 2017). Ο κλειστός θάλαμος κατασκευής είναι κλεισμένος αεροστεγώς για να διασφαλιστεί ότι κάθε στρώση παράγεται χωρίς σφάλματα. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, το εκτυπωμένο μοντέλο εξάγεται από το μηχάνημα και η περίσσεια πούδρα απομακρύνεται. Ένα ειδικό πλεονέκτημα της SLS είναι ότι η ανεπεξέργαστη πούδρα χρησιμεύει ως δομή υποστήριξης διευκολύνοντας έτσι την κατασκευή περίπλοκων γεωμετριών. Το πορώδες και η θερμοκρασία αποτελούν σημαντικά ζητήματα σε αυτή τη διαδικασία, οπότε η χρήση αυτής της τεχνολογίας για τη δημιουργία δομικών τμημάτων, είναι σχετικά περιορισμένη. Η δυνατότητα χρήσης διαφορετικών τύπων πούδρας σε μια SLS επεξεργασία, επιτρέπει να παραχθούν πιο ρεαλιστικά αντικείμενα, που διαθέτουν ανομοιογενή δομή και τοπικά διαφοροποιημένη υφή επιφανειών (Nikzad, Masood and Sbarski, 2011).

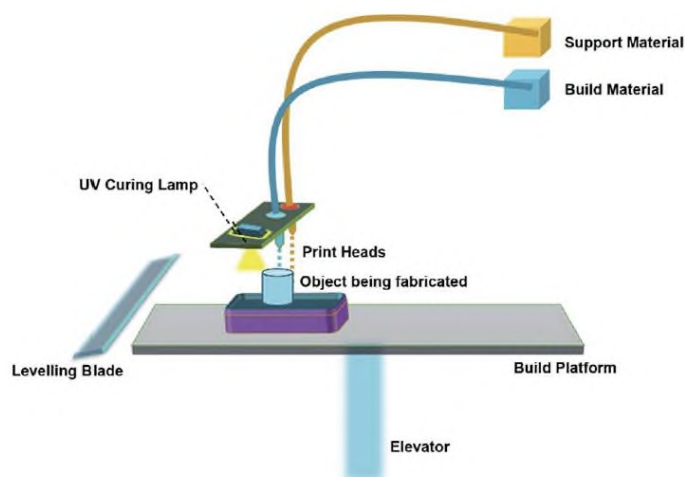


Εικόνα 8: Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Πηγή: LiveScience, 2013)

2.3.6 Εναπόθεση Υλικού

Η εναπόθεση υλικού (Material Jetting - MJ) λειτουργεί όπως ένας συμβατικός εκτυπωτής ψεκασμού μελάνης (Inkjet). Η κεφαλή του εκτυπωτή εναποθέτει,

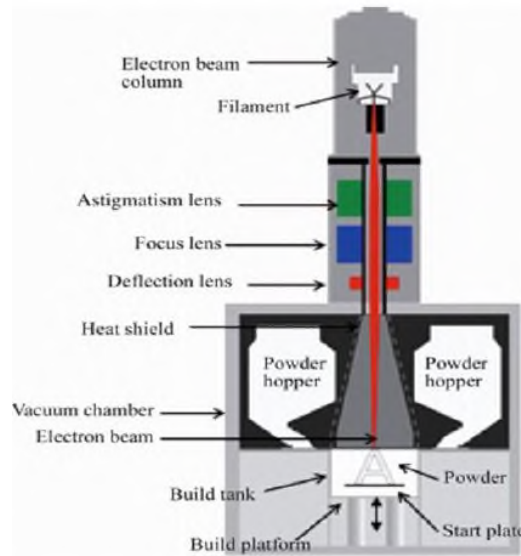
ταυτόχρονα, ένα μεγάλο αριθμό σταγονιδίων φωτοπολυμερών, τα οποία σκληραίνουν/στερεοποιούνται μέσω έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Όταν ένα στρώμα έχει υποστεί επεξεργασία και έχει κατατεθεί, το στάδιο ανάπτυξης μειώνεται σε ένα βάθος ενός επιπέδου και η διαδικασία κατασκευής τριδιάστατων δομών επαναλαμβάνεται (Boparai, Singh and Singh, 2015).



Εικόνα 9: Εναπόθεση Υλικού (Πηγή: Sireesha et al., 2018)

2.3.7 Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων

Στην Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electro Beam Melting - EBM), μια εστιασμένη δέσμη κινείται προκαλώντας τοπικά στερεοποίηση και τήξη, σχηματίζοντας έτσι τη διατομή. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες συσσωμάτωσης κόκκων πούδρας όπως η DMLS, η EBM επιτυγχάνει εξαιρετικό ρυθμό κατασκευής ως αποτέλεσμα της ενεργειακής πυκνότητάς, αντίστοιχο με αυτό της τεχνολογίας Selective Laser Melting (Atzeni and Salmi, 2012).



Εικόνα 10: Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Πηγή: Azam et al., 2018)

2.4 Υλικά που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή

Όπως κάθε μέθοδος κατασκευής, έτσι και η τριδιάστατη εκτύπωση χρειάζεται υλικά υψηλής ποιότητας που πληρούν σταθερές προδιαγραφές και δημιουργούν σταθερές κατασκευές υψηλής ποιότητας. Για να διασφαλιστεί αυτό, αναπτύσσονται μεταξύ των προμηθευτών, των αγοραστών και των τελικών χρηστών σαφείς διαδικασίες, που αφορούν στις απαιτούμενες ιδιότητες και τις μεθόδους δοκιμών των υλικών. Η τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης είναι ικανή για την παραγωγή πλήρως λειτουργικών εξαρτημάτων σε ένα ευρύ φάσμα υλικών συμπεριλαμβανομένων κεραμικών, μεταλλικών, πολυμερών και συνδυασμοί αυτών σε μορφή υβριδίων, σύνθετων υλικών ή λειτουργικά διαβαθμισμένων υλικών (Functionally Graded Materials - FGM) (Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019b).

2.4.1 Μέταλλα

Η τεχνολογία μεταλλικής τριδιάστατης εκτύπωσης βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στους κλάδους της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ιατρικής και της μεταποιητικής βιομηχανίας, συνολικά, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που διαθέτει (Horst, Duvoisin and Vieira, 2018). Τα μεταλλικά υλικά έχουν εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολύπλοκες κατασκευές, από την εκτύπωση ιατρικών εμφυτευμάτων έως αεροδιαστημικά

εξαρτήματα. Βάση για μεταλλικά υλικά 3D εκτύπωσης μπορεί να αποτελούν κράματα αλουμινίου, κράματα με βάση το κοβάλτιο (Hitzler *et al.*, 2018), κράματα νικελίου (Murr, 2016), ανοξείδωτοι χάλυβες (DebRoy *et al.*, 2018) και κράματα τιτανίου (Uhlmann *et al.*, 2015; Caminero *et al.*, 2018). Το κράμα με βάση το κοβάλτιο είναι κατάλληλο για χρήση σε οδοντιατρικές εφαρμογές, διότι διαθέτει υψηλή ειδική ακαμψία και ελαστικότητα και παρουσιάζει καλή αντοχή σε συνθήκες θερμικής επεξεργασίας (Hitzler *et al.*, 2018). Κράματα νικελίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές αεροδιαστημικής (Murr, 2016), καθώς τα αντίστοιχα 3D εκτυπωμένα κομμάτια διαθέτουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και την υψηλή θερμοκρασία, η οποία μπορεί να φθάσει έως και 1200° C (Horst, Duvoisin and Vieira, 2018). Τέλος τα χρησιμοποιούμενα κράματα κράματα τιτανίου, διαθέτουν, ιδιότητες, όπως υψηλή ολκιμότητα, καλή αντοχή στη διάβρωση και στην οξείδωση, καθώς και σχετικά χαμηλή πυκνότητα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή και τα κομμάτια υποβάλλονται σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, όπως π.χ. συμβαίνει σε εξαρτήματα για αεροδιαστημικές εφαρμογές (Uhlmann *et al.*, 2015) και βιοϊατρικά εμφυτεύματα (Trevisan *et al.*, 2018).

2.4.2 Πολυμερή

Οι τεχνολογίες τριδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιούνται ευρέως για την παραγωγή πλαστικών κομματιών από μοντέλα σχεδιασμού έως λειτουργικά πρωτότυπα με δύσκολες γεωμετρίες (Caminero *et al.*, 2018). Χρησιμοποιώντας τεχνολογίες εξώθησης υλικού μπορούν να κατασκευαστούν κομμάτια από θερμοπλαστικά υλικά, όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), το πολυπροπυλένιο (PP) ή το πολυαιθυλένιο (PE) (Caminero *et al.*, 2018). Τελευταία, θερμοπλαστικά νήματα με υψηλότερες θερμοκρασίες τήξης, όπως τα PEEK και PMMA, είναι επίσης διαθέσιμα ως υλικά για τριδιάστατη τεχνολογία εκτύπωσης (Dizon *et al.*, 2018). Πολυμερή υλικά με χαμηλό σημείο τήξης ή υλικά σε υγρή κατάσταση, χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία τριδιάστατων εκτυπώσεων λόγω του χαμηλού κόστους και βάρους και της ευελιξίας που προσφέρουν από πλευράς επεξεργασίας (Wang *et al.*, 2017). Πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε ορθοπεδικές/βιοϊατρικές εφαρμογές, καθώς διαθέτουν υψηλή βιοσυμβατότητα και καλή μηχανική αντοχή (Hitzler *et al.*, 2018).

2.4.3 Κεραμικά

Σήμερα, η τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να παράγει συμπαγή κομμάτια από κεραμικά ή/και σκυρόδεμα, μέσω βελτιστοποίησης των σχετικών παραμέτρων και ρυθμίσεων (Baldassarre and Ricciardi, 2017). Τα κεραμικά υλικά διαθέτουν υψηλή μηχανική και θερμική αντοχή. Λόγω της ρευστής τους κατάστασης κατά την εκτύπωση, τα κεραμικά μπορούν να ακολουθήσουν σχεδόν οποιοδήποτε μοτίβο και εκτιμάται ότι είναι κατάλληλα για τη δημιουργία μελλοντικών κατασκευών και κτιρίων (Baldassarre and Ricciardi, 2017). Σύμφωνα με τους Owen (Owen *et al.*, 2018), τα κεραμικά υλικά είναι χρήσιμα και για εφαρμογές οδοντιατρικής και αεροδιαστημικής. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η αλουμίνα (A. Zocca, 2017), τα διάφορα βιοδραστικά γυαλιά (A. R. Boccaccini, 2015) και η ζirkονία. Για παράδειγμα, η πούδρα αλουμίνας έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί με τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης. Η αλουμίνα είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο κεραμικό οξειδίο με ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των καταλύτων των προσροφητικών, μικροηλεκτρονικών, της βιομηχανίας χημικών προϊόντων, της αεροδιαστημικής βιομηχανίας καθώς και άλλων κλάδων υψηλής τεχνολογίας (Tang and Yu, 2015). Χρησιμοποιώντας τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης, παράγονται κομμάτια υψηλής πυκνότητας σε αλουμίνα και σύνθετης μορφής (A. Zocca, 2017). Βιοδραστικό γυαλί έχει χρησιμοποιηθεί και στη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας με αρκετά καλά αποτελέσματα. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας της Κεραμικής Στερεολιθογραφίας (Stereolithographic Ceramic Manufacturing - SLCM), εκτιμάται ότι θα καθίσταται δυνατή η παραγωγή κεραμικών κομματιών υψηλής πυκνότητας και ομοιογενούς μικροδομής, που θα διαθέτουν επίσης υψηλή αντοχή σε θλίψη και κάμψη (A. R. Boccaccini, 2015).

2.4.4 Σύνθετα Υλικά

Τα διάφορα σύνθετα υλικά με την εξαιρετική ευελιξία, που προσφέρουν, από πλευράς ιδιοτήτων, σε συνδυασμό με το σχετικά χαμηλό βάρος, έχουν φέρει επανάσταση σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους. Τυπικά παραδείγματα σύνθετων υλικών αποτελούν πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα σύνθετα (Hao, 2018) και πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen,

2014). Σύνθετες κατασκευές από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται ευρέως στη αεροδιαστημική βιομηχανία λόγω της υψηλής του ακαμψίας, καθώς και λόγω της σχετικά υψηλής αντοχής τους σε στατική/δυναμική καταπόνηση και διάβρωση (Hao, 2018). Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές στην εφαρμογή τριδιάστατης εκτύπωσης (Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014), λόγω της αποδοτικότητας κόστους και της υψηλής λειτουργικής απόδοσης (Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019b). Σύνθετα υλικά αυτού του τύπου διαθέτουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα και σχετικά χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, ενώ μπορούν επίσης να είναι άκαυστα και δεν επηρεάζονται από τις θερμοκρασίες σκλήρυνσης που εμφανίζονται σε κάποιες μεθόδους τριδιάστατης εκτύπωσης. (Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019b).

2.4.5 Έξυπνα υλικά

«Έξυπνο» χαρακτηρίζεται το υλικό που όταν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενός κομματιού επιτρέπει την ελεγχόμενη αλλαγή μορφής αυτού, με τροποποίηση των εξωτερικών συνθηκών, όπως η θερμότητα και η παρουσία νερού στο περιβάλλον (Lee, An and Chua, 2017). Παραδείγματα τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων από έξυπνα υλικά αποτελούν κομμάτια αυτο-εξελισσόμενης δομής και εύκαμπτα συστήματα ρομποτικής. Κάποια έξυπνα υλικά όπως τα κράματα/πολυμερή (shape memory alloy/polymer) με μνήμη σχήματος χαρακτηρίζονται και ως υλικά 4D εκτύπωσης (Van Humbeeck, 2018). Υλικά αυτού του τύπου, όπως κράματα νικελίου - τιτανίου (Van Humbeeck, 2018) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιοϊατρικά εμφυτεύματα για την ενσωμάτωση ηλεκτρομηχανικών συσκευών (Baldassarre and Ricciardi, 2017). Στην 3D εκτύπωση με χρήση νικελίου - τιτανίου, οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού, η αναπαραγωγικότητα της μικροδομής και η πυκνότητα αποτελούν σημαντικές παραμέτρους. Τα πολυμερή με μνήμη σχήματος είναι μια ομάδα λειτουργικών υλικών που ανταποκρίνονται σε ένα ερέθισμα όπως η έκθεση σε φως, η παροχή θερμότητας, η επαφή με ορισμένα είδη χημικών ουσιών κ.ο.κ. (Yang *et al.*, 2016). Χρησιμοποιώντας τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης, η περίπλοκη μορφή ενός κομματιού από πολυμερές με μνήμη σχήματος, μπορεί εύκολα να παραχθεί. Η ποιοτική αξιολόγηση του κομματιού αφορά συνήθως στην εκτίμηση της

ακρίβειας των διαστάσεων, της τραχύτητας των επιφανειών και της πυκνότητας (Yang *et al.*, 2016).

Κεφάλαιο 3: Η συμβολή της τριδιάστατης εκτύπωσης σε στρατιωτικές εφαρμογές

3.1 Γενικά

Σύμφωνα με έρευνες, ένα τεράστιο ποσοστό, της τάξης του 75%, των ηγετικών στελεχών στον κλάδο της άμυνας πιστεύει ότι η τριδιάστατη εκτύπωση θα καταστεί συνήθης στην αμυντική βιομηχανία του πλανήτη μέσα στα επόμενα δέκα χρόνια. Η προσθετική κατασκευή εκτιμάται ότι μπορεί να μεταμορφώσει την αμυντική βιομηχανία, επιτρέποντας την ταχεία κατασκευή ανταλλακτικών κατ' απαίτηση, μειώνοντας παράλληλα το κόστος παραγωγής και παρέχοντας νέες δυνατότητες σχεδιασμού. Εκτιμάται, επίσης, ότι η προσθετική κατασκευή ξεκλειδώνει μια σειρά ευκαιριών για την αμυντική βιομηχανία, μειώνοντας το κόστος παραγωγής εργαλείων και εξαρτημάτων, καθώς και προσφέροντας επιπλέον ευελιξία στο σχεδιασμό και τη δυνατότητα της επιτόπου κατασκευής (Asil, 2014).

Οι ένοπλες δυνάμεις - από τις ΗΠΑ έως την Αυστραλία - έχουν εδώ και χρόνια αναγνωρίσει τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η Προσθετική Κατασκευή και εκμεταλλεύονται, ήδη, τους τριδιάστατους εκτυπωτές στο πεδίο. Τριδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα εφαρμόζονται, ήδη, σε κινητήρες αεροσκαφών, σε δεξαμενές και σε υποβρύχια, ακόμα και στον απλό εξοπλισμό των στρατιωτών. Από τριδιάστατα εκτυπωμένα χερούλια στρατιωτικών τροχοφόρων και αρμάτων και λαβές για τουφέκια, μέχρι μέρη κινητήρα μαχητικών αεροσκαφών και προσαρμοσμένα προσθετικά μέλη, οι πιθανές χρήσεις της τριδιάστατης εκτύπωσης στο στρατό είναι τεράστιες. Ως μικρόκοσμος της ευρύτερης κοινωνίας, ο Στρατός αποτελεί, επίσης, ιδανικό πεδίο για την πραγματοποίηση δοκιμών και την ανάπτυξη καινοτομιών, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ως εφαλτήριο για περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη. (Cottinham, 2021).

