



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ: Εφαρμοσμένων Τεχνών και Πολιτισμού

ΤΜΗΜΑ: Γραφιστικής και Οπτικής Επικοινωνίας

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: Τεχνολογίας Γραφικών Τεχνών

Προκλήσεις και Σύγχρονες Επιλογές Υλικών Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

(Εφαρμογές της 3D εκτύπωσης στο χώρο των Εφαρμοσμένων Τεχνών και του Πολιτισμού)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όνοματεπώνυμο: Κωνσταντίνος Τσακίρης

Αριθμός Μητρώου: 16036

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Δρ. Σταματίνα Θεοχάρη

Αν. Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Αθήνα, Ιούνιος 2023

Τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής

Σταματίνα Θεοχάρη, Αν. Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Αναστάσιος Πολίτης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Χρυσούλα Γάτσου, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κωνσταντίνος Τσακίρης, με αριθμό μητρώου 16036, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Τεχνών και Πολιτισμού του Τμήματος Γραφιστικής και Οπτικής Επικοινωνίας της κατεύθυνσης Τεχνολογίας Γραφικών Τεχνών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

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

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου που με υποστήριξαν οικονομικά και με υπομονή κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου για την υπομονή της και τις πολύτιμες συμβουλές της κατά την συγγραφή της εργασίας μου.

Table of Contents

Περίληψη.....	7
Abstract.....	8
Στόχοι.....	9
Μεθοδολογία.....	9
1. Τρισδιάστατη εκτύπωση.....	10
1.1 Γενικά.....	10
1.2 Εξελίξεις.....	11
1.3 Εφαρμογές.....	15
1.4 Τεχνολογίες.....	19
1.5 Μορφές υλικών.....	23
1.6 Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής.....	24
2. Σύγχρονες τάσεις και προκλήσεις.....	27
2.1 Σύγχρονες τάσεις.....	27
2.2 Σύγχρονες προκλήσεις.....	38
2.3.1 Κόστος εξοπλισμού και σχεδιασμός του μοντέλου παραγωγής.....	39
2.2.1 Μόνιμη εγκατάσταση και εξωτερική ανάθεση (Inhouse vs outsource).....	43
2.3 Υλικά.....	45
2.3.1 Κεραμικά υλικά.....	46
2.3.2 Βιοδιασπώμενα υλικά / biodegradable materials.....	55
2.3.3 Νήμα ξύλου / Wood fillament.....	60
2.3.4 Ίνες άνθρακα / Carbon fiber.....	63
3. Η τρισδιάστατη εκτύπωση στις Εφαρμοσμένες τέχνες.....	70
3.1 Παραγωγή κοσμημάτων.....	71
3.2 Δημιουργίες για το χώρο της μόδας.....	75
3.3 Κατασκευή φωτιστικών από ανάγλυφη πορσελάνη (Lithophanes).....	78
3.4 Κατασκευή εκτυπωτικής πλάκας φλεξογραφίας.....	80
3.4 Κατασκευή διάτρητης μήτρας μεταξοτυπίας (stencil).....	85

3.5 Κατασκευή βοηθητικών εργαλείων των Γραφικών τεχνών.....	86
3.6 Τρισδιάστατη εκτύπωση σε ύφασμα.....	87
3.8 Εφαρμογές για το Animation/ stop-motion.....	93
3.9 Εφαρμογές για τον κινηματογράφο.....	95
4. Κατασκευή λειτουργικής πρέσας υψιτυπίας.....	97
4.1 Προετοιμασία.....	98
4.2 Προσαρμογή του σχεδίου του λογοτύπου προς εκτύπωση.....	103
4.3 Επιλογή και χρήση του προγράμματος CAD.....	107
4.4 Επιλογή και χρήση του προγράμματος Slicer.....	124
4.5 Τρισδιάστατη εκτύπωση και συναρμολόγηση της πρέσας υψιτυπίας.....	127
4.6 Εκτύπωση με την τρισδιάστατα εκτυπωμένη πρέσα.....	141
4.7 Συμπεράσματα από το πειραματικό μέρος (project).....	152
5. Συμπέρασμα εργασίας.....	158
Βιβλιογραφία.....	161

Περίληψη

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η παρουσίαση της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η αποτύπωση των προκλήσεων υιοθέτησης αυτής της τεχνολογίας στο βιομηχανικό περιβάλλον, καθώς και στο περιβάλλον των Εφαρμοσμένων τεχνών μέσω της μελέτης της σχετικής βιβλιογραφίας. Αρχικά, επεξηγείται ο όρος τρισδιάστατη εκτύπωση και στη συνέχεια γίνεται ιστορική αναδρομή, με αναφορά στα πιο σημαντικά γεγονότα κατά την εξέλιξή της. Έπειτα παρουσιάζονται οι πιο γνωστές μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης και τα βασικά στάδια της διαδικασίας που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί η κατασκευή ενός τρισδιάστατα εκτυπωμένου αντικειμένου. Ακολουθεί η παράθεση των κυριότερων υλικών που χρησιμοποιούνται με βάση τη μορφή τους, καθώς και οι τομείς στους οποίους εφαρμόζεται αυτή η προσθετική μέθοδος παραγωγής. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι τάσεις της βιομηχανίας σχετικά με την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας όπως και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζονται. Προσοχή δίνεται επίσης στην κατάσταση των συμβατικών και των υπό έρευνα υλικών αυτής της τεχνολογίας. Ακολουθούν οι προσπάθειες εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας στον τομέα των Εφαρμοσμένων τεχνών. Τέλος στην εργασία περιλαμβάνεται πειραματική / ερευνητική εργασία (project) που αφορά την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο περιβάλλον των Εφαρμοσμένων τεχνών, και πιο συγκεκριμένα την κατασκευή εκτυπωτικής πρέσας και εκτυπωτικών πλακών για την εκτύπωση εντύπων, όπου περιγράφονται και αναλύονται όλα τα σημαντικά στάδια και οι παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά:

τρειςδιάστατη εκτύπωση, προσθετική μέθοδος παραγωγής, προκλήσεις, υλικά, εφαρμογές

Abstract

The goal of this paper is the presentation of 3D printing and the communication of the challenges that come with the effort of adopting this technology in the industry and the sector of applied arts by studying the related bibliography. First, the term 3D printing is explained, following that, 3D printing technology is historically reviewed by giving attention to the most important events throughout its evolution. Next follows the presentation of the most well known 3D printing methods as well as the explanation of the main stages of the printing process. The introductory part ends with the listing and explanation of the different forms the materials come in, while also mentioning their compatibility. Additionally, applications of this technology in different fields will be presented. In the next section, trends and challenges of adopting 3D printing technology in the industrial environment will be thoroughly discussed. Multiple novel and in-research materials are being reported while also ways of applying them are presented in the following section. After that, different projects related to the applied arts sector in which 3D printing has been applied are being presented. In the last section a Project will be performed to showcase the use of 3D printing in the applied arts sector with the main goal being to educate about the important stages and know-hows of the process of 3D printing from the start to finish.