3.2 Στρατιωτικές Εφαρμογές

3.2.1 Τοπογραφικοί χάρτες

Ένας τριδιάστατα εκτυπωμένος τοπογραφικός χάρτης προσφέρει σε ένα στέλεχος των ενόπλων δυνάμεων μια λεπτομερή και αξιόπιστη πηγή τοπογραφικής ανάλυσης, η οποία θα βοηθήσει στη λήψη των καλύτερων δυνατών αποφάσεων, ώστε να γίνει σωστή εκτέλεση της αποστολής και επίτευξη του αντικειμενικού στόχου της στρατιωτικής επιχείρησης. Η επιχειρησιακή τους αξία είναι μεγάλη, καθώς το σχετικά μικρό κόστος καθιστά τους 3D εκτυπωμένους χάρτες ένα παρελκόμενο υλικό απαραίτητο για κάθε επιχειρησιακή άσκηση. Συνδυάζει πλήρη λεπτομέρεια και ακρίβεια στοιχείων, με σκοπό την πραγματοποίηση υπολογισμών και μετρήσεων, ενώ είναι ευκολότερα διαχειρίσιμος και φορητός από αυτούς που παράγονται με παραδοσιακές τεχνικές, εξαιτίας του μικρού του βάρους (Yin and Yang, 2018).

Παράδειγμα αντίστοιχης χρήσης αποτελεί η δημιουργία ενός τριδιάστατου στρατιωτικού χάρτη για τον Κινεζικό στρατό. Ένα κέντρο μέτρησης και χαρτογράφησης, το οποίο υπάγεται διοικητικά στην Στρατιωτική Περιοχή Lanzhou του Κινεζικού Λαϊκού Απελευθερωτικού Στρατού, ανέπτυξε και κατασκεύασε με επιτυχία τον πρώτο 3D εκτυπωμένο χάρτη της Κίνας, που αφορούσε την αστική περιοχή Lanzhou (Armyrecognition.com, 2014). Το προσωπικό που συμμετείχε στην ανάπτυξη και την κατασκευή του χάρτη, χρησιμοποίησε στη θέση των συνηθισμένων επαγγελματικών και κοστοβόρων υλικών εκτύπωσης, όπως η ρητίνη, χιλιάδες τόνους από παλιούς χάρτες που ήταν αποθηκευμένοι στο υπόγειο του Κέντρου Αποθήκευσης Χαρτών.



Εικόνα 11: Μια τριδιάστατη απεικόνιση ενός 1:250.000 τοπογραφικού χάρτη (Πηγή: ArmyRecognition, 2014)

Μετά την επιτυχία της εκτύπωσης αυτής, το προσωπικό αποφάσισε να προχωρήσει σε αναβάθμιση και ανακαίνιση των τοπογραφικών χαρτών. Πρόσφατα, βελτίωσαν την ακρίβεια ενός χάρτη τριών διαστάσεων μεγέθους A4, από 1 χιλιοστό σε 0,1 χιλιοστό, ελαττώνοντας παράλληλα το χρόνο εκτύπωσης από 24 σε 8 ώρες, και επεκτείνοντας την περιοχή που απεικονίζεται.

3.2.2 Εκτυπωμένες εφαρμογές

Μια από τις πιο επιτυχημένες πρόσφατες εφαρμογές τριδιάστατης εκτύπωσης στον Στρατό των ΗΠΑ ήταν ένα φαινομενικά απλό πώμα καταπακτής ενός οχήματος. Αυτό το βασικό στοιχείο τοποθετείται σε οχήματα μάχης για αποστολές που εκτελούνται σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, επιτρέποντας στους οδηγούς να βλέπουν καθαρά τη νύχτα. Ο αρχικός κατασκευαστής διέκοψε την παραγωγή, με αποτέλεσμα τα ανταλλακτικά να κοστίζουν πάνω από 10.000\$ και να απαιτούνται μήνες για την παραγωγή τους (Cottinham, 2021).

Χρησιμοποιώντας έναν μεταλλικό τριδιάστατο εκτυπωτή από την Markforged, ο Στρατός των ΗΠΑ μπόρεσε να κατασκευάσει πώματα που δεν ήταν μόνο σημαντικά φθηνότερα, αλλά και πιο λειτουργικά και κομψά. Οι μηχανικοί του στρατού απλοποίησαν το σχέδιο του εξαρτήματος μειώνοντας τα απαιτούμενα κομμάτια σε τέσσερα από δέκα. Με αυτό τον τρόπο, εξοικονομήθηκαν περισσότερα από 244.000\$ και βελτιώθηκε το σχέδιο ενός κρίσιμου εξαρτήματος.

Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης τριδιάστατων εκτυπωτών αποτελεί η προσπάθεια εκτύπωσης ανταλλακτικών για το ελικόπτερο Black Hawk, το οποίο είναι πάνω από 41 ετών, και το B-2 Spirit, γνωστό και ως Stealth Bomber. Το Υπουργείο Άμυνας της Αμερικής σχεδίαζε να επεκτείνει την επιχειρησιακή ζωή αυτού του εξοπλισμού για τουλάχιστον άλλη μια δεκαετία, και έτσι στράφηκε στην τριδιάστατη εκτύπωση για ανταλλακτικά. Πέρα από τις συγκεκριμένες περιπτώσεις, το Κέντρο Διαχείρισης Κύκλου Ζωής της Πολεμικής Αεροπορίας έχει βρει δεκάδες περιπτώσεις στις οποίες η τριδιάστατη εκτύπωση μπορεί να βοηθήσει στην παραταση του χρόνου ζωής πεπαλαιωμένου εξοπλισμού διαφόρων τύπων, από το C-5 Super Galaxy έως το B-52 Stratofortress.

«Η προσθετική κατασκευή είναι ο τρόπος του μέλλοντος», δήλωσε ο Roger Tyler, μηχανικός αεροδιαστημικής στο Γραφείο Προγράμματος B-2. «Ο στόλος των B-2 είναι σχετικά μικρού μεγέθους, καθώς υπάρχουν μόνο 20 από αυτά. Συνεπώς,

οποιαδήποτε στιγμή πρέπει να επισκευασθεί κάτι στο αεροσκάφος, το κόστος μπορεί να είναι ένα ζήτημα. Με την Προσθετική Κατασκευή, όμως, μπορούμε να σχεδιάσουμε κάτι και να το κατασκευάσουμε μέσα σε μια εβδομάδα, περιορίζοντας έτσι το κόστος στο ελάχιστο».



Εικόνα 12: Πάνω από 20 ετών, το B-2 Spirit, γνωστό και ως Stealth Bomber, διατηρείται σε λειτουργία με τριδιάστατα εκτυπωμένα μέρη (Πηγή: Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ)

Πρόσφατα, στελέχη της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ μπόρεσαν, επίσης, να εκτυπώσουν 3D ένα εξάρτημα από τιτάνιο για το μαχητικό F22 Raptor Stealth. Η ικανότητα ταχείας παραγωγής ανταλλακτικών για γηράσκοντα στρατιωτικά αεροσκάφη, θα βοηθήσει στη μείωση του χαμένου χρόνου και στην επαναφορά αυτών των μηχανών στον ουρανό το συντομότερο δυνατό (Owen, 2021).

Το αρχικό εξάρτημα είναι από αλουμίνιο και σχετικά μικρό σε μέγεθος. Χρησιμοποιείται στο πιλοτήριο και αντικαθίσταται πολύ συχνά (στο 80% των περιπτώσεων) κατά τη συντήρηση. Σε αντίθεση με το εξάρτημα αλουμινίου, το τριδιάστατο εκτυπωμένο εξάρτημα τιτανίου φθείρεται πολύ πιο αργά και εκτιμάται ότι μπορεί να είναι λειτουργικό για όλο το υπόλοιπο της ζωής του μαχητικού αεροσκάφους. Η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ θα παρακολουθεί αυτό το εξάρτημα με την πάροδο του χρόνου και αν αποδειχθεί ότι έχει ικανοποιητική αντοχή, παρόμοια εξαρτήματα θα εγκατασταθούν σε όλα τα F-22.



Εικόνα 13: Το νέο εξάρτημα τιτανίου τριδιάστατα εκτυπωμένο για το μαχητικό F22 Raptor Stealth (Πηγή: Πολεμική Αεροπορία ΗΠΑ, 2020)

Σε μια αντίστοιχη εφαρμογή, στελέχη του Oklahoma City Air Logistics Complex, μια πτέρυγα του Air Force Sustainment Center, παρήγαγαν το πρώτο μεταλλικό εξάρτημα προσθετικής κατασκευής που δοκιμάστηκε επιτυχώς σε κινητήρα αεροσκαφών της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ, ένα σημαντικό ορόσημο για τη μελλοντική διατήρηση γηρασκόντων αεροσκαφών, όπως το E-3 Airborne Warning and Control System και το B-52 Stratofortress (Owen, 2021). Παρόλο που πρόκειται για ένα σχετικά μικρό εξάρτημα, εκτιμάται ότι η τεχνογνωσία που απέκτησε η ομάδα θα βοηθήσει στην επίλυση ζητημάτων της αλυσίδας εφοδιασμού και θα βοηθήσει στην περαιτέρω ενίσχυση των δυνατοτήτων υποστήριξης του προσωπικού.



Εικόνα 14: Το πρώτο μεταλλικό εξάρτημα προσθετικής κατασκευής για κινητήρα αεροσκαφών (Πηγή: Oklahoma City Air Logistics Complex, 2020)

Η τριδιάστατη εκτύπωση φαίνεται, επίσης, ότι μπορεί να συμβάλει στην επιτόπου επισκευή βλαβών σε διάφορα συστήματα υποβρυχίων. Η Australian Submarine Corporation (ASC), βασικός προμηθευτής και συνεργάτης του Πολεμικού Ναυτικού της Αυστραλίας, συνεργάστηκε πρόσφατα με την εθνική επιστημονική οργάνωση για να διερευνήσουν τις δυνατότητες χρήσης τεχνολογίας ψυχρού ψεκασμού, ενός τύπου τριδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων, στη θάλασσα για επισκευές υποβρυχίων. Ο κρύος ψεκασμός χρησιμοποιεί μια υπερηχητικής ταχύτητας δέσμη αερίου για να εναποθέσει τα σωματίδια/κόκκους μετάλλου σε μια επιφάνεια. Η καινοτόμος διαδικασία επιτρέπει την εναπόθεση σε θερμοκρασίες μικρότερες από τις θερμοκρασίες τήξης των μετάλλων, εξασφαλίζοντας έτσι τη δομική ακεραιότητα των συστατικών και της γύρω περιοχής (Cottinham, 2021). Η τεχνολογία σχεδιάζεται να χρησιμοποιηθεί για την επιδιόρθωση φυσικών βλαβών στα κύτη πίεσης των υποβρυχίων της κατηγορίας Collins, που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του υποθαλάσσιου στόλου του Βασιλικού Αυστραλιανού Ναυτικού.

Η ύπαρξη ενός τριδιάστατου εκτυπωτή που μπορεί να χωρέσει στον στενό χώρο ενός υποβρυχίου και να χρησιμοποιηθεί για επισκευές στη θάλασσα, θα επιτρέψει στα υποβρύχια να αναπτυχθούν για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, μειώνοντας τον χρόνο που δαπανάται για τις συμβατικές επισκευές και αυξάνοντας τη συνολική διαθεσιμότητα.



Εικόνα 15: Υποβρύχια της κατηγορίας Collins της Αυστραλιανής Ναυτικής (Πηγή: Commonwealth of Australia, 2021)

Αξιοσημείωτη όμως είναι και η προσπάθεια για εύκολη και γρήγορη αντικατάσταση εργαλείων που απαιτούνται για επισκευές στο πεδίο της μάχης. Εν ενεργεία Αυστραλοί στρατιώτες, που μελετούσαν την τριδιάστατη εκτύπωση στο Πανεπιστήμιο Charles Darwin, σχεδίασαν ένα εργαλείο για να αντικαταστήσουν εξαρτήματα και εξοπλισμό που φθείρεται συχνά στο πεδίο. Το Gunner's Ratchet - ένα εξειδικευμένο πολυεργαλείο σε σχήμα κλειδιού, δημιουργήθηκε ειδικά για την εξυπηρέτηση του πολυβόλου M242 του ελαφρού θωρακισμένου οχήματος της ANZAC. Κατά το σχεδιασμό οι στρατιώτες δε βασίστηκαν σε ένα υπάρχον σχέδιο, αλλά αποφάσισαν να σχεδιάσουν κάτι εκ νέου. Έτσι, μπόρεσαν να αναπτύξουν ένα νέο σχέδιο που δίνει λύση σε συνήθη προβλήματα, να το εκτυπώσουν και να το δοκιμάσουν με κόστος σημαντικά χαμηλότερο από ότι θα απαιτούσαν για κάτι τόσο εξειδικευμένο.

Η αυστραλιανή νεοσύστατη εταιρεία SPEE3D, σε συνεργασία με το Σώμα Στρατού της Αυστραλίας και της Νέας Ζηλανδίας (ANZAC) και το Πανεπιστήμιο Charles Darwin, ανέπτυξαν το σχετικό σύστημα Προσθετική Κατασκευής WarpSPEE3D, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αντίστοιχων εργαλείων. Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει υπό δύσκολες συνθήκες, αντίστοιχες με αυτές που παρατηρούνται σε διάφορα εδάφη και ζώνες μάχης. Όπως και το σύστημα ExOne των ΗΠΑ, είναι ανθεκτικό και αρκετά μικρό για να τοποθετηθεί σε ένα εμπορευματοκιβώτιο αποστολής, οπότε ο εκτυπωτής μπορεί να εγκατασταθεί σχετικά εύκολα σε σκάφη όπως και να μεταφερθεί γρήγορα στο πεδίο της μάχης μέσω φορτηγών. Η χρήση της τεχνολογίας ψυχρού ψεκασμού, το καθιστά ιδανικό για διάφορα εδάφη και εφαρμογές και μετά από δύο επιτυχημένες δοκιμές πεδίου, η ANZAC εξετάζει την περαιτέρω ενσωμάτωση εξαρτημάτων Προσθετικής Κατασκευής στις αλυσίδες εφοδιασμού της (Cottinham, 2021).



Εικόνα 16: Το 3D τυπωμένο με μέταλλο Gunner's Ratchet είναι ένα εργαλείο τόσο εξειδικευμένο που θα ήταν πολύ ακριβό να δημιουργηθεί χωρίς τριδιάστατη εκτύπωση (Πηγή, All3DP.Pro, 2021)

Μια ακόμα εφαρμογή της τριδιάστατης εκτύπωσης, στο θαλάσσιο πεδίο αυτή τη φορά, αφορά στην κατασκευή «δολώματος», σκοπός του οποίου θα είναι να αποπροσανατολίσει τον εχθρό, ώστε να προβούν τα φίλια τμήματα σε αναγνωρίσεις και στρατιωτικές επιχειρήσεις χωρίς περισπασμό. Έτσι, γεννήθηκε η ιδέα για ένα είδος μικρού υποβρυχίου - δολώματος, για την κατασκευή του οποίου απαιτούνται, συνήθως, περίπου 5 μήνες. Τώρα, χάρη στην τριδιάστατη εκτύπωση, στρατιώτες του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ μπορούν να μεταφερθούν από και προς τις ζώνες μάχης σε μικρά 3D εκτυπωμένα υποβρύχια που χρειάζονται μόλις 4 εβδομάδες για την κατασκευή τους. Το σύστημα Optionally Manned Technology Demonstrator, η πρώτη τριδιάστατη εκτυπωμένη υποβρύχια κατασκευή των ΗΠΑ, παρουσιάστηκε από το Πολεμικό Ναυτικό στις 24 Ιουλίου 2020. Το κύτος έχει μήκος 30 πόδια και αποτελείται από έξι τμήματα κατασκευασμένα από πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα. Το έργο χρειάστηκε μόνο τέσσερις εβδομάδες για να ολοκληρωθεί και σύμφωνα με αρχικές εκτιμήσεις μειώνει το κόστος παραγωγής κατά 90%. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, ένα παραδοσιακό μικρό υποβρύχιο κοστίζει μεταξύ 600.000\$ – 800.000\$ και η κατασκευή του απαιτεί τρεις έως πέντε μήνες. Το αντίστοιχο 3D εκτυπωμένο υποβρύχιο, κόστισε μόλις 60.000\$, αναπτύχθηκε σε τέσσερις εβδομάδες, και κατασκευάστηκε μέσα σε λίγες ημέρες.