Key words

3D printing, additive manufacturing, challenges, materials, applications

Στόχοι

- Μελέτη της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης
- Αναφορά στο ρόλο της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον
- Αναφορά στις υπάρχουσες προκλήσεις υιοθέτησης της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον
- Αναφορά στις προκλήσεις που αφορούν την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα των Γραφικών τεχνών
- Πειραματικό μέρος (Project)

Μεθοδολογία

Η έρευνα που διεξάχθηκε σε αυτή την εργασία ήταν κυρίως μέσω της μελέτης επιστημονικών εργασιών, άρθρων και υλικού, που είναι διαθέσιμο σε ηλεκτρονική μορφή στο διαδίκτυο. Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή των θεωρητικών γνώσεων σε πειραματική εργασία (project).

1. Τρισδιάστατη εκτύπωση

1.1 Γενικά

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης χαρακτηρίζεται από την χρήση ψηφιακών αρχείων που δημιουργούνται αρχικά σε ένα πρόγραμμα CAD (computer-aided design) για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων, και στη συνέχεια μεταφέρονται σε άλλο πρόγραμμα (τύπου Slicer) για την μετατροπή τους σε αρχείο g-code, που καθιστά δυνατή την επεξεργασία και την εκτύπωση τους από ένα τρισδιάστατο εκτυπωτή. Το πρόγραμμα Slicer χωρίζει το αντικείμενο που σαρώθηκε ή δημιουργήθηκε ψηφιακά σε επίπεδα. Τα επίπεδα στη συνέχεια εκτυπώνονται με το επιθυμητό υλικό από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή προσθετικά, το ένα πάνω στο άλλο, μέχρι να ολοκληρωθεί το τελικό προϊόν. Πρόκειται δηλαδή για μια τεχνολογία κατασκευής αρκετά διαφορετική από τις συμβατικές. Η βασική διαφορά από αυτές είναι πως κάθε φορά που πρόκειται να γίνει μια αλλαγή σε ένα σχέδιο (design) ενός μοντέλου ή όταν πρόκειται να κατασκευαστεί ένα τελείως καινούριο αντικείμενο, θα πρέπει να κατασκευαστεί ένα καινούριο εξάρτημα ή μήτρα (καλούπι), σύμφωνα με παραδοσιακές τεχνολογίες, ενώ στην περίπτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η βασική προετοιμασία αφορά τη σχεδίαση ενός ψηφιακού αρχείου.

1.2 Εξελίξεις

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη των πολυμερών υλικών. Τα περισσότερα πολυμερή υλικά κατασκευάστηκαν στο χρονικό διάστημα 1920 - 1950. Ακολούθησε η δημιουργία και η εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο διάστημα 1980 - 2000. Η πρώτη εκτυπωτική μέθοδος ήταν η στερεολιθογραφία που άρχισε να εφαρμόζεται το 1987. Άλλες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως η FFF (Fused Filament Fabrication) και η SLS (Selective laser sintering) ακολούθησαν επίσης εκείνη την περίοδο. Μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα είχαν εμφανιστεί πολλές από τις πρώτες εκδοχές των σημερινών τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Από τις αρχές του 20ου αιώνα ξεκίνησε η έρευνα της δυνατότητας εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, όπως της ιατρικής και της αεροδιαστημικής. Όταν πολλά διπλώματα ευρεσιτεχνίας σχετικά με τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης άρχισαν να λήγουν, πολλές εταιρίες άρχισαν να κατασκευάζουν δικές τους σειρές μοντέλων τρισδιάστατων εκτυπωτών, κάνοντας την τεχνολογία αυτή προσβάσιμη στο ευρύ κοινό. Από το 2010 και μετά, η διάδοση της τεχνολογίας και η δυνατότητα πρόσβασης σε αυτήν παγκοσμίως οδήγησε σε ακόμη μεγαλύτερη ανάπτυξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ιδιαίτερα όσον αφορά την ακρίβεια και την ταχύτητα λειτουργίας της. Στην αρχή της εξέλιξης της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ήταν συνηθισμένο να προσαρμόζονται οι μέθοδοι εκτύπωσης στα υπάρχοντα πολυμερή υλικά. Σήμερα πλέον δίνεται μεγάλη σημασία στην ανάπτυξη πολυμερών υλικών ειδικά προσαρμοσμένων για εφαρμογή στις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στις μέρες μας η τρισδιάστατη εκτύπωση διανύει μια περίοδο μετάβασης από την τεχνολογία πρωτοτυπώσεως στην τεχνολογία κατασκευής ολοκληρωμένου προϊόντος (Park et al., 2022).

1.2.1 Χρονολογικά στοιχεία και παράγοντες εξέλιξης της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης

1980 :

Ο Dr. Hideo Kodama σχεδίασε για πρώτη φορά πατέντα τεχνολογίας γρήγορης προτυποποίησης. Ωστόσο δεν εκδηλώθηκε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για αυτήν και η χρηματοδότηση του διπλώματος ευρεσιτεχνίας διακόπηκε σύντομα μετά την κατάθεσή του.

1984:

Το 1984 οι γαλλικοί εφευρέτες Jean-Claude André, Olivier de Witte, και Alain le Méhauté, που εργάζονταν για την γαλλική εταιρία Alcatel και για το εθνικό κέντρο επιστημονικής έρευνας της Γαλλίας επηρεάστηκαν από την ιδέα της τεχνολογίας γρήγορης προτυποποίησης του Dr. Hideo Kadama. Πειραματίστηκαν με το ενδεχόμενο εφαρμογής της τεχνολογίας λέιζερ για τη σκλήρυνση στερεών στην τεχνολογία προτυποποίησης. Ωστόσο λόγω της έλλειψης ενδιαφέροντος από τους χρηματοδότες τους η ιδέα τους εγκαταλείφθηκε.

Ο Chuck Hull την ίδια περίοδο δημοσίευσε την ευρεσιτεχνία του που αφορούσε ένα σύστημα στερεολιθογραφίας (SLA). Η ιδέα του σε αντίθεση με την ιδέα της γαλλικής ομάδας εφευρετών που αναφέρθηκε προηγουμένως, ήταν να χρησιμοποιήσει τις λάμπες UV της εταιρίας του για την σκλήρυνση των φωτοευαίσθητων ρητινών για την κατασκευή προσαρμοσμένων εξαρτημάτων ανά επίπεδο. Η πατέντα του εγκρίθηκε το 1986 και η δραστηριότητα του συνέχισε με την ίδρυση της εταιρίας 3D Systems. Το 1988 κυκλοφόρησε ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής στην αγορά με όνομα SLA-1. Επιπλέον ο Chuck Hull ανέπτυξε το format αρχείου STL και την διαδικασία του digital slicing, τεχνολογίες που παίζουν βασικό ρόλο στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης μέχρι και σήμερα (*History of 3D Printing, 2022*).

1988:

Το 1988 ο Carl Deckard και Joe Beaman έστειλαν αίτημα για την κατοχύρωση διπλωμάτων ερασιτεχνίας σχετικά με την εφεύρεση της τεχνολογίας SLS (Selective Layer Sintering). Οι δυο τους ήταν οι βασικοί παράγοντες ίδρυσης της εταιρίας DTM που εξειδικευόταν στην κατασκευή τρισδιάστατων εκτυπωτών τύπου SLS (Deckard, 1989).

Την ίδια περίοδο ο ιδρυτής της εταιρίας Stratasys εφεύρεσε την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης Fused Deposition Modeling (FDM).