Εικόνα 17: Το τριδιάστατο εκτυπωμένο υποβρύχιο (Πηγή: Insider, 2017)



Εικόνα 18: Ο χειριστής εν ώρα λειτουργίας του OMTD (Πηγή: Insider, 2017)

3.2.3 Όπλα-πυρομαχικά

Το 2012, η ομάδα Defense Distributed με έδρα τις ΗΠΑ αποκάλυψε σχέδια για το σχεδιασμό ενός λειτουργικού πλαστικού όπλου που θα μπορούσε να μεταφορτωθεί και να αναπαραχθεί από οποιονδήποτε με έναν 3D εκτυπωτή (Greenberg, 2012; PCMag Staff, 2012). Η Defense Distributed έχει επίσης σχεδιάσει έναν τριδιάστατο εκτυπώσιμο τύπο τυφεκίου AR-15 χαμηλότερων επιδόσεων (ικανό να διαρκέσει περισσότερο από 650 γύρους) και μια ποικιλία πυρομαχικών (Farivar, 2013). Τον Μάιο του 2013, η Defense Distributed ολοκλήρωσε τον σχεδιασμό του πρώτου σχεδίου εργασίας, ενώ τον Ιούλιο του 2013, το πρώτο κινητό εργαστήριο τριδιάστατης εκτύπωσης έφτασε στο Αφγανιστάν, επιτρέποντας στους στρατιώτες να

επισκευάσουν τον εξοπλισμό τους γρήγορα και φθηνά, αντί να περιμένουν εβδομάδες για την παράδοση ανταλλακτικών.



Εικόνα 19: Τυφέκιο AR-15 με τριδιάστατο εκτυπωμένο κάτω δέκτη (Πηγή: Dezeen, 2013)



Εικόνα 20: Τυφέκιο AR-15 με τριδιάστατα τυπωμένα μέρη (Πηγή: 3D PrinterChat.com, 2020)

Το 2013, μια εταιρεία με έδρα το Τέξας, η Solid Concepts, παρουσίασε μια τριδιάστατα εκτυπώσιμη εκδοχή ενός πιστολιού M1911, κατασκευασμένου από μέταλλο, χρησιμοποιώντας έναν βιομηχανικό τριδιάστατο εκτυπωτή (Cross, 2013). Το 2014, μια εταιρεία της Νέας Ζηλανδίας, η Oceania Defense, παρουσίασε τριδιάστατα τυπωμένα κατασταλτικά (σιγαστήρες) τιτανίου που είναι 50% ελαφρύτερα από τα συμβατικά (Qian, 2014).



Εικόνα 21: 3D εκτυπωμένο revolver M1911 από την εταιρία imlab (Πηγή: Pinshape, 2013)

Το Grizzly είναι ένα 3D τυπωμένο τυφέκιο διαμετρήματος 0,22 χιλιοστών, που κατασκευάστηκε τον Αύγουστο του 2013 με τη χρήση ενός Stratasys εκτυπωτή Dimension 1200es (PCMag Staff, 2012). Δημιουργήθηκε από έναν Καναδό γνωστό μόνο με το ψευδώνυμο "Matthew", ο οποίος δήλωσε στο The Verge ότι ήταν στα 20 του και η κύρια δουλειά του ήταν η κατασκευή εργαλείων για τον κατασκευαστικό κλάδο. Το πρωτότυπο Grizzly εκτόξευσε μόνο μία βολή πριν σπάσει. Το επόμενο πρωτότυπο, Grizzly 2.0 εκτόξευσε δεκατέσσερις σφαίρες πριν υποστεί ζημιά λόγω της καταπόνησης.

Ένα άλλο οπλικό σύστημα το οποίο έχει κατασκευαστεί μέσω της τριδιάστατης εκτύπωσης είναι το RAMBO (Rapid Additively Manufactured Ballistics Ordnance). Το RAMBO, είναι ένας τροποποιημένος εκτοξευτής χειροβομβίδων M203 με υπόθεμα ώμου και λαβή πιστολιού, το οποίο εκτοξεύει χειροβομβίδες

(Mizokami, 2017). Ο εκτοξευτής χειροβομβίδων M203 μπορεί να τοποθετηθεί κάτω από την κάννη ενός τυφεκίου M16 ή μιας караμπίνας M4, αποτελεί σχετικά παλαιό υλικό, το οποίο πιθανότατα δεν προστατεύεται πλέον με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας.



Εικόνα 22: Ο εκτοξευτής χειροβομβίδων RAMBO (Πηγή: U.S. Army Acquisition Support Center, 2017)

Αποτελείται από 50 μεμονωμένα μέρη, και όλα αυτά με εξαίρεση τα ελατήρια και τους συνδετήρες κατασκευάστηκαν με τριδιάστατη εκτύπωση. Η κάννη και ο μοχλός οπλίσεως κατασκευάστηκαν από αλουμίνιο με άμεση τήξη μετάλλου με λέιζερ. Η σκανδάλη και ο πείρος εκτόξευσης τυπώθηκαν σε ατσάλι 4340. Η κάννη και ο δέκτης του εκτοξευτή χειροβομβίδων χρειάστηκαν περίπου 70 ώρες για εκτύπωση και στη συνέχεια χρειάστηκαν 5 ώρες, μετά την εκτύπωση, για να τελειοποιηθούν (Mizokami, 2017).

Ο εκτοξευτής χειροβομβίδων δεν ήταν το μόνο πράγμα που εκτυπώθηκε, καθώς εκτυπώθηκαν και χειροβομβίδες. Συγκεκριμένα, εκτυπώθηκαν αρκετές σειρές χειροβομβίδων εκπαίδευσης M781, οι οποίες δεν έχουν εκρηκτικά και αποτελούνται από αλουμίνιο και νάιλον γεμάτο γυαλί. Ο εκτοξευτής χειροβομβίδων και οι χειροβομβίδες εκτύπωσης 3D, εκτυπώθηκαν τον Οκτώβριο του 2016 και εμφάνισαν μηδενική υποβάθμιση μετά από 15 βολές. Οι 3D εκτυπωμένες χειροβομβίδες έφτασαν στο 5% της ταχύτητας του ρύγχους των κανονικών χειροβομβίδων παραγωγής, αποδεικνύοντας ότι το σύστημα λειτουργούσε πολύ κοντά στο πραγματικό.



Εικόνα 23: Τα εκτυπωμένα μέρη του RAMBO, εκτός από την κάννη και το μηχανισμό όπλισης (Πηγή: U.S. Army Acquisition Support Center, 2017)

Τον Οκτώβριο του 2020, δημιουργήθηκε ένα άλλο τυφέκιο τριδιάστατης εκτύπωσης 9mm, γνωστό ως "FGC-9". Αναφέρεται ότι μπορεί να κατασκευαστεί σε 2 εβδομάδες με κόστος 500\$. Ένα δεύτερο μοντέλο κατασκευάστηκε αργότερα τον Απρίλιο του 2021.

Όσον αφορά, τα πυρομαχικά, η διαδικασία έχει επεκταθεί τόσο σε σφαίρες όσο και σε βομβίδες. Οι απλές σφαίρες τριδιάστατης εκτύπωσης 9mm μπορούν να γίνουν υπερηχητικές με τη σωστή ποσότητα πυρίτιδας, να παραμείνουν σε ένα κομμάτι, μέχρι να φτάσουν στον στόχο τους τουλάχιστον και να είναι αρκετά ακριβείς, δεδομένου ότι είναι κατασκευασμένες από πλαστικό σε εκτυπωτή FDM χαμηλών επιδόσεων (Kalogeropoulos, 2020).



Εικόνα 24: Μια δέσμη τριδιάστατων εκτυπωμένων σφαιρών (Πηγή: 3D PrinterChat.com, 2020)

Και η Ρωσία όμως κατόρθωσε να επιτύχει τη τριδιάστατη εκτύπωση σφαιρών με σκοπό την επίλυση του θέματος του εφοδιασμού στο πεδίο της μάχης. Η μέθοδος κατασκευής σφαιρών με βάση την τριδιάστατη εκτύπωση, που δημιουργήθηκε και δοκιμάστηκε από το Ρωσικό Ίδρυμα για Προηγμένα Έργα στην Αμυντική Βιομηχανία (FPI) και το αμυντικό ερευνητικό κέντρο JSC Tsniitochmash, δημιουργεί σφαίρες στρώση με στρώση, χωρίς να αφήνει χώρο ή ευπάθεια μεταξύ της εξωτερικής επίστρωσης και του πυρήνα μολύβδου. Λόγω του μεγέθους, του μοναδικού στρογγυλού σχήματος και της εκρηκτικότητας, η δομή της σφαίρας χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη: το εξωτερικό στρώμα (χάλκινο περίβλημα) και τον πυρήνα μολύβδου. Το εξωτερικό στρώμα διαμορφώνεται από ένα λεπτό φύλλο χαλκού και χρησιμοποιείται για την κάλυψη και την προστασία του πυρήνα μολύβδου που στη συνέχεια εκρήγνυται στο στόχο. Με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, ο πυρήνας μολύβδου και το εξωτερικό στρώμα πρέπει να δημιουργηθούν ξεχωριστά και στη συνέχεια να συγχωνευθούν μαζί στην τελική διαδικασία. Ο FPI δήλωσε ότι η ακρίβεια της μεθόδου τριδιάστατης εκτύπωσης επέτρεψε στη σφαίρα να λειτουργεί παρόμοια με τα παραδοσιακά κατασκευασμένα πυρομαχικά (Young, 2016).



Εικόνα 25: 3D εκτυπωμένες σφαίρες του ιδρύματος EPI (Πηγή: Young, 2016)

Όσον αφορά τα εκρηκτικά, και σε αυτό τον τομέα υπήρξε υιοθέτηση της προσθετικής κατασκευής. Οι Βρετανικές Ένοπλες Δυνάμεις και το Υπουργείο Άμυνας του Ηνωμένου Βασιλείου, δημιούργησαν μια νέα τεχνική με βάση την τριδιάστατη εκτύπωση, η οποία θα μπορούσε να προσφέρει εκρηκτικές ύλες κατ' απαίτηση, στην πρώτη γραμμή. Μέσω του έργου The Future Energetics Project, έχουν επενδυθεί περίπου 10 εκατομμύρια λίρες, για την ανάπτυξη αμυντικών καινοτομιών, και η τριδιάστατη εκτύπωση έχει αποφέρει μερικά από τα πιο

συναρπαστικά αποτελέσματα. Λόγω της ιδιαίτερης δυνατότητας της προσθετικής κατασκευής για κατασκευή πολύπλοκων μορφών σε παρτίδες μικρού όγκου, τα εκρηκτικά μπορούν να κατασκευαστούν, ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας, κατά παραγγελία και πλήρως προσαρμοσμένα στις προδιαγραφές (Cottinham, 2021).

Οι ερευνητές στο Defence Science and Technology Laboratory (Dstl) χρησιμοποιούν έναν ακουστικό μίξερ LabRAM για να χειρίζονται τα πτητικά συστατικά και όχι τις φυσικές λεπίδες, για λόγους ασφαλείας. Παρόλο που το κόστος της 3D εκτύπωσης για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν έχει ακόμη καθοριστεί, οι ειδικοί εξετάζουν, ήδη, την εκμετάλλευση της τεχνολογίας για δοκιμές όχι μόνο της ισχύος των εκρηκτικών, αλλά και των δυνατοτήτων ενίσχυσης της αντοχής διαφόρων τύπων προστατευτικού εξοπλισμού έναντι εμπρηστικών συσκευών του μέλλοντος.

3.2.4 Μη Επανδρωμένα Οχήματα - Ρομπότ

Η Aurora Flight Science, με έδρα τη Βιρτζίνια, κατασκευάστρια εταιρία που ειδικεύεται στα προηγμένα συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV), φιλοδοξεί να αλλάξει τον τρόπο σχεδιασμού και παραγωγής UAV, συνεργαζόμενη με τη Stratasys για τη δημιουργία του πρώτου αεροσκάφους τριδιάστατης εκτύπωσης στον κόσμο με τζετ. Το σχεδιαζόμενο UAV εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα παραγωγής κλειστών δομών κελύφους με τη μέθοδο FDM, η οποία καθιστά δυνατή την παραγωγή αντικειμένων με χαμηλό λόγο βάρους προς μέγεθος (Pearson, 2015).

Αποτελούμενο κατά 80% από τριδιάστατα εκτυπωμένα μέρη, χρησιμοποιώντας το ελαφρύ υλικό ULTEM 9085, το UAV επιτυγχάνει ταχύτητες πτήσης άνω των 150 mph. Το αεροσκάφος διαθέτει, επίσης, ένα εντυπωσιακό άνοιγμα φτερών 9 ποδιών και ζυγίζει μόλις 33 κιλά. Η εκμετάλλευση της 3D εκτύπωσης παρέιχε στους σχεδιαστές της Aurora απεριόριστη ελευθερία σχεδιασμού, χωρίς τους περιορισμούς των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης, η Aurora πέτυχε να μειώσει τον χρόνο εισαγωγής στην αγορά, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο σχεδιασμού και κατασκευής κατά 50% (Pearson, 2015).



Εικόνα 26: Το πρώτο τριδιάστατο εκτυπωμένο UAV στον κόσμο (Πηγή: Stratasy, 2015)

Ακολούθησαν πολλά νέα μοντέλα UAV, με πιο πρόσφατο παράδειγμα την ανάπτυξη drones από τις ένοπλες δυνάμεις της Ρωσίας.³ Τον Ιούνιο του 2020 παρουσιάστηκε το πρώτο τριδιάστατο εκτυπωμένο drone επιτήρησης χώρου που μπορεί να πετάξει σε επιχειρησιακή ακτίνα 50χλμ. Ζυγίζει 1,8 κιλά, χρειάζεται 1 ημέρα για εκτύπωση και 20 λεπτά για συναρμολόγηση. Η χρήση μιας τέτοιας συσκευής πριν από την εκτέλεση αποστολής, με στόχο την επιτήρηση ή την τακτική κατασκοπία, είναι πολλές φορές αναγκαία. Το 3D εκτυπωμένο drone είναι πολύ φθηνό, εξαιρετικά ελαφρύ, αναλώσιμο και μπορεί να ξαναχτιστεί σχετικά εύκολα. Να σημειωθεί, ότι ένα τέτοιο drone είναι το πρώτο επειδή ακολουθεί το στυλ σχεδιασμού του UAV Predator (κυνηγός). Μερικώς τριδιάστατα εκτυπωμένα UAV κυκλοφορούν ήδη, και βρίσκονται σήμερα σε ευρεία χρήση εντός και εκτός στρατιωτικών πλαισίων.



Εικόνα 27: Το πρώτο μη επανδρωμένο όχημα, τριδιάστατο εκτυπωμένο από τη Ρωσία (Πηγή: 3DprinterChat.com, 2020)

³ <https://www.rt.com/news/350695-russia-3d-printed-drone>

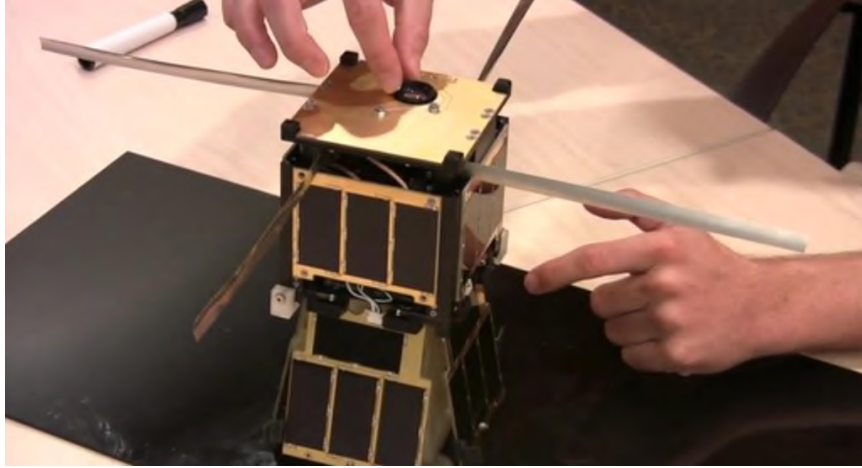
Όσον αφορά τα ρομπότ, η δημιουργία και η κατασκευή αυτών μέσω της τριδιάστατης εκτύπωσης θα επιφέρει σημαντική διευκόλυνση αφού, αντί να αποστέλλονται άνθρωποι να σαρώσουν μια περιοχή, να αντιμετωπίσουν μια κατάσταση ομηρίας ή να απενεργοποιήσουμε μια βόμβα, θα μπορεί να σταλθεί ένα ρομπότ. Αυτό φιλοδοξεί να επιτύχει και η εταιρία Boston Dynamics, με το ρομπότ Atlas, το οποίο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2016. Η τριδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των ποδιών, έτσι ώστε οι ενεργοποιητές και οι υδραυλικές γραμμές να είναι ενσωματωμένες στη δομή, αντί να αποτελούν ξεχωριστά τμήματα. Αναπτύχθηκαν, επίσης, προσαρμοσμένες σερβο-βαλβίδες, που είναι σημαντικά μικρότερες, ελαφρύτερες και πιο αποδοτικές σε σχέση με τις αντίστοιχες αεροδιαστημικών εφαρμογών που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα (Molitch-Hou, 2016).



Εικόνα 28: Η κατασκευαστική δομή των ποδιών που εκτυπώνονται τριδιάστατα, για το ρομπότ Atlas (Πηγή: Boston Dynamics, 2016)

3.2.5 Δορυφόροι

Με τη χρήση δορυφόρων, οι Ένοπλες Δυνάμεις μπορούν να εξασφαλίσουν την επιτήρηση, σε πραγματικό χρόνο, διαφόρων περιοχών υψηλού ενδιαφέροντος και επιχειρησιακής σημασίας, καθώς και κρίσιμων υποδομών. Σε αυτή την περίπτωση, η τριδιάστατη εκτύπωση βοηθά στην παραγωγή δορυφόρων τύπου κύβου (cube sat), οι οποίοι είναι μικροί σε βάρος και μέγεθος, και έχουν πολύ μικρό κόστος ανάπτυξης και εκτόξευσης. Οι συνήθεις διαστάσεις αυτών των δορυφόρων είναι 10εκ. x 10εκ. x 11,35εκ., ενώ το βάρος τους κυμαίνεται μεταξύ 1U-3U, μπορεί να φθάσει όμως και 6U (όπου U=Units), με 1U=1,33kg (Hammes, 2016).



Εικόνα 29: 3D εκτυπωμένα μέρη ενός δορυφόρου (Πηγή:Softpedia News, 2014)

3.2.6 Συντήρηση Εγκαταστάσεων



Εικόνα 30: Τριδιάστατη εκτύπωση δομών σκυροδέματος από Αμερικανούς Πεζοναύτες με τον εκτυπωτή Icon Vulcan (Πηγή: Icon, 2021)

Οι Αμερικανοί Πεζοναύτες δοκίμασαν πρόσφατα έναν τριδιάστατο εκτυπωτή ικανό να κατασκευάσει ολόκληρα κτίρια από σκυρόδεμα που στεγνώνει γρήγορα. Σε μόλις 36 ώρες, ο τριδιάστατος εκτυπωτής της ICON κατασκεύασε μια τσιμεντένια κατασκευή που μπορεί να φιλοξενήσει ένα σύστημα πολλαπλών εκτοξευτών πυραύλων τοποθετημένο σε φορηγό HIMARS (Owen, 2021).

Το αποτέλεσμα είναι μια ανθεκτική κατασκευή που μπορεί να κατασκευαστεί σχεδόν οπουδήποτε αναπτύξουν οι πεζοναύτες, προστατεύοντας προσωπικό, οχήματα και εφόδια από τις καιρικές συνθήκες. Ο σχεδιασμός νέων δομών, από καταφύγια έως γέφυρες, μπορεί να γίνει σε λιγότερο χρόνο και με λιγότερα χέρια μέσω απλών, διαισθητικών εντολών σε tablet ή smartphone και να εκτελεστεί από το σύστημα ρομποτικής με το πάτημα ενός κουμπιού. Με λίγες μόνο ώρες επιτόπιας εκπαίδευσης

και σκίασης χειριστών Icon στο χώρο, οι Πεζοναύτες ανέλαβαν τον κύριο χειριστή του εξοπλισμού από την αρχή μέχρι το τέλος κατά την εκτύπωση. Υπάρχουν εμπορικές τεχνολογίες που παρέχουν εξαιρετικές δυνατότητες σε ό,τι αφορά τη ρομποτική κατασκευή, λίγες όμως είναι αυτές που επιτρέπουν την κατασκευή από μη εξειδικευμένο, στην τεχνολογία, προσωπικό, κάτι που στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε με απόλυτη επιτυχία (Cottinham, 2021).

Το Σώμα Πεζοναυτών των ΗΠΑ εργάζεται εδώ και χρόνια για να αξιοποιήσει την προσθετική κατασκευή σε μεγάλη κλίμακα, έτσι ώστε στο μέλλον να βελτιωθεί η δυνατότητα ταχείας κατασκευής κτιριακών δομών. Αυτό θα υποστηρίξει ταυτόχρονα στρατιωτικές επιχειρήσεις και προσπάθειες αντιμετώπισης κρίσεων σε όλο τον κόσμο.



Εικόνα 31: Η τσιμεντένια κατασκευή για την προστασία του συστήματος πολλαπλής εκτόξευσης πυραύλων (Πηγή: USMC, 2020)

Η μεταφορά της μονάδας παραγωγής στο πεδίο είναι σίγουρα ένας πιθανός τρόπος για να επιτευχθούν οι διαδικασίες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μέθοδος μεταφοράς της μονάδας είναι το βασικό ζήτημα. Η μεταφορά μέσω εμπορευματοκιβωτίων είναι μια λογική λύση, την οποία οι ένοπλες δυνάμεις των ΗΠΑ και άλλων κρατών εξετάζουν. Τον Φεβρουάριο του 2021, το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ υπέγραψε συμβόλαιο με τον κατασκευαστή τριδιάστατων εκτυπωτών μετάλλου ExOne, για την ανάπτυξη μιας φορητής μονάδας παραγωγής μήκους 40 ποδιών, η οποία θα μπορεί να αναπτυχθεί στη στεριά και στη θάλασσα. Η μονάδα 3D εκτύπωσης θα τοποθετηθεί μέσα σε ένα τυποποιημένο εμπορευματοκιβώτιο για εύκολη μεταφορά, ενώ η εταιρία αναπτύσσει επί του

παρόντος ένα αναβαθμισμένο μοντέλο εκτυπωτή, στρατιωτικών προδιαγραφών που θα ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες σε ζώνες μάχης και περιοχές αντιμετώπισης καταστροφών (Cottinham, 2021).



Εικόνα 32: Εκτέλεση της φορητής μονάδας παραγωγής πρόσθετων από την ExOne για το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ (Πηγή: ExOne, 2021)

3.2.7 Τροχοφόρα και Άρματα

Ο αμερικανικός στρατός σχεδιάζει να εκτυπώσει τριδιάστατα το κυρίως σώμα (κύτος) για οχήματα μάχης σε ένα κομμάτι. Ο μη κερδοσκοπικός οργανισμός Defense R&D Astro ιδρύθηκε τον Απρίλιο του 2021, με σκοπό την ανάπτυξη του μεγαλύτερου τριδιάστατου μεταλλικού εκτυπωτή στον κόσμο, που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μονολιθικών δομών για οχήματα. Τα παραγόμενα κύτη εκτιμάται ότι θα κοστίζουν λιγότερο, θα έχουν μικρότερο βάρος, θα κατασκευάζονται γρηγορότερα και, το πιο σημαντικό, θα είναι πιο ανθεκτικά/λειτουργικά λόγω καλύτερου σχεδιασμού (Cottinham, 2021).

Η κοινοπραξία με το εύστοχο όνομα Jointless Hull Project, περιλαμβάνει την LIFT, μια εταιρία ανάπτυξης καινοτόμων τεχνολογιών για τη βιομηχανία που εδρεύει στο Ντιτρόιτ - το ιστορικό κέντρο της αυτοκινητοβιομηχανίας στις ΗΠΑ.

Τα οχήματα μάχης με μονολιθικά κύτη δεν είναι καινούργια και έχουν αποδειχθεί ότι έχουν ανώτερη αντοχή ακόμη και με μειωμένο βάρος. Ωστόσο, οι συμβατικές διαδικασίες μηχανικής κατεργασίας δεν είναι ούτε οικονομικά αποδοτικές ούτε κατάλληλες για παραγωγή τόσο μεγάλων σε μέγεθος και γεωμετρικά πολύπλοκων μοντέλων. Όμως, με την έλευση της προσθετικής κατασκευής και την έναρξη του προγράμματος Jointless Hull Program, ενδέχεται να αποτελέσουν ένα

σταθερό χαρακτηριστικό για τα αμερικανικά οχήματα μάχης στο εγγύς μέλλον (Cottinham, 2021).



Εικόνα 33: Το νέο ελαφρύ όχημα τακτικής σημασίας του Αμερικανικού Στρατού (Πηγή: US Army, 2021)

Πέρα των παραπάνω, ο στρατός των ΗΠΑ προσπαθεί να ενσωματώσει όσο το δυνατόν περισσότερα τριδιάστατα εξαρτήματα τιτανίου στα οχήματά του. Το στρατιωτικό όχημα NGCV (Next Generation Combat Vehicle) αποτελεί τη βάση για μια νέα οικογένεια οχημάτων που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές συγκρούσεις. Το συνολικό σχέδιο περιλαμβάνει την κατασκευή νέων οχημάτων μεταφοράς πεζικού, αρμάτων μάχης και ρομποτικών οχημάτων, τα οποία θα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δικτύου για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής τακτικών ελιγμών (Owen, 2021).

Το Εργαστήριο ‘Army Research Laboratory’ μελετά και αναπτύσσει νέα, ελαφριά αλλά και ανθεκτικά μέρη οχημάτων, όπως βραχίονες, εξαρτήματα πυργίσκων, συστήματα πρόωσης και όπλα, χρησιμοποιώντας τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, διερευνούν τη χρήση ελαφρών μετάλλων όπως τιτάνιο, κράματα τιτανίου και υβριδικά σύνθετα κεραμικών/πολυμερών.



Εικόνα 34: Το όχημα επόμενης γενιάς (NGCV) (Πηγή: Owen, 2021)



Εικόνα 35: Απόδοση των οχημάτων μάχης επόμενης γενιάς του αμερικανικού στρατού που βρίσκονται σε εξέλιξη και θα κατασκευαστούν με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής (Πηγή: gao.gov)

3.2.8 Ατομική Προστασία και Ένδυση

Η ποιότητα της στολής ενός στρατιώτη είναι εξέχουσας σημασίας, καθώς αποτελεί το βασικό μέσο μεταφοράς κάθε είδους εξοπλισμού και προστασίας μέσω της θωράκισης που παρέχει και του καμουφλάζ που διαθέτει. Επί του παρόντος, οι σχεδιαστές βασίζονται σε λογισμικό 2D CAD για να δημιουργήσουν τα σωστά

σχήματα για κάθε τμήμα της στολής, ωστόσο, στο εγγύς μέλλον η τριδιάστατη εκτύπωση πιθανότατα θα ενσωματωθεί και σε αυτή τη διαδικασία σχεδιασμού (Milkert, 2014).

Το Κέντρο NSRDEC (Natick Soldier Research, Development and Engineering Center), αποτελεί την υπηρεσία του στρατού των ΗΠΑ όπου σχεδιάζονται προϊόντα όπως ενδύματα πεδίου, καπέλα, ενδύματα μάχης, πανοπλίες σώματος και κράνη. Η Annette LaFleur, η οποία είναι επικεφαλής ομάδας στο NSRDEC και επιβλέπει πολλά έργα που σχετίζονται με την παραγωγή τέτοιων ενδυμάτων και εξοπλισμού, εκτιμά ότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους η τριδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να βοηθήσει στην παραγωγή και στη διακίνηση των ενδυμάτων και του εξοπλισμού, τόσο εντός όσο και εκτός πεδίου μάχης (Thong and Wen, 2015). Αρχικά, εκτιμάται ότι θα απαιτούνται λιγότερες ραφές συνολικά. Τα ενδύματα θα μπορούν επίσης να προσαρμοστούν ακριβώς στις διαστάσεις κάθε στρατιώτη, ενώ τα προγράμματα σχεδιασμού θα μπορούν να καθορίσουν το βέλτιστο τρόπο εκτύπωσης, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο μικρότερος δυνατός αριθμός ραφών και βελονιών. Ένα τέτοιο επίτευγμα μπορεί να φαίνεται σχετικά ασήμαντο, αλλά η άνεση ενός στρατιώτη έχει τεράστια σημασία, ειδικά κατά τη διάρκεια μακρών, σκληρών αποστολών. Άλλες πιθανές εφαρμογές αποτελούν η εκτύπωση βαλλιστικών υλικών για πανοπλία, σε ακριβή σχήματα, καθιστώντας την λιγότερο ακριβή και πιο αποτελεσματική από πλευράς προστασίας. Η ομάδα του NSRDEC χρησιμοποιεί ήδη λογισμικό CAD για διδιάστατο σχεδιασμό, οπότε μόλις ωριμάσει η τεχνολογία, θα μπορεί να ενσωματωθεί γρήγορα στη διαδικασία σχεδιασμού (Milkert, 2014).



Εικόνα 36: Annette LaFleur, επικεφαλής ομάδας για την ομάδα σχεδίου, σχεδίου και πρωτοτύπου της NSRDEC (Πηγή: 3Dprint.com, 2014)

3.2.9 Ιατρική Περίθαλψη

Στο πεδίο της μάχης υπάρχει η δυνατότητα διανομής εξοπλισμού διάσωσης και η παραγωγή ιατρικών εξαρτημάτων, μέσω της τριδιάστατης εκτύπωσης. Μπορούν να εκτυπωθούν ιατρικές προμήθειες, όπως βοηθητικοί βραχίονες, σφήνες κλπ για τους ασθενείς που πάσχουν από κάταγμα. Επίσης, μπορούν να εκτυπωθούν ειδικά γυαλιά ή γυαλιά για ασθενείς με τραυματισμένα μάτια, ειδικά παπούτσια για όσους έχουν πληγωμένα πόδια, αρθρώσεις για όσους έχουν υποστεί βλάβη της άρθρωσης κ.ο.κ. Το Υπουργείο Υποθέσεων Βετεράνων των ΗΠΑ είναι ενθουσιώδης χρήστης της τεχνολογίας τριδιάστατης εκτύπωσης. Το σχετικό δίκτυο (3D Printing Network) είναι υπεύθυνο για το συντονισμό των πρωτοβουλιών τριδιάστατης εκτύπωσης σε περισσότερες από 33 υγειονομικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις σε εθνικό επίπεδο, παράγοντας προϊόντα, όπως προσαρμοσμένες προθέσεις, οδοντιατρικά εργαλεία και ιατρικά μοντέλα. Σε μια από τις πιο πρόσφατες εφαρμογές, το Ιατρικό Κέντρο Ralph H. Johnson ζήτησε έγκριση τον Απρίλιο του 2021 από την Αμερικανική Υπηρεσία Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) για τα τριδιάστατα τυπωμένα ακουστικά βαρηκοΐας.

Σύμφωνα με τοπικά μέσα ενημέρωσης, WCSC, το κέντρο πιστεύει ότι μπορεί να παράγει δεκάδες χιλιάδες ιατρικές συσκευές κάθε χρόνο χρησιμοποιώντας τους 17 τριδιάστατους εκτυπωτές του, μόλις λάβει την έγκριση. Το νοσοκομείο είναι επίσης το πρώτο νοσοκομείο περίθαλψης βετεράνων στις ΗΠΑ που έλαβε έγκριση από τον FDA για μια τριδιάστατα εκτυπωμένη ιατρική συσκευή - ένα ακουστικό βαρηκοΐας προσαρμοσμένο σε ένα συγκεκριμένο ασθενή - βετεράνο.

Το Κέντρο, χρησιμοποιεί τεχνολογίες τριδιάστατης εκτύπωσης για προεγχειρητικό σχεδιασμό, που εκτιμάται ότι μπορεί να εξοικονομήσει έως και δύο ώρες ανά χειρουργείο ή έως και 9.600\$ λειτουργικού κόστους. Με τη βοήθεια των μοντέλων μειώνεται, επίσης, ο χρόνος που οι ασθενείς βρίσκονται υπό αναισθησία και αυξάνεται η διαθεσιμότητα του χειρουργείου για άλλους Βετεράνους.

Επιπλέον, το Ίδρυμα της Γενεύης και το Πρόγραμμα 4D Bio του πανεπιστημίου USU (Uniformed Services University), ολοκλήρωσαν ένα πιλοτικό έργο που επικεντρώθηκε στη μηχανική ιστών (tissue engineering), προσαρμοσμένη όμως στο λιτό στρατιωτικό περιβάλλον. Ο στόχος είναι η κατασκευή ιατρικών προϊόντων και η περαιτέρω έρευνα για θεραπείες επόμενης γενιάς για το προσωπικό που συμμετέχει σε δραστηριότητες πεδίου. Ενώ έχει αποδειχθεί ότι η τριδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές - από τη συντήρηση

όπλων στο πεδίο, μέχρι την παρασκευή στολών ακόμη και τροφίμων - η κατασκευή τεχνητών ιστών σε απομονωμένες περιοχές είναι μια νέα ιδέα με μεγάλη σημασία για την άμεση φροντίδα των τραυματιών ή των ασθενών.

Αυτοί οι τύποι θεραπειών, επόμενης γενιάς, σημαίνουν ότι η ειδική περίθαλψη του ασθενούς θα μπορούσε να προσφέρεται κατ' απαίτηση, ενώ βρίσκεται μακριά από οποιοδήποτε νοσοκομείο ή ιατρικό κέντρο (O'Neal, 2019b).