2000:

Η εταιρία Z Corporation κατασκευάζει τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή με δυνατότητα κατασκευής πολύχρωμων αντικειμένων.

2004:

Σημαντικός παράγοντας εξέλιξης της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης και αρχή της δημιουργίας ερασιτεχνικής κοινότητας αυτής της τεχνολογίας ήταν το κίνημα RepRap που άρχισε ο Adrian Bowyer και είχε ως σκοπό την κατασκευή τρισδιάστατων εκτυπωτών με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης, πραγματοποιώντας την ιδέα της αναπαραγόμενης μηχανής. Οι τεχνολογίες που κατασκευάζονται στην κοινότητα είναι αυστηρά ανοικτού κώδικα, γεγονός που επέτρεψε τον πειραματισμό από πολλούς ενδιαφερόμενους και ταυτόχρονα την ίδρυση πολλών εταιριών για την περαιτέρω ανάπτυξη τεχνικών χαμηλότερου κόστους και ευκολότερης προσβασιμότητας. Μια από τις εταιρίες αυτές ήταν η MakerBot που ιδρύθηκε το 2009 και το 2013 εξαγοράστηκε από την Stratasys.

Στα τέλη της δεκαετίας του 2000 η εταιρία 3D Systems είχε αποκτήσει ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των εταιριών τρισδιάστατης εκτύπωσης, συμπεριλαμβάνοντας τις προαναφερόμενες εταιρίες Z Corporation και DTM, καθιστώντας την μία από τις μεγαλύτερες εταιρίες αυτού του είδους κατατάσσοντάς την στο ίδιο επίπεδο με την Stratasys.

Το 2008 άνοιξε ο ιστότοπος Thingiverse, ο οποίος έδινε την δυνατότητα διαμοιρασμού αρχείων ψηφιακών τρισδιάστατων μοντέλων. Η συγκεκριμένη ιστοσελίδα σήμερα, φτάνει τους 2.000.000 ενεργούς χρήστες και τις 1.700.000 λήψεις μηνιαίως (Watkin, 2015).

Συνεχίζοντας στον 21ο αιώνα έως σήμερα η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει πετύχει να εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς όπως στην βιομηχανία αεροδιαστημικής για την κατασκευή πυραύλων και στην βιοϊατρική για την κατασκευή προσθετικών άκρων.

Πρέπει να σημειωθεί πως από τους κυριότερους παράγοντες που αύξησαν και συνεχίζουν να αυξάνουν την δημοτικότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι παρακάτω:

1. Η ύπαρξη πλατφορμών χρηματοδότησης project όπως είναι το Kickstarter,
2. Το κίνημα RepRap
3. Η δυνατότητα διαμοιρασμού αρχείων ψηφιακών τρισδιάστατων μοντέλων μέσω ιστοτόπων όπως το Thingiverse
4. Το Maker culture που είναι στενά συνδεδεμένο με την κουλτούρα Do It Yourself (DIY). Η συγκεκριμένη κουλτούρα έχει ως σκοπό να δώσει σε ενδιαφερόμενους ερασιτέχνες κίνητρο για ατομική έρευνα, κατασκευή και ταυτόχρονα διαμοιρασμό ιδεών με άλλους "makers". Το Maker culture υποστηρίζει την μάθηση μέσω προγραμμάτων ανοιχτού κώδικα που κάνει την πρόσβαση στην γνώση πιο εύκολη και περισσότερο προσβάσιμη στο κοινό. Επίσης μέσω Maker culture έχουν ιδρυθεί παγκοσμίως τα μη-κερδοσκοπικά συνεργατικά εργαστήρια ονομαζόμενα Makerspaces που έχουν ως σκοπό "να αποκτήσουν γνώσεις και να γνωρίσουν καλύτερα την κοινότητα και τις ανάγκες των makers διεθνώς". Τα Makerspaces άρχισαν να πολλαπλασιάζονται από το 2006 κι έπειτα με ραγδαίο ρυθμό σε όλο τον κόσμο. Το 2014 ιδρύθηκε το πρώτο makerspace στην Αθήνα. Παρομοίως με αυτά τα συνεργατικά εργαστήρια υπάρχουν και τα καλούμενα Fablabs που έχουν τον ίδιο σκοπό.

1.3 Εφαρμογές

Λόγω της διαρκούς ανάγκης της βιομηχανίας να βρίσκει όλο και πιο μοντέρνους τρόπους για να προσαρμόζεται στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση γνωστή και ως industry 4.0, η βιομηχανία στρέφεται όλο και περισσότερο στην προσπάθεια της μείωσης του κόστους της παραγωγής μέσω της αύξησης της αποτελεσματικότητας του συστήματος και της οικονομικής χρήσης των πρώτων υλών και της ενέργειας. Η εξάπλωση αυτής της ιδέας εξηγεί την τάση όλο και περισσότερων βιομηχανικών κλάδων να στρέφονται με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στην οικονομική και αποτελεσματική τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Ribeiro et al., 2019). Παρακάτω θα αναφερθούν κάποιες εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην βιομηχανία.

1.3.1 Εφαρμογές στην Αρχιτεκτονική

Στον αρχιτεκτονικό τομέα μία τεχνολογία που εμφανίζεται όλο και περισσότερο είναι η τεχνολογία 3D Concrete Printing (3DCP). Είναι μια από τις ψηφιακές τεχνολογίες που ανοίγει καινούριους ορίζοντες για σχετικές δραστηριότητες, καθώς δίνει τη δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων από σκυρόδεμα με περίπλοκες μορφές. Από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η τεχνολογία, είναι η δυνατότητα οικοδόμησης χωρίς την χρήση ξυλότυπου (Van Der Putten et al., 2021), που είναι στην ουσία η απαραίτητη μήτρα («καλούπι») για την κατασκευή του σκελετού ενός κτιρίου με την συμβατική διαδικασία (*Κατασκευή Ξυλοτύπου – SPN Constructions, n.d.*). Εξαιτίας αυτού του πλεονεκτήματος και πολλών άλλων η τεχνολογία 3DCP πρόκειται να ελαττώσει το 35-60% του κόστους της διαδικασίας κατασκευής μιας οικοδομής ή ενός κτίσματος (*Journal of Building Engineering, n.d.*).



Εικόνα 1: Σπίτια κατασκευασμένα με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης με σκοπό την βιωσιμότητα. Τα σπίτια είναι κατασκευασμένα με χώμα από την περιοχή. Κατασκευαστής TECLA

Στιγμιότυπο από: (Cole & Baghi, 2022)



Εικόνα 2: Κατασκευή των βιώσιμων σπιτιών TECLA με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τα σπίτια κατασκευάζονται με χώμα από την περιοχή.