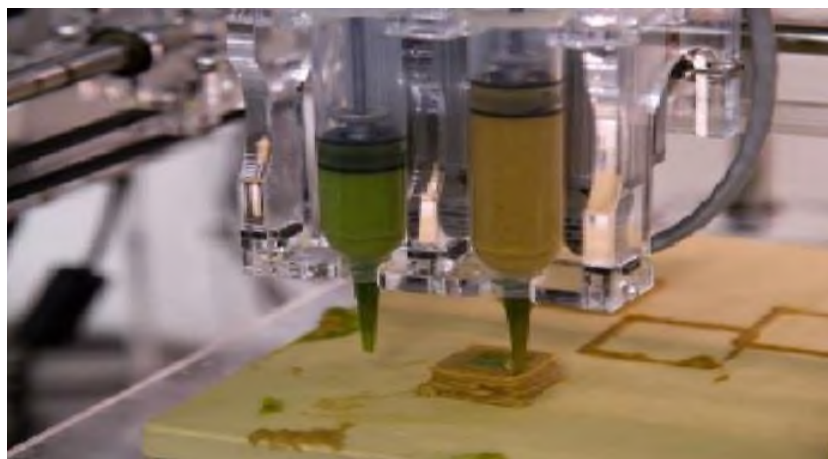


Εικόνα 37: Τριδιάστατος εκτυπωμένος επίδεσμος (Πηγή: 3DPrint.com, 2019)

3.2.10 Τριδιάστατη Εκτύπωση Τροφίμων

Το MRE (Meal Ready-to-Eat), είναι μια ολοκληρωμένη, αυτόνομη μερίδα τροφίμων που αναπτύχθηκε από τον αμερικανικό στρατό για να παρέχει θρεπτικά γεύματα στα μέλη της υπηρεσίας ενώ βρίσκονται στο πεδίο της μάχης ή σε άλλες καταστάσεις όπου δεν είναι εύκολη η προετοιμασία φαγητού. Ερευνητές από το Κέντρο Έρευνας, Ανάπτυξης και Μηχανικής του Στρατού των ΗΠΑ (NSRDEC) στο Natick της Μασαχουσέτης, υποστηρίζουν ότι πρόκειται για γεύματα τριδιάστατης εκτύπωσης, που έχουν προσαρμοστεί για κάθε στρατιώτη. (Grunewald, 2016). Οι ερευνητές του NSRDEC βρίσκονται στο πρώιμο στάδιο ανάπτυξης των MRE, τα οποία θα μπορούσαν να αλλάξουν τον τρόπο που σιτίζονται οι στρατιώτες. Συνδυάζοντας φορητή τεχνολογία ικανή να αξιολογήσει την ατομική φυσιολογία ενός στρατιώτη με τριδιάστατους εκτυπωτές τροφίμων, τα μελλοντικά MRE θα δημιουργούνται αυτόματα με βάση τις συγκεκριμένες διατροφικές ανάγκες κάθε στρατιώτη. Παρότι η ιδέα είναι σχετικά πρόσφατη, η τεχνολογία θα μπορούσε να είναι έτοιμη για ανάπτυξη, ήδη, από το 2025.

Αναμένεται, επίσης, ότι μέσα στην επόμενη δεκαετία κάθε στρατιώτης θα είναι εξοπλισμένος με φορητές συσκευές που θα παρακολουθούν τη φυσιολογία τους, καθώς και τις διατροφικές του ανάγκες. Τα δεδομένα που θα συλλέγονται θα καταγράφονται και σε καθορισμένες ώρες θα μεταφέρονται πίσω στο στρατόπεδο βάσης ή σε μια γρήγορα εγκατεστημένη κουζίνα, εξοπλισμένη με πολλούς τριδιάστατους εκτυπωτές τροφίμων. Το λογισμικό θα εξετάζει τα συλλεχθέντα δεδομένα και θα αποφασίζει αν ο στρατιώτης χρειάζεται συγκεκριμένες βιταμίνες ή θρεπτικά συστατικά για να τα συμπεριλάβει στο ατομικά προσαρμοσμένο γεύμα. Τα γεύματα θα μπορούσαν να λάβουν οποιαδήποτε μορφή επιτρέπουν τα χρησιμοποιούμενα συστατικά, ενώ οι διατροφικές αξίες μπορούν να τροποποιηθούν αυτόματα (Grunewald, 2016).



Εικόνα 38: Τρέχουσα τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης τροφίμων (Πηγή: 3Dprint.com, 2016)

Εάν ένας στρατιώτης είναι ξύπνιος για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε το γεύμα θα μπορούσε να περιλαμβάνει επιπλέον καφεΐνη ή άλλες ουσίες που προάγουν την εγρήγορση και βοηθούν στην καταπολέμηση της κόπωσης. Εάν ο στρατιώτης έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, τότε το γεύμα θα μπορούσε να προσθέσει επιπλέον θρεπτικά συστατικά για να συμπληρώσει την έλλειψη. Με έναν τριδιάστατο εκτυπωτή τροφίμων, τα όρια στη μορφή που μπορούν να πάρουν τα τρόφιμα είναι ουσιαστικά ανύπαρκτα. Ολόκληρα τα γεύματα θα μπορούσαν να εκτυπωθούν 3D ως πλήρη γεύματα, φορητές μπάρες πρωτεΐνης σοκολάτας ή ακόμη και ως υγρά γεύματα που μπορούν να καταναλωθούν γρήγορα στο πεδίο. Επειδή ένας ψηλός, μυώδης στρατιώτης μπορεί να χρειάζεται περισσότερη τροφή από έναν κοντό ή αδύνατο στρατιώτη, ο τριδιάστατος εκτυπωτής θα καθορίσει ακριβώς πόση τροφή χρειάζεται

ο καθένας, για να διατηρήσει τη βέλτιστη υγεία και απόδοση. Θα μπορούσε ακόμη και να προγραμματιστεί για να εκτυπώσει 3D το γεύμα τους ως πίτσα (Grunewald, 2016).



Εικόνα 39: Η τριδιάστατη πίτσα είναι δυνατή με τη σημερινή τεχνολογία (Πηγή: 3Dprint.com, 2016)

3.3 Χώρες που Εφαρμόζουν την Τριδιάστατη Εκτύπωση σε Στρατιωτικές Εφαρμογές

Η επέκταση της ψηφιοποίησης εισήγαγε μια νέα βάση στον κατασκευαστικό κλάδο, ο οποίος συχνά αναφέρεται ως «τέταρτη βιομηχανική επανάσταση». Η σύγκλιση ψηφιακών εφαρμογών με μεθόδους κατασκευής οδήγησε σε νέες καινοτομίες σε λογισμικό, τεχνητή νοημοσύνη, ρομποτική, νέα υλικά, τριδιάστατη εκτύπωση κλπ. Οι δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής σε όρους σχεδιασμού και ανάπτυξης είναι τεράστιες γι' αυτό και η ανάπτυξη της τεχνολογίας αποτελεί βασική προτεραιότητα στις πολιτικές καινοτομίας πολλών κορυφαίων βιομηχανικών εθνών (Panneerselvam, 2018). Ωστόσο, είναι λίγα σχετικά τα βιομηχανικά έθνη που έχουν καταφέρει να αξιοποιήσουν τους δεσμούς μεταξύ ψηφιοποίησης και κατασκευής, τόσο θεωρητικά όσο και στατιστικά. Οι ΗΠΑ, η Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιαπωνία, η Κίνα και η Νότια Κορέα είναι κάποιες από τις χώρες με το μεγαλύτερο αριθμό διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας που σχετίζονται με αυτή η τεχνολογία, και είναι συνεπώς σε θέση να επωφεληθούν από τη σχετική αγορά όπως συζητείται παρακάτω:

ΗΠΑ

Οι ΗΠΑ είναι κυρίαρχος παίκτης, όπως είδαμε και παραπάνω, στην τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής. Ο πρώην πρόεδρος των ΗΠΑ, Μπαράκ Ομπάμα, ενώ εγκαινίαζε το Εθνικό Ινστιτούτο Καινοτομίας Προσθετικής Κατασκευής (National Additive Manufacturing Innovation Institute - NAMII) το 2012, ανακοίνωσε με σαφήνεια τη στρατηγική της χώρας όσον αφορά την τεχνολογία της τριδιάστατης εκτύπωσης. Το NAMII ιδρύθηκε από μια κοινοπραξία του Εθνικού Κέντρου για Αμυντική Παραγωγή και Κατεργασία (National Center for Defense Manufacturing and Machining - NCDMM) με το στόχο την επιτάχυνση της ανάπτυξης των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής και την αύξηση της ανταγωνιστικότητας της εγχώριας παραγωγής. Από τον Φεβρουάριο 2016, υλοποιήθηκαν 31 βιομηχανικά και 58 ερευνητικά έργα, που σχετίζονται με στρατιωτικές εφαρμογές. Αυτές οι κινήσεις έχουν παρακινήσει έναν σημαντικό αριθμό ιδιωτών ώστε να επενδύσουν σε κέντρα έρευνας και ανάπτυξης προσθετικών κατασκευών (Panneerselvam, 2018).

Γερμανία

Η έκθεση της επιτροπής εμπειρογνομόνων της Γερμανικής ομοσπονδιακής κυβέρνησης, για την έρευνα, την καινοτομία και την τεχνολογική ανάπτυξη (Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands, 2015), περιέχει ένα κεφάλαιο ειδικά αφιερωμένο στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, υπογραμμίζοντας έτσι τη σημασία της για τον κατασκευαστικό κλάδο. Βασισμένο στις συστάσεις της επιτροπής, το Ομοσπονδιακό Υπουργείο Οικονομικών Υποθέσεων και Ενέργειας προωθεί κατά προτεραιότητα τη ψηφιοποίηση στον κατασκευαστικό κλάδο. Το σχετικό πρόγραμμα δράσης που ονομάζεται «Ψηφιακή Στρατηγική 2025» και έχει στόχο τη μετατροπή της στρατηγικής σε πραγματικότητα. Μέχρι τώρα, οι γερμανικές εταιρείες χρησιμοποιούν τεχνολογίες τριδιάστατης εκτύπωσης, κυρίως για πρωτότυπα και βασικές τεχνολογικές δοκιμές. Η έκθεση του υπουργείου αναφέρει ότι η ταχεία κατασκευή με μεταλλική προσθετική κατασκευή κερδίζει έδαφος μεταξύ πολλών Γερμανών κατασκευαστών.

Ηνωμένο Βασίλειο

Η αναφορά της Ομάδας Ειδικού Ενδιαφέροντος (Special interest Group-SIG) στην έκθεση του 2012 σχετικά με την εθνική επάρκεια στην προσθετική κατασκευή θέτει σαφώς το πλαίσιο συζήτησης για την τεχνολογία στο Ηνωμένο Βασίλειο. Με βάση τις σχετικές εκθέσεις, η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου προχώρησε σε διπλασιασμό της εθνικής χρηματοδότησης για σχετική έρευνα (περίπου 40 εκατομμύρια δολάρια το 2015). Ο αριθμός των ερευνητικών οργανισμών διπλασιάστηκε επίσης κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Το μεγαλύτερο ποσοστό χρηματοδότησης αφορά στη σύμπραξη πανεπιστημίων - βιομηχανίας και άλλων οργανισμών που δραστηριοποιούνται ερευνητικά στην προσθετική κατασκευή (Panneerselvam, 2018).

Ιαπωνία

Στην Ασία, οικονομικοί γίγαντες, όπως η Ιαπωνία, η Κίνα και η Νότια Κορέα, κάνουν άλματα στην τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής. Η έκθεση του IHS Market Insight αναφέρει ότι η Ασία επενδύει σημαντικά στην τεχνολογία της τριδιάστατης εκτύπωσης. Αυτή η περιφερειακή ανάπτυξη είναι πιθανό να προκαλέσει έντονο ανταγωνισμό μεταξύ Ιαπωνίας, Κίνας και Νότιας Κορέας. Η Ιαπωνία διέθεσε 4 δισεκατομμύρια γιεν (38,6 εκατομμύρια δολάρια) για διάφορα εθνικά έργα σχετικά με τριδιάστατη εκτύπωση. Το Υπουργείο Οικονομίας, Εμπορίου και Βιομηχανίας της Ιαπωνίας επεσήμανε ότι το οικονομικό αποτέλεσμα της επίδρασης της τριδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να είναι περίπου 21,8 τρισεκατομμύρια γιεν από το 2020. Η Ιαπωνία θέλει να αξιοποιήσει αυτή την ευκαιρία για να αυξήσει την τεχνολογική της υπεροχή σε σχέση με τις ΗΠΑ και τη Γερμανία (Panneerselvam, 2018).

Κίνα

Η κινεζική κυβέρνηση ανακοίνωσε το πρώτο της εθνικό σχέδιο για την τεχνολογία (Σχέδιο Προώθησης της «Βιομηχανίας Προσθετικής Κατασκευής») την περίοδο 2015 – 2016. Ο σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα μέσο - μακροπρόθεσμο σχέδιο ανάπτυξης της τεχνολογίας. Στο Συμβούλιο της Επικρατείας το 2015, ο Κινέζος πρωθυπουργός Λι Κετσιάνγκ τόνισε ότι η «ανάπτυξη των τεχνολογιών

τριδιάστατης εκτύπωσης πρέπει να αποτελεί μέρος μιας συνολικότερης προσπάθειας για τον εκσυγχρονισμό της οικονομίας της Κίνας». Όσον αφορά την έρευνα, στην Κίνα δραστηριοποιούνται πάνω από 10 μεγάλες ερευνητικές ομάδες και εταιρείες, που υλοποιούν σημαντική έρευνα στην προσθετική κατασκευή. Η Κίνα ανήκει, επίσης, στις χώρες που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν αεροδιαστημικά εξαρτήματα χρησιμοποιώντας τριδιάστατη εκτύπωση (Panneerselvam, 2018).

Νότια Κορέα

Η Νότια Κορέα, μια οικονομία με ισχυρά εξαγωγικά χαρακτηριστικά, ανακοίνωσε το 2014 ένα σχέδιο για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής στον κατασκευαστικό κλάδο. Συγκεκριμένα, η κυβέρνηση της Κορέας ανακοίνωσε τη δημιουργία του Συμβουλίου Ανάπτυξης της «Βιομηχανίας Τριδιάστατων Εκτυπώσεων», με στόχο να βάλει τη χώρα στην πρώτη γραμμή του νέου αυτού κλάδου. Το γενικό σχέδιο περιλάμβανε την ενίσχυση της βιομηχανίας, καθώς και την εκπαίδευση 10 εκατομμυρίων επαγγελματιών και επιχειρηματιών στην τριδιάστατη εκτύπωση. Το 2016, ανακοινώθηκε η υλοποίηση ενός ερευνητικού έργου για τριδιάστατα τυπωμένα πλοία, ύψους 20 εκατομμυρίων δολαρίων, καθώς η Νότια Κορέα φιλοξενεί μερικές από τις μεγαλύτερες ναυπηγικές επιχειρήσεις, οι οποίες εξετάζουν έντονα την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής ως βασική για μελλοντικές καινοτομίες (Panneerselvam, 2018).

Γαλλία

Ο γαλλικός στρατός συνεργάστηκε πρόσφατα με την HAVA3D, μια γνωστή επιχείρηση παροχής εξοπλισμού και υπηρεσιών προσθετικής κατασκευής με έδρα το Le Mans, έτσι ώστε να αναπτύξει ένα από τα μεγαλύτερα στρατιωτικά εργαστήρια τριδιάστατης εκτύπωσης στην Ευρώπη.

Μια μονάδα, 50 τριδιάστατων εκτυπωτών έχει αναπτυχθεί στο Bourges για την Ecole Militaires de Bourges (EMB), μια στρατιωτική μονάδα που ειδικεύεται στη διαχείριση υλικών και εφοδιαστικής αλυσίδας. Η μονάδα των εκτυπωτών αναπτύχθηκε τον Απρίλιο 2020, στο πλαίσιο της πανδημίας COVID-19 και δοκιμάστηκε από πλευράς αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας σε ότι αφορά στις απαιτήσεις στρατιωτικής παραγωγής. Η πανδημία είχε κλείσει ή επιβαρύνει τις

τυπικές οδούς εφοδιασμού, ιδιαίτερα σε διεθνείς στρατιωτικές επιχειρήσεις, και έτσι τα εξαρτήματα που απαιτούνται για την επιτόπια επισκευή και συντήρηση συστημάτων ή οχημάτων αποτέλεσαν το επίκεντρο των δοκιμών. Εξηγώντας την προσέγγισή τους, ο Στρατηγός του Γαλλικού Στρατού Philippe Baldi ανέφερε πώς η παραγωγή είχε μετατοπιστεί στην κατασκευή των σχετικών εξαρτημάτων για εξωτερικές επιχειρήσεις, και για αυτό ο Στρατός αποφάσισε να αποκτήσει την ικανότητα ταχείας μαζικής παραγωγής των απαιτούμενων ανταλλακτικών συντήρησης (Tampri, 2020).