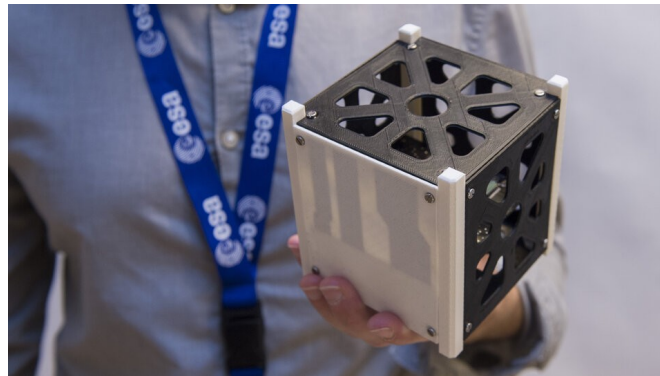
Στιγμιότυπο από: (Cole & Baghi, 2022)

Πολλοί ακτιβιστές από όλο τον κόσμο προσπαθούν να εκμεταλλευτούν αυτή την τεχνολογία για την κατασκευή βιώσιμων κατοικιών με σκοπό την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Cole & Baghi, 2022). Ένα παράδειγμα τέτοιων κατοικιών είναι τα τρισδιάστατα σπίτια καλούμενα TECLA, τα οποία είναι ιδέα του αρχιτέκτονα Mario Cucinella και του δημιουργού του τρισδιάστατου εκτυπωτή WASP (Gertraud Gerst, n.d.). Σκοπός τους είναι η κατασκευή κατοικιών από βασικά υλικά (π.χ. χώμα) από την περιοχή, όπου κατασκευάζεται το κτίσμα. (Cole & Baghi, 2022). Παραδείγματα αυτών φαίνονται στις εικόνες 1,2.

1.3.2 Βιομηχανία αεροδιαστημικής

Ένας από τους τομείς που αναμένεται να ωφεληθούν περισσότερο από τις καινοτομίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ο τομέας της βιομηχανίας αεροδιαστημικής (Sacco & Moon, 2019). Βιομηχανίες της Αεροδιαστημικής έχουν ήδη αρχίσει να χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση σε πολλαπλές εφαρμογές σύμφωνα με τον Ghidini T. (2013) και Misra AK., Grady JE., Carter R. (2015). Δυο βασικοί λόγοι είναι η σημαντική μείωση του κόστους

κατασκευής από 40% έως 90% και η πολύ μεγάλη ταχύτητα κατασκευής περίπλοκων εξαρτημάτων σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Ήδη η NASA κάνει προσπάθειες να κατασκευάσει μικρούς δορυφόρους, τους αποκαλούμενους CubeSat (εικόνα 3) με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Marshall et al., 2015), αλλά ταυτόχρονα κάνει προσπάθειες να κάνει αποδοτική την τρισδιάστατη εκτύπωση και στο διάστημα (*3D Printing in Space*, 2014) .



Εικόνα 3: Κατασκευή του σώματος των δορυφόρων CubeSat με τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Πηγή: (*3D Printing CubeSat Bodies for Cheaper, Faster Missions*, n.d.)

Η Relativity Space είναι μια αμερικανική βιομηχανία αεροδιαστημικής που αναπτύσσει νέες τεχνολογίες. Το χαρακτηριστικό αυτής της βιομηχανίας είναι ότι συνδυάζει τρισδιάστατη εκτύπωση, τεχνητή νοημοσύνη και αυτόνομη ρομποτική για την κατασκευή διαστημικών πυραύλων. Η εταιρία ισχυρίζεται πως μπορεί να κατασκευάσει τους πυραύλους Terran 1 και Terran R (Εικόνες 4, 5) μέσα σε 60 μέρες χάρη στην ευελιξία, την απλότητα, και την αξιοπιστία του συστηματικού μοντέλου της (Relativity Space, n.d.).

Επιπλέον τομείς στους οποίους εφαρμόζεται αυτή η τεχνολογία είναι η βιομηχανία φαρμάκων (Varghese et al., 2022), η βιοϊατρική (Velásquez-García & Kornbluth, 2021) και ο τομέας κατασκευής εργαλείων και εξαρτημάτων για χρήσεις στο βιομηχανικό περιβάλλον (Camuel, 2015a).



Εικόνα 4: Terran 1 της Relativity Space

Πηγή: (Terran 1 3D Printed Rocket, United States of America, n.d.)

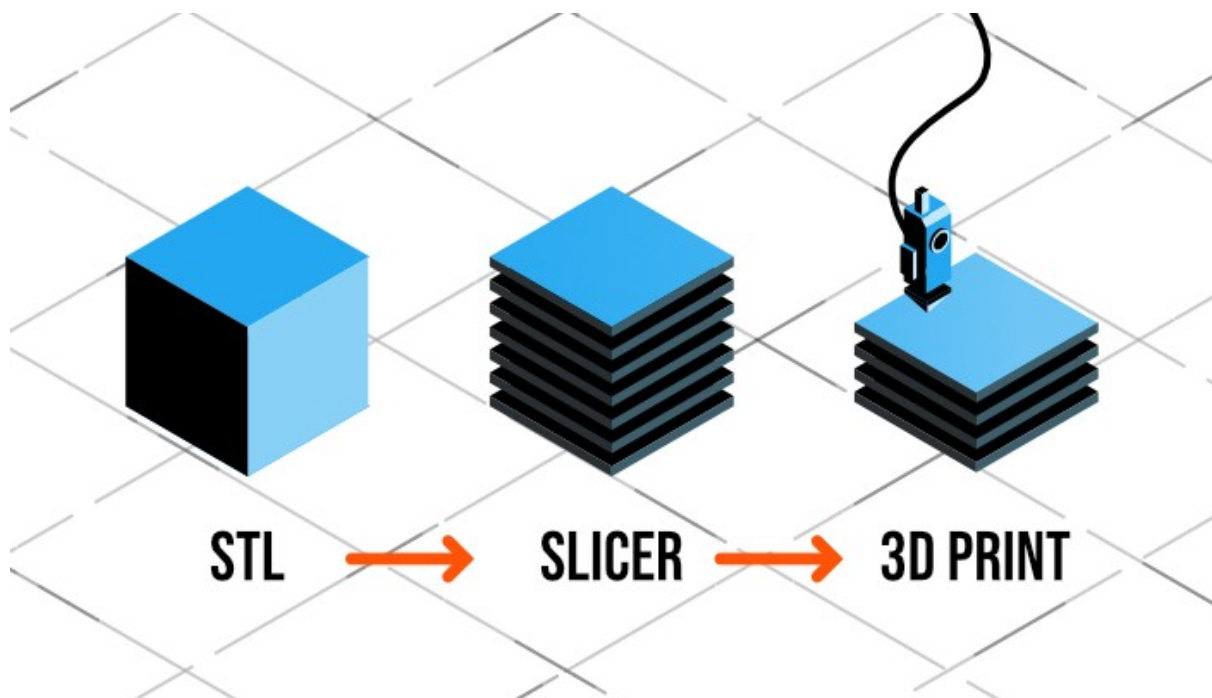


Εικόνα 5: Τρισδιάστατη εκτύπωση του πυραύλου της Relativity Space

Στιγμιότυπο από: (Relativity Space Looks to Take On SpaceX With 3-D Printed Rockets, n.d.)

1.4 Τεχνολογίες

Πολλές είναι οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που διατίθενται πλέον, ωστόσο όλες εξακολουθούν να βασίζονται στην ίδια βασική διαδικασία παραγωγής του προϊόντος. Αρχικά επιλέγεται το αντικείμενο που πρόκειται να εκτυπωθεί και δημιουργείται με σάρωση ή ψηφιακή σχεδίαση, με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος τρισδιάστατης μοντελοποίησης (CAD). Το ψηφιακό μοντέλο εξάγεται από το πρόγραμμα CAD ως αρχείο σε μορφή .STL, το οποίο είναι ένας ειδικός τύπος αρχείου που μπορεί να εισαχθεί σε ένα πρόγραμμα τύπου Slicer. Με τη βοήθεια του προγράμματος αυτού το τρισδιάστατο αντικείμενο μετατρέπεται σε επίπεδα, ώστε να μπορεί να εκτυπωθεί από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Πηγή από: <https://fabheads.com/blogs/what-is-the-role-of-slicing-in-3d-printing/>

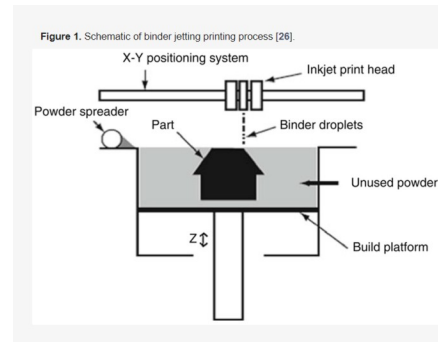
Ανάλογα με την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί μετά την εκτύπωση να είναι απαραίτητες κάποιες διαδικασίες φινιρίσματος, κάποιες από τις οποίες είναι η επεξεργασία σε φούρνο, τροχό, διαλυτικά μέσα κτλ.

Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Τεχνολογία Binder Jetting

Κατασκευή αντικειμένου με συγκόλληση υλικού σε μορφή σκόνης μέσω ψεκασμού του συνδετικού υλικού με τη χρήση ακροφυσίου (Εικόνα 7).

Υλικά που χρησιμοποιούνται: πολυμερή , μέταλλα , κεραμικά.



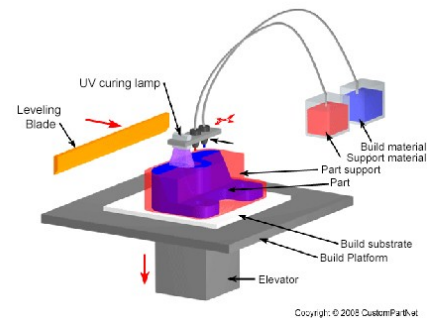
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης Binder jetting

Πηγή: (Garechana et al., 2019)

Τεχνολογία Material Jetting

Τοποθέτηση υλικού ανά επίπεδο μέσω κεφαλής και ταυτόχρονη σκλήρυνση με ακτινοβολία UV (Εικόνα 8).

Υλικά που χρησιμοποιούνται: φωτοπολυμερή, κεριά



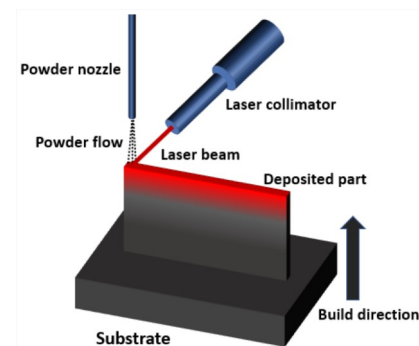
Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης Material jetting

Πηγή: (Waheed et al., 2016)

Τεχνολογία Directed Energy Deposition

Η τεχνολογία αυτή είναι παρόμοια με εκείνη της Material Jetting μόνο που αντί για χρήση UV ακτινοβολίας, το υλικό τήκεται με τη χρήση υψηλής θερμότητας μόλις τοποθετηθεί (Εικόνα 9). και στη συνέχεια στερεοποιείται κατά την ψύξη του.

Υλικά που χρησιμοποιούνται: συνήθως μέταλλα σε μορφή νήματος ή σκόνης



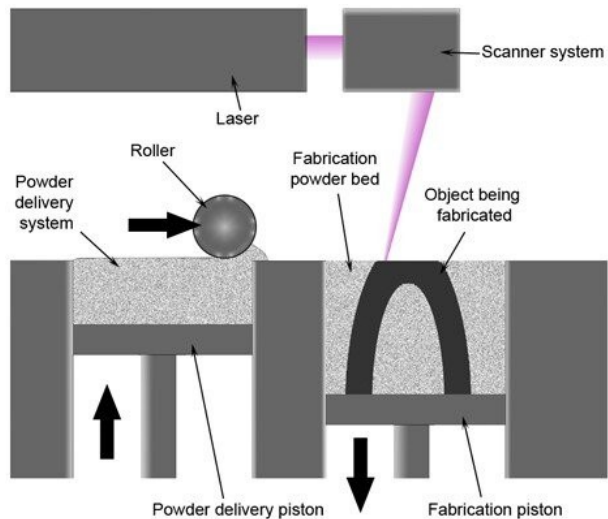
Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης Direct Energy Deposition

Πηγή: (Chen et al., 2020)

Τεχνολογία Powder Bed Fusion

Εφαρμόζεται μια παρόμοια τεχνολογία με εκείνη της Binder Jetting μόνο που αντί για κεφαλή χρησιμοποιείται θερμική ενέργεια για την τήξη των κόκκων της σκόνης με σκοπό την συγκόλληση του υλικού (Εικόνα 10).

Υλικά που χρησιμοποιούνται: μέταλλα, σύνθετα, χρώμα και κεραμικά



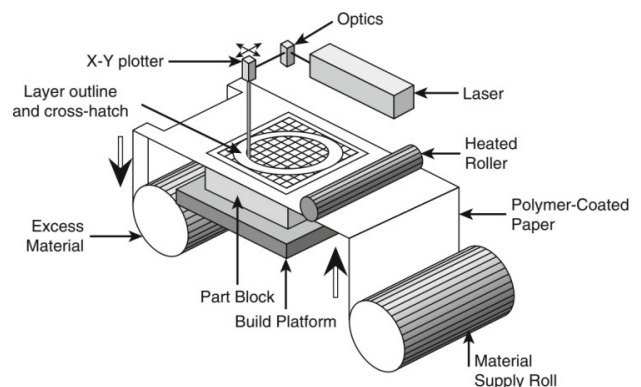
Εικόνα 10: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης Powder Bed Fusion

Πηγή: (Owsiński & Niestony, 2018)

Τεχνολογία Sheet Lamination

Πραγματοποιείται κατασκευή αντικειμένων μέσω της απόθεσης και συγκόλλησης του υλικού σε μορφή φύλλων (Εικόνα 11).

Υλικά που χρησιμοποιούνται: χαρτί, πολυμερή, μέταλλα



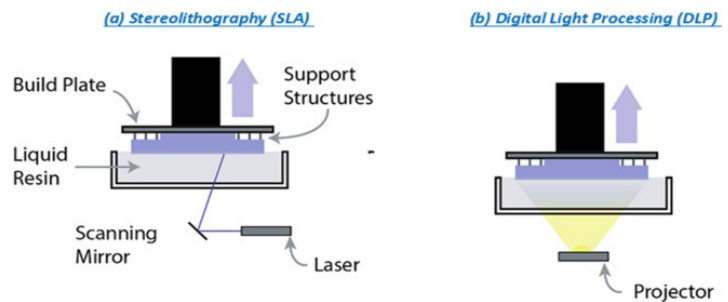
Εικόνα 11: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης Sheet Lamination

Πηγή: (Axel Staffanson & Philip Ragnartz, n.d.)

Τεχνολογία Vat Photopolymerisation

Γίνεται χρήση δεξαμενής με φωτοπολυμερές όπου με την επιλεκτική ανάκλαση ακτινοβολίας ανά τακτά διαστήματα επιτυγχάνεται η σκλήρυνση του υλικού σε επίπεδα (Εικόνα 12).