Αυτή η στροφή επιταχύνθηκε σε μεγάλο βαθμό από τον αντίκτυπο της πανδημίας, με τους προμηθευτές του στρατού να διακόπτουν τη λειτουργία τους ή να λειτουργούν με μειωμένη δυναμικότητα λόγω της κρίσης, αναγκάζοντας τον Στρατό να προσαρμοστεί, εν μέρει εκπαιδύοντας το προσωπικό του στη χρήση τριδιάστατης εκτύπωσης για τρέχουσες επιχειρήσεις, όπως στο Μάλι και στο Λίβανο, όπου ο εξοπλισμός ή τα υλικά επηρεάζονται από ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτό όχι μόνο παρέχει στον Στρατό ευελιξία στην αλυσίδα εφοδιασμού του, ειδικά σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, αλλά μειώνει και το κόστος ανάπτυξης ή μεταφοράς. Τον Ιούνιο 2020, ο γαλλικός στρατός προμηθεύτηκε και ενσωμάτωσε επίσης δυο ακόμα τριδιάστατους εκτυπωτές ProMaker P1000, για χρήση στην κατασκευή πλαστικών εξαρτημάτων υψηλής απόδοσης για στρατιωτική χρήση σε πραγματικές συνθήκες.



Εικόνα 40: Τριδιάστατη εκτύπωση σε εργαστήριο του στρατού της Γαλλίας (Πηγή: 3DPrint ,2020)

Η τριδιάστατη εκτύπωση παρέχει επίσης μια αποτελεσματική λύση για την παράταση της διάρκειας ζωής του παλαιού εξοπλισμού, για τον οποίο είναι δύσκολο να αποκτηθούν ανταλλακτικά, όπως για την παραγωγή ελαφρύτερου εξοπλισμού από σύνθετα υλικά. Ο γαλλικός στρατός έχει ήδη χρησιμοποιήσει επαγγελματικούς τριδιάστατους εκτυπωτές για την παραγωγή εξαρτημάτων προστασίας και σφράγισης, καθώς και διαφόρων άλλων εξαρτημάτων, όπως εξαρτήματα οπτικών συστημάτων και διακόπτες οχημάτων.

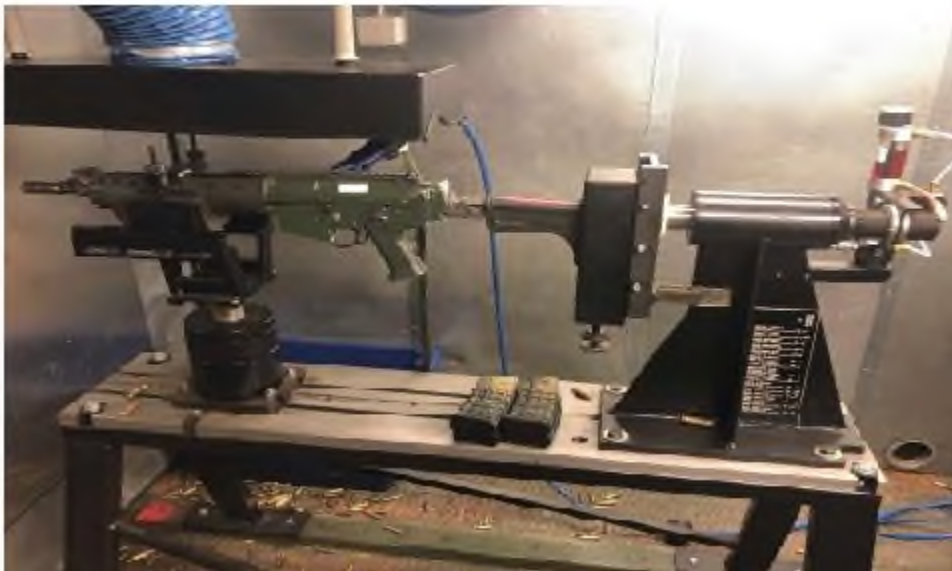
Σουηδία

Μια φοιτήτρια, η Emmelie Simic από τη Σουηδία διερεύνησε τη σκοπιμότητα χρήσης τεχνολογίας τριδιάστατης εκτύπωσης από τις σουηδικές δυνάμεις που δραστηριοποιούνταν σε περιοχές όπως το Μάλι ή το Αφγανιστάν και συγκεκριμένα τη δυνατότητα κατασκευής ανταλλακτικών για επιτόπια επισκευή και συντήρηση του τυφεκίου επίθεσης AK5C (O'Neal, 2019a).

Στη μελέτη επισημαίνεται ότι η Σουηδική Διοίκηση Αμυντικού Υλικού, που είναι υπεύθυνη για τον εφοδιασμό των ενόπλων δυνάμεών τους με υλικό, εκτιμά ότι η τριδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξοικονόμηση πόρων. Αντίστοιχα οφέλη εκτιμά και ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Άμυνας λόγω της εκτιμώμενης δυνατότητας για μεγαλύτερη κινητικότητα, βιωσιμότητα, ισχύ και προστασία. Με την ευκολία στην κατασκευή ανταλλακτικών κατ' απαίτηση που προσφέρει η τριδιάστατη εκτύπωση, οι σουηδικές ένοπλες δυνάμεις θα μπορούσαν να ωφεληθούν σημαντικά στη συντήρηση πολλών διαφορετικών τύπων εξοπλισμού - από σκάφη και αεροπλάνα έως πυρομαχικά. Πολλά συστήματα μπορεί επίσης να είναι τόσο παλιά, ώστε τα ανταλλακτικά να είναι δυσεύρετα ή εντελώς παρωχημένα, πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ένοπλες δυνάμεις παγκοσμίως.

Η Simic επέλεξε το τυφέκιο επιλογής για τους Σουηδούς, το AK5C, ως ένα εξαιρετικό παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο η τριδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί προς όφελος του στρατού. Αυτό το όπλο έχει και ημιαυτόματη και αυτόματη λειτουργία και κάθε ρύθμιση επηρεάζει διαφορετικά το τυφέκιο. Τα σχετικά μεταλλικά εξαρτήματα κατασκευάστηκαν από την Lasertech LSH AB, με τη μέθοδο DLMS (σύστημα EOS M 290), ενώ η τεχνική SLS (σύστημα EOS P 395) χρησιμοποιήθηκε για πλαστικά μέρη. Τα αποτελέσματα των δοκιμών

λειτουργίας έδειξαν ότι οι διαδικασίες τριδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία, με κάποιες μικρές προσαρμογές στο σχέδιο κάποιων εξαρτημάτων και τη βελτίωση των σχετικών υλικών. Περαιτέρω δοκιμές απαιτούνται, φυσικά, για την πληρέστερη αξιολόγηση των παραγόμενων τυφεκίων και την οικονομική αποτίμηση της εφαρμογής.



Εικόνα 41: Ο χώρος δοκιμών εκτύπωσης για το τυφέκιο της Σουηδίας AK5C (Πηγή: 3DPrint.com, 2019)

Κεφάλαιο 4: Βασικά Οφέλη από τη Χρήση Τριδιάστατης Εκτύπωσης στην Αμυντική Βιομηχανία

Η προσθετική κατασκευή μπορεί να ξεκλειδώσει μια σειρά από ευκαιρίες για την αμυντική βιομηχανία, τουλάχιστον μειωμένο κόστος παραγωγής εργαλείων και εξαρτημάτων, προσθετική ευελιξία σχεδιασμού και τοπική κατασκευή. Ταυτόχρονα, η προσθετική κατασκευή μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη συντήρηση των στρατιωτικών συστημάτων μέσω της παραγωγής ανταλλακτικών ή παρωχημένων ανταλλακτικών.

Η αμυντική βιομηχανία είναι από τους κύριους συντελεστές στη συνεχιζόμενη ανάπτυξη τεχνολογιών και υλικών ΑΜ. Ο προτεινόμενος στρατιωτικός προϋπολογισμός των ΗΠΑ για το 2018, για παράδειγμα, περιλάμβανε μια επένδυση της τάξεως των 13,2 δισεκατομμυρίων δολλαρίων, στην τεχνολογική καινοτομία. Αυτό περιλαμβάνει προσθετική υποστήριξη για την παραγωγή προσθέτων στο Υπουργείο Άμυνας, ένας σαφής δείκτης του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τις δυνατότητες της τριδιάστατης εκτύπωσης για αμυντικές εφαρμογές. Τα βασικότερα οφέλη από τη χρήση της τριδιάστατης εκτύπωσης στην αμυντική βιομηχανία είναι τα εξής:

Ταχύτερη ανάπτυξη προϊόντων

Η προσθετική κατασκευή επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία σχεδιασμού, καθώς δεν απαιτεί εργαλεία. Αντίθετα, η παραδοσιακή κατασκευή μπορεί να πάρει μήνες για να παράγει τα απαραίτητα εργαλεία για τη δημιουργία τελικών εξαρτημάτων και πρωτοτύπων. Η αμυντική βιομηχανία μπορεί επομένως να εκμεταλλευτεί την τεχνολογία για να παρακάμψει τα δαπανηρά και χρονοβόρα εργαλεία, μειώνοντας έτσι τον χρόνο που απαιτείται για την ανάπτυξη προϊόντων.

Ελευθερία σχεδίασης

Η αμυντική βιομηχανία μπορεί επίσης να αξιοποιήσει την ικανότητα της τριδιάστατης εκτύπωσης να παράγει αντικείμενα ελεύθερης μορφής βελτιστοποιημένα. Αυτό σημαίνει ότι το βάρος ενός εξαρτήματος μπορεί να μειωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας προσθετική κατασκευή, εξοικονομώντας κόστος υλικού και χρόνο παραγωγής. Αξιοποιώντας προηγμένα εργαλεία σχεδιασμού, οι μηχανικοί

σχεδιασμού μπορούν να μειώσουν τον αριθμό των εξαρτημάτων σε ένα συγκρότημα σε ένα μόνο, και έτσι να απλοποιήσουν σημαντικά τη διαδικασία συναρμολόγησης.

Εξατομικευμένος εξοπλισμός

Όχι μόνο η τριδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει περισσότερη ελευθερία σχεδιασμού, αλλά προσφέρει επίσης τη δυνατότητα δημιουργίας προσαρμοσμένων τμημάτων, προσαρμοσμένων για συγκεκριμένες λειτουργίες. Αντί να μεταφέρουν εξαρτήματα και κομμάτια για όλες τις πιθανές διαμορφώσεις, οι στρατιώτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν συστήματα τριδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή εξαρτημάτων κατόπιν παραγγελίας. Για παράδειγμα, οι ερευνητές στον αμερικανικό στρατό μπορούν τώρα να εκτυπώσουν τριδιάστατα προσαρμοσμένα αεροσκάφη μη επανδρωμένα, προσαρμοσμένα στις συγκεκριμένες ανάγκες μιας δεδομένης αποστολής. Τα προσαρμόσιμα τριδιάστατα εκτυπώσιμα σχέδια είναι συνεπώς ζωτικής σημασίας για την επίτευξη μεγαλύτερων επιπέδων ευελιξίας και ευελιξίας στο στρατό.

Τοπική παραγωγή και κατ'απαίτηση παραγωγή

Ο συντονισμός της εφοδιαστικής και των μεταφορών αποτελεί σημαντικό μέρος κάθε στρατιωτικού προϋπολογισμού. Για μια βιομηχανία που ξοδεύει δισεκατομμύρια δολάρια μόνο για την εφοδιαστική (το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ, για παράδειγμα, εκτιμάται ότι έχει δαπανήσει 1,194 δισεκατομμύρια δολάρια σε επιχειρήσεις εφοδιαστικής το 2017), μπορεί να αποδειχθεί πιο αποδοτικό για την εκτύπωση προσαρμοσμένων εξαρτημάτων, εργαλεία και ανταλλακτικά κοντά στο σημείο χρήσης - μια λύση που παρέχει η προσθετική κατασκευή.

Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι οι στρατιώτες σε απομακρυσμένες περιοχές μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν την τριδιάστατη εκτύπωση προς όφελός τους. Αυτό έχει ήδη δοκιμαστεί σε κάποιο βαθμό: το 2012, ο αμερικανικός στρατός χρησιμοποίησε μια εγκατάσταση παραγωγής πρόσθετων στο Αφγανιστάν για να εκτυπώσει ανταλλακτικά πολύ πιο γρήγορα από την προμήθειά τους.

Κεφάλαιο 5: Προσθετική Κατασκευή και Εφοδιαστική Αλυσίδα

5.1 Γενικά

Η τριδιάστατη εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει σημαντικά την αλυσίδα εφοδιασμού του στρατού: μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος, τους χρόνους παράδοσης και τα επίπεδα αποθέματος. Μερικοί μάλιστα λένε ότι καθώς βελτιώνεται η τεχνολογία, θα διαταραχθεί το Στρατιωτικό-Βιομηχανικό συγκρότημα. Ας πάρουμε για παράδειγμα, τη χώρα με το μεγαλύτερο οργανισμό logistics σε θέματα άμυνας, τις ΗΠΑ.

Με περίπου 5 εκατομμύρια διακριτά αναλώσιμα, αναλώσιμα και επισκευάσιμα αγαθά» που διανέμονται παγκοσμίως, ο Οργανισμός Αμυντικών Logistics του αμερικανικού στρατού (Defense Logistics Agency-DLA) είναι ένας από τους πιο πολύπλοκους οργανισμούς εφοδιαστικής αλυσίδας στον κόσμο. Σύμφωνα με τον ιστότοπό τους, παρέχουν περισσότερα από 34 δισεκατομμύρια δολάρια σε αγαθά και υπηρεσίες (*Defense Logistics Agency Fact Sheet*, 2017). Από το 2005 έως το 2013, η DLA διέθεσε κατά μέσο όρο πάνω από 1 δισεκατομμύριο δολάρια σε αντικείμενα ετησίως (Peltz *et al.*, 2015). Ο DLA πρέπει να διατηρεί αποθέματα όλων των ειδών και ορισμένα στοιχεία είναι δύσκολο να προβλεφθούν εάν θα χρησιμοποιηθούν ποτέ. Λόγω της πολυπλοκότητάς του, είναι σημαντικό για τους φορολογούμενους να γνωρίζουν πώς αντιμετωπίζουν οι ένοπλες υπηρεσίες αυτά τα ζητήματα και πώς μπορούν να επωφεληθούν στην ψηφιακή εποχή για να λάβουν καλύτερες αποφάσεις και να έχουν ένα πιο ευέλικτο και λιτό δίκτυο αποθήκευσης και προμηθειών.

Σύμφωνα με το Στρατηγικό Σχέδιο του DLA (2015-2022): «η υλοποίηση ρομποτικών τεχνολογιών, η αυτοματοποίηση στις λειτουργίες διανομής και η τριδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων που είναι δύσκολο να προέλθουν και μεγάλης διάρκειας, θα ενισχύσουν τις δυνατότητες υποστήριξης logistics και θα παράγουν πιο αξιόπιστο, αποτελεσματικές λύσεις » (*“Defense Logistics Agency: Strategic Plan 2015-2022”*., 2015). Για το σκοπό αυτό, ο DLA έχει αναλάβει αρκετές πρωτοβουλίες για να δημιουργήσει μια πιο ευέλικτη αλυσίδα εφοδιασμού και να ανταποκριθεί περισσότερο στον πρώτο στόχο στο στρατηγικό σχέδιο: "Πρώτα Warfighter".

Ο DLA σχεδιάζει να συνεχίσει να πειραματίζεται με νέους τρόπους εφαρμογής της τεχνολογίας τριδιάστατης εκτύπωσης. Το Κέντρο Ερευνών Στρατού (Army research Lab-ARL) έχει πειραματιστεί με τριδιάστατα όπλα εκτύπωσης και δημιουργεί προσαρμοσμένα UAV (τετρακόπτερα) εν κινήσει και προσαρμοσμένα για τη συγκεκριμένη αποστολή. Το Κέντρο τριδιάστατης εκτύπωσης του ARL διαθέτει δύο συστήματα για πρωτότυπα και τέσσερα φορητά συστήματα για χρήση στο πεδίο (Rodríguez, 2017). Το 2012, άρχισαν να αναπτύσσουν εκστρατευτικά εργαστήρια που περιέχουν τριδιάστατους εκτυπωτές, σταθμούς εργασίας CAD και υλικά εκτύπωσης. Στο μέλλον, πιο πολύπλοκες τριδιάστατες εγκαταστάσεις εκτύπωσης θα αναπτυχθούν στο πεδίο και τα διαθέσιμα σχέδια θα αυξηθούν καθώς ο DLA δημιουργεί «μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία για τον εντοπισμό τμημάτων που είναι κατάλληλα για πρόσθετες κατασκευές». Αυτές οι πρωτοβουλίες θα συμπιέσουν πολύ την αλυσίδα εφοδιασμού για ανταλλακτικά και θα επιτρέψουν στον DLA να έχει πραγματικό απόθεμα εγκαίρως (Rodríguez, 2017).