Υλικά που χρησιμοποιούνται: φωτοπολυμερή και κεραμικά



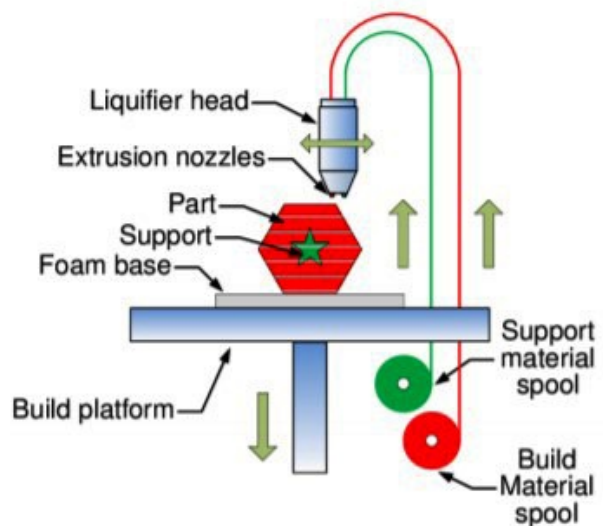
Εικόνα 12: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης Vat Photopolymerisation

Πηγή: (Al Rashid et al., 2021)

Τεχνολογία Material Extrusion

Υλικό σε μορφή νήματος περνάει από μία θερμαινόμενη κεφαλή, όπου λιώνει και δημιουργεί μία στρώση που σκληραίνει σε ελάχιστο χρονικό διάστημα έτσι ώστε στη συνέχεια, επάνω της να τοποθετηθεί η επόμενη στρώση υλικού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου (Εικόνα 13).

Υλικά που χρησιμοποιούνται: κυρίως πολυμερή υλικά



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης Material Extrusion

Πηγή: (Ning et al., 2015)

1.5 Μορφές υλικών

Ανάλογα με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το υλικό προς εκτύπωση τροφοδοτείται στον εκτυπωτή στην κατάλληλη μορφή.

Νήμα: Τα υλικά σε μορφή νήματος (filament) μπορεί να είναι απο πολυμερή που χρησιμοποιούνται κυρίως για την τεχνολογία FDM, ή από μέταλλο το οποίο χρησιμοποιείται στην τεχνολογία Directed Energy Deposition (DED). Τα πιο συνηθισμένα πολυμερή υλικά σε αυτή τη μορφή είναι το Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) , το Polylactic acid (PLA), το Polyvinyl alcohol (PVA) και τα Thermoplastic elastomers (TPE).

Σκόνη: Τα υλικά σε μορφή σκόνης έχουν πολλαπλές χρήσεις. Οι κόκκοι της σκόνης μπορούν να συγκολληθούν με την χρήση υψηλής θερμοκρασίας με την τεχνολογία Direct energy deposition (DED) ή μέσω ψεκασμού συνδετικού υλικού με την τεχνολογία Binder jetting (BJ). Επίσης είναι δυνατή η χρήση συνδυασμού νήματος και σκόνης για καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης, μπορεί να γίνει προσθήκη σκόνης από μέταλλο ή ξύλο κατά την παραγωγή πολυμερούς νήματος για την κατασκευή αντικειμένων με μεταλλική ή ξύλινη υφή και εμφάνιση ανάλογα.

Κερί: Αυτά τα υλικά είναι συμβατά με την τεχνολογία material jetting (MJ).

Υλικά σε υγρή μορφή: Συνήθως είναι υλικά θερμοσκληραινόμενα (thermoset) και εφαρμόζονται στις τεχνολογίες τύπου Vat polymerization, όπως είναι η στερεολιθογραφία (SLA) (Kamran & Saxena, 2016).

1.6 Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής

Ανάλογα με το είδος του τρισδιάστατου εκτυπωτή, ο τρόπος λειτουργίας, καθώς και η εμφάνιση του μπορεί να διαφέρει. Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί ως ενδεικτικό παράδειγμα το μοντέλο του τρισδιάστατου εκτυπωτή τύπου FDM (μοντελοποίηση με τη μέθοδο Fused Deposition Modeling) (Εικόνες 14,15) .

Συγκεκριμένα τα βασικά μέρη ενός FDM εκτυπωτή είναι:

1. Το υλικό (νήμα)
2. Ο εξωθητής
3. Η βάση

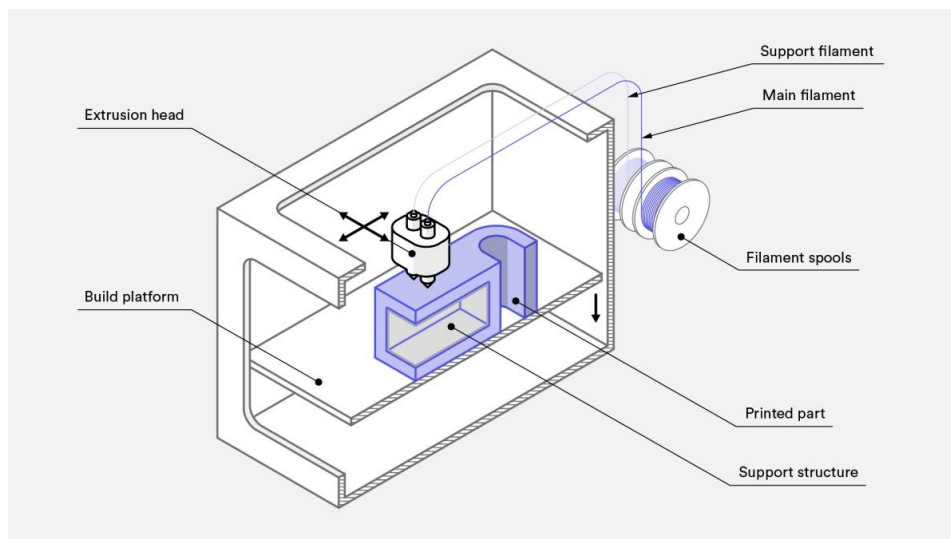
1. **Το υλικό προς εκτύπωση** βρίσκεται σε μορφή νήματος (filament) και μεταφέρεται στον εκτυπωτή ως ρολό (spools).

2. **Ο εξωθητής** (extruder) μπορεί να διαθέτει ένα ή περισσότερα ακροφύσια. Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται extruders με δύο κεφαλές που επιτρέπουν τη χρήση δευτερεύοντος νήματος. Το δευτερεύον ή βοηθητικό νήμα/υλικό (support filament/support material) χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου πρέπει να εκτυπωθεί ένα αντικείμενο, που λόγω σχήματος απαιτείται μια προσωρινή βάση για τη στήριξή του. Το υλικό αυτό έχει το χαρακτηριστικό να αφαιρείται πολύ εύκολα μετά την εκτύπωση με το χέρι ή με διάλυση κατά τη βύθισή του σε συγκεκριμένο υγρό. Σε περίπτωση που γίνει χρήση εξωθητή που διαθέτει μόνο ένα ακροφύσιο, η στήριξη θα πρέπει να κατασκευαστεί με το βασικό νήμα, γεγονός που κάνει δύσκολο το διαχωρισμό της από το αντικείμενο δύσκολο.

Ο εξωθητής αποτελεί το πιο σημαντικό τμήμα του εκτυπωτή και παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη μεταφορά του νήματος. Διαθέτει μικρά γρανάζια που βοηθούν τη μεταφορά του νήματος προς την κεφαλή, όπου αυτό θερμαίνεται και εξωθείται.

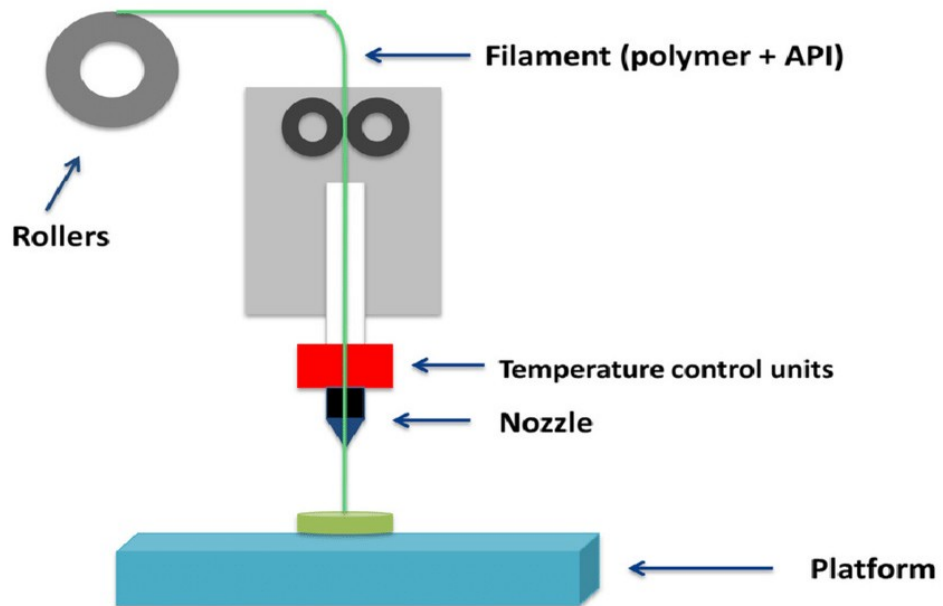
Επιπλέον ο εξωθητής σε συνδυασμό με τον μηχανισμό επάνω στον οποίο είναι εγκατεστημένος έχει την δυνατότητα να κινείται στους τρεις άξονες x, y, z.

3. Το τρίτο τμήμα του εκτυπωτή είναι η **βάση**, όπου το υλικό εκτυπώνεται/επιστοιβάζεται/ κατασκευάζεται. Η βάση είναι μία πλατφόρμα που έχει την δυνατότητα να ανυψώνεται αυτόματα. Στην αρχή της εκτύπωσης ανυψώνεται μέχρι να φτάσει πολύ κοντά στην κεφαλή και κάθε φορά που εκτυπώνεται ένα στρώμα της κατασκευής, η πλατφόρμα κατεβαίνει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται, υπάρχει πιθανότητα παραμόρφωσης λόγω του ότι η βάση της κατασκευής συρρικνώνεται κατά την ψύξη, με αποτέλεσμα να παρασύρει και να παραμορφώνει και τα άλλα επίπεδα που εκτυπώνονται εκείνη την στιγμή. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιείται μια βάση τύπου heated-bed, που διαθέτει σύστημα θέρμανσης, αυτή παραμένει θερμή κι επομένως δεν προκαλούνται τέτοιου είδους προβλήματα. Προτείνεται να χρησιμοποιείται για υλικά όπως το ABS.



Εικόνα 14: Απεικόνιση των βασικών τμημάτων ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή τύπου FDM διπλής κεφαλής

Στιγμιότυπο από: (Kalle, 2022)



Εικόνα 15: Απεικόνιση λειτουργίας του εξωθητή του τρισδιάστατου εκτυπωτή FDM

Πηγή: (Budinski et al., 2019)

2. Σύγχρονες τάσεις και προκλήσεις

2.1 Σύγχρονες τάσεις

Σε αυτή την ενότητα για την παρακολούθηση των σύγχρονων τάσεων στο χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον, θα χρησιμοποιηθούν στατιστικά δεδομένα από τα αποτελέσματα της έρευνας της *Stratasys (Top Challenges To Widespread 3D Printing Adoption | Stratasys Direct, 2018)*. Η επιχείρηση αυτή παίζει έναν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη διάδοση και την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας.

Πιο συγκεκριμένα, η εταιρία *Stratasys* είναι μια από τις πιο επιτυχημένες επιχειρήσεις σε ολόκληρο τον κόσμο. Ιδρύθηκε από τον *S. Scott Crump*, τον εφευρέτη της τεχνολογίας *Fused Deposition Modeling (FDM)*, που είναι μια από τις πρώτες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η *Stratasys* στελεχώνεται από επαγγελματίες και πρωτοπόρους της τεχνολογίας *Polyjet* και στερεολιθογραφίας. Οι στατιστικές έρευνες που είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα της επιχείρησης αυτής, χρησιμοποιήθηκαν ως πρότυπο για την καταγραφή και παρακολούθηση των σύγχρονων τάσεων, που διαφαίνονται στο πεδίο της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στο περιβάλλον της βιομηχανίας.

2.1.1 Τομείς που εφαρμόζουν την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Από την έρευνα της Stratasys του 2018 φαίνεται πως τομείς που κάνουν χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι οι παρακάτω:

- Βιομηχανία κατασκευής καταναλωτικών προϊόντων
- Βιομηχανία παραγωγής ενέργειας
- Βιομηχανία κατασκευής βιομηχανικού εξοπλισμού
- Βιομηχανία αεροδιαστημικής
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Ιατρική
- Υπηρεσίες design

Ωστόσο με βάση πρόσφατες έρευνες, και άλλοι τομείς αρχίζουν να ενδιαφέρονται για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως η αρχιτεκτονική (*Journal of Building Engineering*, n.d.), η βιομηχανία τροφίμων (Sandeep et al., 2021), η βιομηχανία υφασμάτων (Sandeep et al., 2021) η οποία είναι πολύ στενά συνδεδεμένη με την αθλητική και με την βιομηχανία μόδας. Επίσης, και άλλες βιομηχανίες, όπως των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών (Park et al., 2022, p. 68) αλλά και ο τομέας διαχείρισης αστικών λυμάτων (Mohd Yusoff et al., 2022) έχουν δημοσιεύσει έρευνες που αφορούν την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2.2.2 Οι πιο δημοφιλείς τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον

Όπως ήδη αναφέρθηκε, αν και κάθε τομέας μπορεί να χρησιμοποιεί την τρισδιάστατη εκτύπωση για την κατασκευή τελείως διαφορετικών αντικειμένων τα οποία ποικίλουν και μπορούν να περιλαμβάνουν από εξαρτήματα, ηλεκτρικά κυκλώματα, υφάσματα, μέχρι και κτίρια η μέθοδος κατασκευής αυτών είναι τις περισσότερες φορές παρόμοια.