5.2 Το Μέλλον της Προσθετικής Κατασκευής για τις Ένοπλες Δυνάμεις

Με την τριδιάστατη εκτύπωση μεταλλικών εξαρτημάτων από απόσταση, οι ένοπλες δυνάμεις ανά τον κόσμο στοχεύουν στη μείωση της πίεσης στην αλυσίδα logistics του στρατού. Αντί να ζητήσουν ανταλλακτικό από χιλιάδες μίλια μακριά, τα στρατεύματα θα μπορούσαν να το εκτυπώσουν και να θέσουν ξανά σε λειτουργία ένα όχημα πολύ πιο γρήγορα και με ένα κλάσμα του κόστους. Αντί να μεταφέρει φορητά ανταλλακτικά, συμπεριλαμβανομένων φορτίων συνοδείας, το μόνο που χρειάζεται μια μονάδα είναι ένας τριδιάστατος εκτυπωτής και πρώτες ύλες (Busachi *et al.*, 2018).

Ο αμερικανικός στρατός ακολουθεί τα βήματα του γαλλικού στρατού, ο οποίος χρησιμοποιεί ήδη τριδιάστατους εκτυπωτές Formlabs και Ultimaker για την παραγωγή ανταλλακτικών όπως προστατευτικά κελύφη, ατράκτους και ανταλλακτικά οπτικών. Με αυτόν τον τρόπο, επιταχύνουν την αλυσίδα εφοδιασμού και μειώνουν το κόστος μεταφοράς (Taylor-Smith, 2020).

Οι ακαδημαϊκοί ερευνητές, σε συνεργασία με τον Αμερικανικό Στρατό εργάζονται σε κράματα νικελίου-τιτανίου που μοντελοποιούν το AF96 και άλλα κράματα για την παραγωγή υλικών υψηλής απόδοσης που θα είναι ισχυρότερα και πιο ανθεκτικά στη θερμότητα. Το ARL είχε χρηματοδοτήσει δύο έργα τριδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων. Το πρώτο θα χρησιμοποιήσει κάμερες υπερύθρων για να αναπτύξει ένα έξυπνο σύστημα για την παρακολούθηση και αυτόματη διόρθωση διαδικασιών που βασίζονται στη σύντηξη σκόνης για να αποφευχθούν ελαττώματα και να γίνουν διορθώσεις σε πραγματικό χρόνο. Το δεύτερο επιδιώκει να ενισχύσει τις μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών μερών μέσω επικαλύψεων νιτριδίων. Η διαδικασία νιτρίωσης θα συμβεί κατά τη διάρκεια της εργασίας εκτύπωσης για να προσαρμόσει τη μικροδομή του εξαρτήματος για βέλτιστη χρήση .

Η τριδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μια λύση για την παραγωγή ανταλλακτικών και τη διευκόλυνση της εφοδιαστικής αλυσίδας, ενώ η διαδικασία επιτρέπει επίσης την ταχεία πρωτοτυπία και κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων τελικής χρήσης (Boer, Lambrechts and Krikke, 2020). Αξιοποιεί με τον καλύτερο τρόπο τα διαθέσιμα υλικά μέσω προγραμμάτων ανακύκλωσης, μερικά από τα οποία ήδη λειτουργούν σε στρατιωτικές βάσεις των ΗΠΑ. Η τριδιάστατη εκτύπωση μπορεί επίσης να συμβάλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής του παλαιού εξοπλισμού, συντομεύοντας την αλυσίδα εφοδιασμού στον κατασκευαστή, ο οποίος μπορεί να μην έχει πλέον ανταλλακτικά (Balistreri, 2015). Αυτά τα μέρη μπορεί να ζυγίζουν λιγότερο χάρη στα σύνθετα υλικά και να μειώνουν το βάρος των οπλικών συστημάτων, πράγμα που σημαίνει ότι η μονάδα στο σύνολό της είναι ελαφρύτερη και μπορεί να κινηθεί γρηγορότερα. Υπάρχουν πολλά οφέλη από τη χρήση της τριδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή μεταλλικών μερών που θα χρησιμοποιηθούν στα επίγεια οχήματα του στρατού (Antill and Smith, 2017). Η δυνατότητα εκτύπωσης κατ' απαίτηση σημαίνει ότι πρέπει να μεταφερθούν λιγότερα ανταλλακτικά, μειώνοντας το φορτίο στις αλυσίδες logistics, μειώνοντας το κόστος και επιτρέποντας στις μονάδες να κινούνται γρηγορότερα.

5.3 Προκλήσεις

Οι προκλήσεις (Boer, Lambrechts and Krikke, 2020) που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι:

Διασφάλιση ποιότητας

Παρόλο που τα στρατιωτικά πρωτότυπα μπορούν να εκτυπωθούν 3D γρήγορα και φθηνά, η ευρύτερη εφαρμογή της προσθετικής κατασκευής για την παραγωγή τελικών εξαρτημάτων εξακολουθεί να αντιμετωπίζει μια σειρά προκλήσεων.

Ένα από τα κύρια ζητήματα για την αμυντική βιομηχανία είναι η διασφάλιση ποιότητας, καθώς όλα τα μέρη πρέπει να τηρούν αυστηρές απαιτήσεις απόδοσης. Πριν η προσθετική κατασκευή μπορεί να ενσωματωθεί περαιτέρω στην παραγωγή τελικών εξαρτημάτων, ο Στρατός πρέπει να είναι σίγουρος για την επαναληψιμότητα και την ακρίβεια της διαδικασίας παραγωγής AM. Επί του παρόντος δεν υπάρχουν πλήρως καθορισμένα βιομηχανικά πρότυπα για τριδιάστατα τυπωμένα εξαρτήματα στην αμυντική βιομηχανία. Είναι ζωτικής σημασίας να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο προτύπων που θα διέπουν τις διαδικασίες τριδιάστατης εκτύπωσης και θα πληρούν τα κριτήρια για τα εκτυπωμένα κομμάτια.

Το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ έχει ήδη αναπτύξει έναν οδικό χάρτη για την εφαρμογή της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, ο οποίος πρόκειται να επιτρέψει ακόμη μεγαλύτερη ενσωμάτωση της τεχνολογίας σε στρατιωτικές εφαρμογές. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο είναι ζωτικής σημασίας και το λογισμικό αυτοματισμού, για να διασφαλιστεί ότι η διαδικασία παραγωγής παραμένει ευκρινής, αξιόπιστη, καθώς και ότι αντιμετωπίζει ολοκληρωμένα τα σχετικά θέματα διαχείρισης.

Χάσμα δεξιοτήτων

Παρόλο που η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται στην αμυντική βιομηχανία για αρκετά χρόνια, παραμένει ένα κενό δεξιοτήτων από πλευράς προσωπικού. Αυτή η έλλειψη δεξιοτήτων εμποδίζει την απελευθέρωση του πλήρους δυναμικού της τεχνολογίας σε στρατιωτικές εφαρμογές. Η περαιτέρω εκπαίδευση στις ιδιαιτερότητες της προσθετικής κατασκευής, στον σχεδιασμό για προσθετική κατασκευή, στη συντήρηση του σχετικού εξοπλισμού και στη διαχείριση της

ιδιαίτερης αλυσίδας εφοδιασμού είναι απαραίτητα για να επεκταθεί η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας στο στρατό.

Ψηφιακή ασφάλεια

Εάν ο στρατός πρόκειται να χρησιμοποιήσει συστήματα προσθετικής κατασκευής για κατά παραγγελία, τοπική παραγωγή, καθίσταται ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί η ασφάλεια των ψηφιακών αρχείων CAD. Αυτό θα απαιτήσει πρόσθετα ψηφιακά μέτρα ασφαλείας για να διασφαλιστεί ότι δεν είναι δυνατή η εξωτερική πρόσβαση στα αρχεία και ότι οι ψηφιακές αλυσίδες εφοδιασμού παραμένουν ασφαλείς.

Ειδικά σε θέματα ασφαλείας υπάρχουν αναφορές του Στρατού των ΗΠΑ που επισημαίνουν ότι οι εγκαταστάσεις τριδιάστατης εκτύπωσης δεν προστατεύονται επαρκώς από χάκερ, που θα μπορούσαν να κλέψουν σχέδια άμυνας ή να σαμποτάρουν εξαρτήματα (Tritten, 2021). Σύμφωνα με τις σχετικές αναφορές, πέντε στρατιωτικοί ιστότοποι που εκτυπώνουν, δεν εξέτασαν με συνέπεια τους κινδύνους για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο ή τα ασφαλή συστήματα και διέθεταν ξεπερασμένες εκδόσεις των Windows της Microsoft. Τα τρωτά σημεία "θα μπορούσαν να επιτρέψουν σε έναν αντίπαλο να αντιγράψει κάποια εξαρτήματα και να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία προς όφελός του. Επίσης, εάν οι κακόβουλοι παράγοντες αλλάξουν τα βασικά δεδομένα σχεδιασμού, οι αλλαγές θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τελική ισχύ και τη χρησιμότητα των προϊόντων αυτών. Οι ανησυχίες σχετικά με τα τρωτά σημεία της προσθετικής κατασκευής έρχονται καθώς οι κυβερνητικές υπηρεσίες και εταιρείες των ΗΠΑ απειλούνται όλο και περισσότερο από κυβερνοεπιθέσεις και λογισμικό τύπου ransomware. Οι χρήστες των συστημάτων τριδιάστατης εκτύπωσης του Υπουργείου Άμυνας τα θεώρησαν ως «εργαλεία» για την κατασκευή εξαρτημάτων αντί για συστήματα ψηφιακής τεχνολογίας που απαιτούν συστήματα προστασίας και ελέγχου ασφαλείας. Κατά συνέπεια, τα συστήματα δεν ενημερώνονταν τακτικά, ενώ 35 από τα 46 συνολικά συστήματα τριδιάστατης εκτύπωσης δεν λειτουργούσαν με Windows 10, όπως απαιτείται από το 2016. Ενδεικτικά του κινδύνου αναφέρεται ότι, το 2019, η Microsoft εξέδωσε πάνω από 197 ενημερώσεις λειτουργικού συστήματος για να διορθώσει τα τρωτά σημεία ασφαλείας. Μια από αυτές διόρθωνε ένα ζήτημα ευπάθειας που επέτρεπε στους εισβολείς να αποκτήσουν μη εξουσιοδοτημένη

πρόσβαση σε έναν υπολογιστή και στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν αυτήν την πρόσβαση για να συνδεθούν σε άλλους υπολογιστές. Με βάση την παραπάνω αναφορά, συμφωνήθηκε όλα τα σώματα ασφαλείας των ενόπλων δυνάμεων να αξιολογήσουν εκ νέου τις γενικές συστάσεις για να διορθώσουν τα ζητήματα ασφαλείας.

Κεφάλαιο 6: Προσθετική Κατασκευή και Ελληνική Πραγματικότητα

Σημαντική είναι και η προσαρμογή της καινοτομίας αυτής στα ελληνικά δεδομένα και πως αυτή μπορεί να εφαρμοστεί, εξοικονομώντας χρόνο και χρήμα. Για παράδειγμα, αξιοσημείωτη είναι η μελλοντική χρήση στο αεροπορικό υλικό και στις κατασκευές των αεροπορικών μέσων, ένας τομέας που απασχολεί σε μεγάλο βαθμό την εφοδιαστική αλυσίδα, καθώς οι χρόνοι παραγωγής και διανομής καθώς και τα ποσά που δαπανώνται, πλησιάζουν αρκετά μεγάλα μεγέθη. Για παράδειγμα σε ένα C-130 αεροπλάνο του ελληνικού στρατού, το οποίο χρησιμοποιείται για μεταφορά, προσωπικού και υλικού, εξοπλισμού, αλλά και σε στρατιωτικές ασκήσεις και εκπαιδεύσεις, παρατηρείται το συχνό φαινόμενο καταστροφής του βραχίονα υδραυλικής αντλίας (Ford, 2020). Ο βραχίονας έχει σχεδιαστεί για να συγκρατεί τη χειροκίνητη υδραυλική αντλία του C-130, μια συσκευή που επιτρέπει το κατέβασμα και την ανύψωση της ράμπας με μια αντλία χειρός, όταν το αεροπλάνο απενεργοποιείται ή το υδραυλικό σύστημα αποτυγχάνει. Με τον τρέχοντα σχεδιασμό του, ο βραχίονας μπορεί να αντέξει πολύ ελάχιστο πλευρικό φορτίο από τη λαβή της αντλίας. Εξαιτίας αυτού, εκτιμάται ότι 10-20 αγκύλες σπάνε ετησίως και πρέπει να κατασκευάζονται τοπικά, μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Η επαναδημιουργία του βραχίονα θα δώσει την ευκαιρία να ανανεωθεί πλήρως η δομή και η δύναμη του, για να μειωθεί ο αριθμός των επισκευών που απαιτούνται με την πάροδο του χρόνου. Το νέο τριδιάστατο τμήμα μπορεί να αντέξει τρεις φορές την καθοδική δύναμη και 10 φορές την πλευρική δύναμη σε σύγκριση με το αρχικό στήριγμα, καθιστώντας πολύ λιγότερο πιθανό να σπάσει στο πεδίο ενώ η έκδοση 3D κοστίζει 3.240€ λιγότερο και απαιτεί σημαντικά λιγότερες ανθρώπινες ώρες για παραγωγή.

Επιπλέον, όσον αφορά τα ερπυστριοφόρα οχήματα, ένα ξηρό ή με υγρασία περιβάλλον, μπορεί να φθείρει το όχημα και να το αφήσει σε ακινησία, ίσως για από ένα χρόνο, καθώς για την προμήθεια του ανταλλακτικού απαιτείται συνήθως μεγάλο χρονικό διάστημα. Εκτός αυτού, και εξαιτίας όμως της πολύχρονης χρήσης, γρανάζια, ρότορες και γενικά εξαρτήματα ερπυστριοφόρων οχημάτων υφίστανται φθορά με αποτέλεσμα να χρήζουν επιδιόρθωσης. Με την προσθετική κατασκευή η επιδιόρθωση των γραναζιών γίνεται πραγματικότητα, αφού με τη μέθοδο εξώθησης μετάλλου, μπορούμε να επιδιορθώσουμε και να συμπληρώσουμε υλικό στο

χαμένο/φθαρμένο τμήμα του εξαρτήματος. Έτσι, υλικά, και συγκεκριμένα γρανάζια που απαιτούσαν για την αγορά τους ποσά της τάξεως 5.500€ και έφταναν μέχρι και 8000€, τώρα μπορούν να επισκευαστούν με κάτω από 2000€, αντί να αγοραστούν εκ νέου, μειώνοντας έτσι το κόστος κατά 60 - 70%, ενώ η επιδιόρθωση εκτιμάται κάτω από 12 ώρες, σε σχέση με την προμήθεια νέου εξαρτήματος η οποία αγγίζει το διάστημα των 12 εβδομάδων το λιγότερο. Μαζί με τα εξαρτήματα, οι συλλογές εργαλείων επισκευής των οχημάτων αυτών, οι οποίες κοστίζουν εκατομμύρια και δεν υπάρχει η δυνατότητα προμήθειας τους σε περίπτωση απώλειας ή φθοράς/καταστροφής, είναι εφικτό να κατασκευαστούν μέσω της προσθετικής κατασκευής (Vialva, 2019; Essop, 2020).

Μη ξεχνάμε, όμως και το υλικό στα τροχοφόρα οχήματα, τα οποία, εξαιτίας της ποικιλομορφίας του ελληνικού εδάφους, υφίστανται πολλές καταπονήσεις και φθορές, με αποτελέσματα η αντικατάστασή τους να πρέπει να είναι άμεση και φθηνή. Με την προσθετική κατασκευή αυτό επιτυγχάνεται, καθώς ανταλλακτικά όπως, δεξαμενές καυσίμου, ή νερού, ψυγεία, φλάντζες, αλλά και ανταλλακτικά εσωτερικά των αυτοκινήτων, με την παραγωγή να επιτυγχάνεται σε διάστημα 7-12 ωρών, και το κόστος να μειώνεται στο 50%. Αυτή η καινοτομία, μειώνει τη διαδικασία της επισκευής και επιτρέπει στο όχημα να διατηρήσει την επιχειρησιακή του χρήση, η οποία πρέπει να είναι συνεχώς ενεργή.

Συμπεράσματα

Υπάρχουν πολλές χρήσεις για την τριδιάστατη εκτύπωση στο στρατό. Κάθε μέρα φαίνεται ότι η ανάγκη αυξάνεται και δημιουργούνται λύσεις για το πώς να ενσωματωθεί αυτή η τεχνολογία στο να καταστεί ευκολότερη και πιο οικονομική για το στρατιωτικό μας προσωπικό στην καθημερινή τους ζωή κατά την ανάπτυξη.

Σε ένα όλο και πιο περίπλοκο στρατιωτικό τοπίο, η τριδιάστατη εκτύπωση έχει τη δυνατότητα να καλύψει βασικές αμυντικές ανάγκες. Οι γρήγορες, τοπικές και ευέλικτες δυνατότητες κατασκευής που προσφέρει η προσθετική κατασκευή την καθιστούν ιδανική τεχνολογία για μια βιομηχανία που βασίζεται σε γρήγορη καινοτομία και τεχνολογικές εξελίξεις. Μακροπρόθεσμα, η προσθετική κατασκευή θα επιτρέψει στην κατασκευή, επισκευή και συντήρηση στρατιωτικών συστημάτων και εξοπλισμού και θα οδηγήσει σε μια άνευ προηγουμένου αλλαγή στις εφοδιαστικές και στρατιωτικές αλυσίδες εφοδιασμού.

Θα είναι ενδιαφέρον να παρακολουθήσουμε πώς η τριδιάστατη εκτύπωση θα συνεχίσει να βρίσκει τον δρόμο της σε κάθε κλάδο της στρατιωτικής πραγματικότητας, ειδικά σε αυτούς τους άνευ προηγουμένου καιρούς, ενώ αγωνιζόμαστε να κρατήσουμε ανοιχτά τα εργοστάσια και τις επιχειρήσεις, κατά τη διάρκεια μιας πανδημίας, που κανονικά θα προμηθεύει τον στρατό μας με ανταλλακτικά που χρειάζονται για τη συντήρηση του εξοπλισμού τους. Ένα πράγμα που γνωρίζουμε με βεβαιότητα, είναι ότι η τεχνολογία τριδιάστατης εκτύπωσης ανοίγει πολλές πόρτες για το στρατιωτικό μας προσωπικό, που θα τους επιτρέψει να συνεχίσουν να παρέχουν την ανιδιοτελή υπηρεσία τους στη χώρα μας και τον κόσμο με λιγότερο άγχος και αγώνα. Με σημαντικές επενδύσεις που έγιναν για την ανάπτυξη και την πιστοποίηση διαδικασιών και υλικών τριδιάστατης εκτύπωσης, το μέλλον της τριδιάστατης εκτύπωσης για παγκόσμιους στρατούς φαίνεται σίγουρα λαμπρό.

Βιβλιογραφία

A. R. Boccaccini (2015) ‘Additive Manufacturing of Bioactive Glasses and Silicate Bioceramics’, (02). doi:10.4416/JCST2015-00001.

A. Zocca (2017) ‘LSD-based 3D printing of alumina ceramics’, (01). doi:10.4416/JCST2016-00103.

Al-Maliki, J.Q. and Al-Maliki, A.J.Q. (2015) ‘The Processes and Technologies of 3D Printing’, p. 6.

Antill, P. and Smith, J. (2017) ‘The British Army in Transition: From Army 2020 to the Strike Brigades and the Logistics of Future Operations’, *The RUSI Journal*, 162(3), pp. 50–58. doi:10.1080/03071847.2017.1353249.

armyrecognition.com (2014) ‘Chinese Army uses 3-D printing technology to create 3D military topographic map’, *ArmyRecognition*.

Asil, R. (2014) ‘3D Printing for the Defense Industry’, *Fractal Int. Fractal Works*, pp. 1–3.

Atzeni, E. and Salmi, A. (2012) ‘Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts’, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9–12), pp. 1147–1155. doi:10.1007/s00170-011-3878-1.

Azam, F.I. *et al.* (2018) ‘An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 328, p. 012005. doi:10.1088/1757-899X/328/1/012005.

Baich, L., Manogharan, G. and Marie, H. (2015) ‘Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts’, *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(3/4), p. 308. doi:10.1504/IJRAPIDM.2015.074809.

Baldassarre, F. and Ricciardi, F. (2017) ‘The Additive Manufacturing in the Industry 4.0 Era: The Case of an Italian FabLab’, *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, (1), p. 11.

Balistreri, G. (2015) ‘POTENTIAL OF Additive manufacturing IN THE AFTER-SALES SERVICE SUPPLY CHAINS OF GROUND BASED MILITARY SYSTEMS’, *University of Twente/Royal Netherland Academy*, p. 87.

Beaman, J.J. *et al.* (1997) *Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing*. Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4615-6327-3.

Bell, D. (2019) ‘3D Printing Materials Guide for Classrooms’, *Autodesk, Tinkercad* [Preprint].

Bineli, A.R.R. *et al.* (2001) ‘Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Technology for Design and Construction of microcreators’, *J Mater Process Technol*, (113), p. 7.

Boer, J. den, Lambrechts, W. and Krikke, H. (2020) 'Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain', *Journal of Cleaner Production*, 257, p. 120301. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120301.

Boparai, K., Singh, R. and Singh, H. (2015) 'Comparison of tribological behaviour for Nylon6-Al₂O₃ and ABS parts fabricated by fused deposition modelling: This paper reports a low cost composite material that is more wear-resistant than conventional ABS', *Virtual and Physical Prototyping*, 10(2), pp. 59–66. doi:10.1080/17452759.2015.1037402.

Busachi, A. *et al.* (2018) 'Additive manufacturing applications in Defence Support Services: current practices and framework for implementation', *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 9(3), pp. 657–674. doi:10.1007/s13198-017-0585-9.

Camirero, M.A. *et al.* (2018) 'Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling', *Composites Part B: Engineering*, 148, pp. 93–103. doi:10.1016/j.compositesb.2018.04.054.

Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S. (2003) *Rapid prototyping: principles and applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific.

Cooper, K. (2001) *Rapid prototyping technology: selection and application*. Marcel Dekker (Mechanical Engineering).

Cooperstein, I., Layani, M. and Magdassi, S. (2015) '3D printing of porous structures by UV-curable O/W emulsion for fabrication of conductive objects', *Journal of Materials Chemistry C*, 3(9), pp. 2040–2044. doi:10.1039/C4TC02215G.

Cottinham, A. (2021) 'Military Applications of 3D Printing-battlefield tested', *All3Dp.pro*, 2 July.

Cross, D. (2013) 'Texas company makes metal gun with 3-D printer', *CNN Business*, 9 November.

DebRoy, T. *et al.* (2018) 'Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties', *Progress in Materials Science*, 92, pp. 112–224. doi:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

Defense Logistics Agency Fact Sheet (2017). Fort Belvoir: DLA Public Affairs Office.

"*Defense Logistics Agency: Strategic Plan 2015-2022*". (2015). Strategic Plan. Defense Logistics Agency.

Dizon, J.R.C. *et al.* (2018) 'Mechanical characterization of 3D-printed polymers', *Additive Manufacturing*, 20, pp. 44–67. doi:10.1016/j.addma.2017.12.002.

Essop, A. (2020) ‘U.S. ARMY INVESTIGATES PREDICTIVE MAINTENANCE FOR 3D PRINTED STEEL PARTS’, *3D Printing Industry*, 27 May.

Farivar, C. (2013) “‘Download this gun’: 3D-printed semi-automatic fires over 600 rounds’, *Ars Technica*, 1 March.

Ferreira, R.T.L. *et al.* (2017) ‘Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers’, *Composites Part B: Engineering*, 124, pp. 88–100. doi:10.1016/j.compositesb.2017.05.013.

Ford, J. (2020) ‘Little Rock AFB Airman sparks 3D printed innovation for C-130 fleet’, *U.S Airforce Magazine*, 9 June. Available at: <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/2212703/little-rock-afb-airman-sparks-3d-printed-innovation-for-c-130-fleet/>.

Gebhardt, A. (2013) ‘3D printing and its applications’, ; *Lizenznehmer RTEjournal*, p. 12.

Greenberg, A. (2012) “‘Wiki Weapon Project’ Aims To Create A Gun Anyone Can 3D-Print At Home’, *Forbes*.

Grunewald, S. (2016) ‘The US Army Wants to Use 3D Printers to Customize Military Meals’, *3DPrint.com*, 3 February.

Hammes, T.X. (2016) ‘Cheap Technology Will Challenge U.S. Tactical Dominance’, p. 10.

Hao, W. (2018) ‘Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites’, *Polymer Testing*, p. 7.

Hitzler, L. *et al.* (2018) ‘Additive Manufacturing of Cobalt-Based Dental Alloys: Analysis of Microstructure and Physicomechanical Properties’, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, pp. 1–12. doi:10.1155/2018/8213023.

Horst, D.J., Duvoisin, C.A. and Vieira, R. de A. (2018) ‘Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review’, *International Journal of Engineering and Technical Research*, 8(8), pp. 3–8.

Hoskins, S. and Palsenbarg, V. (2013) ‘3D printing timeline’, *Museum of Arts and Design*, p. 9.

Hossain, Md.A. *et al.* (2020) ‘A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market’, *Sustainability*, 12(20), p. 8492. doi:10.3390/su12208492.

Hull, C.W. and Gabriel, S. (1986) ‘Apparatus for production of Three-dimensional Object by Stereolithography’, p. 16.

Jordan, J.M. (2018) *3D printing*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press (The mit press essential knowledge series).

- Kalogeropoulos, N. (2020) '3D Printing In The Army: Here's How', *3DPrinterChat.com*, 6 February.
- Kodama, H. (1981) 'Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer', *Review of Scientific Instruments*, 52(11), pp. 1770–1773. doi:10.1063/1.1136492.
- Kumar, L.J., Pandey, P.M. and Wimpenny, D.I. (eds) (2019) *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-13-0305-0.
- Lee, J.-Y., An, J. and Chua, C.K. (2017) 'Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials', *Applied Materials Today*, 7, pp. 120–133. doi:10.1016/j.apmt.2017.02.004.
- Li, H. *et al.* (2019) 'Dental ceramic prostheses by stereolithography-based additive manufacturing: potentials and challenges', *Advances in Applied Ceramics*, 118(1–2), pp. 30–36. doi:10.1080/17436753.2018.1447834.
- Lopes, A. *et al.* (2014) 'Laser curing of silver-based conductive inks for in situ 3D structural electronics fabrication in stereolithography', *elsevier*, 214, pp. 1935–1945.
- Manoj Prabhakar, M. *et al.* (2021) 'A short review on 3D printing methods, process parameters and materials', *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 6108–6114. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.225.
- Matias, E. and Rao, B. (2015) '3D printing: On its historical evolution and the implications for business', in *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*. *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, Portland, OR, USA: IEEE, pp. 551–558. doi:10.1109/PICMET.2015.7273052.
- Milkert, H. (2014) 'U.S. Army Researches 3D Printing For Use in Uniforms and Gear', *3DPrint.com*, 31 July.
- Mizokami, K. (2017) 'The U.S. Army 3D-Printed a Grenade Launcher and Called it R.A.M.B.O.', *Hearst Magazine*, 8 March.
- Molitch-Hou, M. (2016) 'Latest Atlats Robot Flashes 3D printed bits in Public', *3D Printing Industry*, 26 February.
- Monahan, S. (2016) '3D Printing: A Manufacturing Revolution', *ATKearny-3D printing*, p. 16.
- Mori, K. (1997) 'Apparatus for producing parts by selective sintering', p. 14.
- Murr, L.E. (2016) 'Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication†', *Journal of Materials Science & Technology*, 32(10), pp. 987–995. doi:10.1016/j.jmst.2016.08.011.

- Ngo, T.D. *et al.* (2018) ‘Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges’, *Composites Part B: Engineering*, 143, pp. 172–196. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- Nikzad, M., Masood, S.H. and Sbarski, I. (2011) ‘Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling’, *Materials & Design*, 32(6), pp. 3448–3456. doi:10.1016/j.matdes.2011.01.056.
- O’Neal, B. (2019a) ‘How Feasible is it to use 3D Printing to Maintain Military Assault Rifles?’, *3DPrint.com* [Preprint].
- O’Neal, B. (2019b) ‘Ruggedized nScrypt Bioprinter Allows Military Personnel to 3D Print Medical Products in Remote Areas’, *3DPrint.com*, 4 October.
- Oropallo, W. and Piegl, L.A. (2016) ‘Ten challenges in 3D printing’, *Engineering with Computers*, 32(1), pp. 135–148. doi:10.1007/s00366-015-0407-0.
- Owen, D. *et al.* (2018) ‘3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer’, *Progress in Additive Manufacturing*, 3(1–2), pp. 3–9. doi:10.1007/s40964-018-0037-3.
- Owen, J. (2021) ‘3D Printing Uses in the Military’, *3DUniverse*, pp. 1–10.
- Panneerselvam, P. (2018) ‘Additive Manufacturing in Aerospace and Defence Sector: Strategy of India’, *Journal of Defense Studies*, 12(1), pp. 39–60.
- PCMag Staff (2012) ‘COULD A “PRINTABLE GUN” CHANGE THE WORLD?’, *PC Magazine*, 24 August.
- Pearson, A. (2015) ‘World’s first jet-powered, 3D printed UAV tops 150 mph with lightweight Stratasys materials.’, *Stratasys*, 9 November.
- Peltz, E. *et al.* (2015) *Improving DLA supply chain agility: lead times, order quantities, and information flow*. Santa Monica, Calif: Rand Corporation.
- Qian, M. (2014) ‘New Zealand leads the way in Titanium Additive Manufacturing’, *Metal AM*, May.
- Reddy Bathula, Ir.S. (2017) ‘3D Printing for Foot’, *MOJ Proteomics & Bioinformatics*, 5(6). doi:10.15406/mojpb.2017.05.00176.
- Rodríguez, A. (2017) ‘Military’s Use of 3-D Printing to Improve Supply Chain’, *Technology and Operations Management*, 15 November.
- Santos, E.C. *et al.* (2006) ‘Rapid manufacturing of metal components by laser forming’, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12–13), pp. 1459–1468. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.09.005.
- Sathishkumar, T., Satheeshkumar, S. and Naveen, J. (2014) ‘Glass fiber-reinforced polymer composites – a review’, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), pp. 1258–1275. doi:10.1177/0731684414530790.

- Shahrubudin, N., Lee, T.C. and Ramlan, R. (2019a) ‘An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications’, *Procedia Manufacturing*, 35, pp. 1286–1296. doi:10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- Shahrubudin, N., Lee, T.C. and Ramlan, R. (2019b) ‘An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications’, *Procedia Manufacturing*, 35, pp. 1286–1296. doi:10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- Sireesha, M. *et al.* (2018) ‘A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry’, *RSC Advances*, 8(40), pp. 22460–22468. doi:10.1039/C8RA03194K.
- Su, A. and Al’Aref, S.J. (2018) ‘History of 3D Printing’, in *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*. Elsevier, pp. 1–10. doi:10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8.
- Swainson, W.K. and Box, P.O. (1977) ‘Producing Three-Dimensional Figure Program’, p. 18.
- Takezawa, A. (2017) ‘Design methodology for porous composites with tunable thermal expansion produced by multi-material topology optimization and additive manufacturing’, *Composites Part B*, p. 9.
- Tampi, T. (2020) ‘French Army Deploys Massive Military Print Farm for Spare Parts’, *3DPrint.com*, 7 July.
- Tang, X. and Yu, Y. (2015) ‘Electrospinning preparation and characterization of alumina nanofibers with high aspect ratio’, *Ceramics International*, 41(8), pp. 9232–9238. doi:10.1016/j.ceramint.2015.04.157.
- Taylor-Smith, K. (2020) ‘How 3D-Printed Metal Parts will Revolutionize Army Logistics Chains’, *Azo Materials*, 23 April.
- Thavornnyutikarn, B. *et al.* (no date) ‘Porous 45S5 Bioglass®-based scaffolds using stereolithography: effect of partial pre-sintering on structural and mechanical properties of scaffolds’, p. 33.
- Thong, C.S.S. and Wen, C.W. (2015) ‘3D Printing – Revolutionising Military Operations’, *Pointer*, 42(2), p. 12.
- Trevisan, F. *et al.* (2018) ‘Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications’, *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 16(2), pp. 57–67. doi:10.5301/jabfm.5000371.
- Uhlmann, E. *et al.* (2015) ‘Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components’, *Procedia CIRP*, 35, pp. 55–60. doi:10.1016/j.procir.2015.08.061.
- Van Humbeeck, J. (2018) ‘Additive Manufacturing of Shape Memory Alloys’, *Shape Memory and Superelasticity*, 4(2), pp. 309–312. doi:10.1007/s40830-018-0174-z.

Vialva, T. (2019) 'U.S. ARMY DEVELOP ULTRA-STRONG 3D PRINTED STEEL PARTS TO REVOLUTIONIZE BATTLEFIELD LOGISTICS', *3D Printing Industry*, 5 March.

Wang, X. *et al.* (2017) '3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective', *Composites Part B: Engineering*, 110, pp. 442–458. doi:10.1016/j.compositesb.2016.11.034.

Wohlers, T. and Gornet, T. (2014) 'History of additive manufacturing', p. 34.

Yang, Y. *et al.* (2016) '3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9–12), pp. 2079–2095. doi:10.1007/s00170-015-7843-2.

Yin, P. and Yang, L. (2018) 'Research on military application of 3D real scene technology to road into Tibet', in. *ADVANCES IN MATERIALS, MACHINERY, ELECTRONICS II: Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics (AMME 2018)*, Xi'an City, China, p. 040057. doi:10.1063/1.5033721.

Young, J. (2016) '3D Printed Bullets Developed and Tested by Russian Researchers', *3Dprint.com*, 21 November.