Μελετώντας τις στατιστικές της Stratasys το 2018, φαίνεται πως η προτίμηση στις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης σε κάθε τομέα έχει ως εξής:

- Τεχνολογία Material Jetting 25%
- Τεχνολογία Vat Photopolymerisation 25%
- Τεχνολογία Plastic Powder Bed Fusion 19%
- Τεχνολογία Material Extrusion 17%
- Τεχνολογία Metal Powder Bed Fusion 12%

Επομένως, τα στοιχεία δείχνουν ότι οι επικρατέστερες τεχνολογίες είναι της Material Jetting και της Photopolymerization. Το γεγονός αυτό εξηγείται με βάση την ευκολία εφαρμογής και την αποτελεσματικότητα αυτών των τεχνολογιών.

Η τεχνολογία Material Jetting είναι παρόμοια με την συνηθισμένη τεχνολογία Inkjet Printing. Αξίζει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη χρησιμοποιούμενη ορολογία, καθώς πολλές φορές η τεχνολογία Material Jetting σε επιστημονικά έγγραφα αναφέρεται από τους συγγραφείς ως Inkjet Printing ή και Polyjet. Σύμφωνα με την αρθρογραφία (Designer, n.d.) η ονομασία Polyjet χρησιμοποιείται γιατί ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής τύπου Material Jetting που είχε κυκλοφορήσει είχε το όνομα Polyjet.

Αυτή η πληροφορία ίσως δικαιολογεί το γεγονός ότι η τεχνολογία αυτή είναι τόσο δημοφιλής, καθώς θεωρείται συνέχεια και εξέλιξη της γνωστής τεχνολογίας Inkjet.

Τεχνολογία Material Extrusion

Ο λόγος για τον οποίο η τεχνολογία Material Jetting είναι δημοφιλής οφείλεται στη δυνατότητα εφαρμογής της σε πολλούς τομείς. Με βάση πρόσφατες έρευνες πρόκειται στο μέλλον να έχει περισσότερες εφαρμογές στην Οδοντιατρική και στην Ιατρική λόγω της αποδοτικότητας της στην εκτύπωση εξαρτημάτων που αποτελούνται από περισσότερα από ένα είδος υλικού (Salmi, 2021). Επιπλέον, η μέθοδος αυτή στον ιατρικό τομέα πρόκειται να αλλάξει τον τρόπο εκπαίδευσης του ιατρικού προσωπικού, καθώς μέσω της κατασκευής ιατρικών εκπαιδευτικών μοντέλων υψηλής ποιότητας θα προαγάγει την παραγωγικότητα και αποτελεσματικότητα των δράσεων του προσωπικού, όπως αναφέρουν οι (Spencer & Kay Watts, 2020) και (Tyagi et al., 2022).

Άλλος τομέας που κάνει χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι ο τομέας ηλεκτρονικών, όπου η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης φαίνεται να διευκολύνει την διαδικασία κατασκευής πλακετών κυκλωμάτων λόγω της μεγάλης ευκολίας προσαρμογής που διαθέτει και της δυνατότητας παραγωγής προϊόντων για εύκαμπτα ηλεκτρονικά (Park et al., 2022). Επίσης η εξέλιξη της μεθόδου Material Jetting σε αυτό τον τομέα έχει φτάσει σε επίπεδο όπου είναι δυνατή η εκτύπωση ηλεκτρονικών όπως είναι τρανζίστορ, πυκνωτών και πηνίων (Zhang et al., 2019).

Ένα μεγάλο ποσοστό των ερωτηθέντων που κάνουν χρήση της τεχνολογίας αυτής φαίνεται να είναι μέλη του τομέα της βιομηχανίας αεροδιαστημικής, σύμφωνα με την έρευνα της Stratasys. Αυτός ο τομέας κερδίζει σημαντικά έδαφος σε σχέση με άλλους και προκαλεί σε μεγάλο βαθμό αλλαγές στο χώρο εργασίας και την διαδικασία παραγωγής. Μια από τις βιομηχανίες αεροδιαστημικής είναι η Relativity Space που βασίζεται σχεδόν ολοκληρωτικά στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή των πυραύλων της. Ένας βασικός λόγος για αυτή την τάση μπορεί να είναι ότι αυτός ο τομέας είναι συνεχώς μεταβαλλόμενος αφού βασίζεται στη συνεχή και εκτενή έρευνα για την λύση προβλημάτων που δεν

σταματούν ποτέ να προκύπτουν. Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό (selling point) αυτής της τεχνολογίας είναι και η ποιότητα της επιφάνειας που αποδίδει λόγω της μεγάλης ακρίβειας της εκτύπωσης (Designer, n.d.). Σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν κατασκευάζει το προϊόν σε διαφορετικά επίπεδα, που προκαλούνται από τις αλληπάλληλες στρώσεις υλικού, κάτι που είναι εξαιρετικά σημαντικό για την βιομηχανία αεροδιαστημικής.

Τεχνολογία Vat Photopolymerisation

Η δημοτικότητα της τεχνολογίας Vat Photopolymerisation οφείλεται κυρίως σε ορισμένους από τους τομείς που κάνουν χρήση της τεχνολογίας Material Jetting. Τα κύρια σημεία στα οποία αυτές οι δύο τεχνολογίες διαφέρουν, είναι στο ότι η τεχνολογία Material Jetting μπορεί να κάνει χρήση μεταλλικών υλικών, χαρακτηριστικό που την καθιστά κατάλληλη για την κατασκευή εξαρτημάτων και μηχανών. Αντιθέτως η τεχνολογία Vat Photopolymerization δεν έχει αυτή τη δυνατότητα, ωστόσο είναι εξειδικευμένη στη χρήση πολυμερών υλικών για την κατασκευή αντικειμένων με πολύ μεγάλες λεπτομέρειες, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές της βιοϊατρικής (για την κατασκευή τεχνητών μελών και οργάνων) (Salmi, 2021). Στις μέρες μας γίνονται μεγάλες προσπάθειες για την ανάπτυξη μη τοξικών ρητινών για την εξασφάλιση της βιοσυμβατότητας των κατασκευών που έρχονται σε επαφή με το σώμα (Pagac et al., 2021).

Άλλος λόγος για τον οποίο αυτή η τεχνολογία είναι τόσο δημοφιλής και ανταγωνίζεται με την τεχνολογία Material Jetting είναι η προσβασιμότητά της. Η τεχνολογία Material Jetting δεν είναι προσβάσιμη στους απλούς καταναλωτές, καθώς η χρήση της απευθύνεται μόνο σε βιομηχανικά περιβάλλοντα που διαθέτουν εργαστήρια με μηχανές μεγάλου κόστους. Αντιθέτως η τεχνολογία Vat Photopolymerization, όπως και η τεχνολογία FDM (Fillament Deposition Modeling) είναι προσβάσιμη στους απλούς καταναλωτές καθώς έχει χαμηλό κόστος. Αυτή η τεχνολογία είναι γνωστή στο ερασιτεχνικό περιβάλλον ως το κύριο μέσο για να κατασκευάζονται φιγούρες και μινιατούρες με εξαιρετική λεπτομέρεια λόγω της λείας

επιφάνειας που μπορεί να αποδώσει. Παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας φαίνονται στην εικόνα 16.



Εικόνα 16: Φιγούρες κατασκευασμένες με τη χρήση της τεχνολογίας Vat Polymerization.

Στιγμιότυπα από : (Hellstorm Wargaming, 2021)

Ένας από τους τομείς που έχει επηρεάσει πολύ αυτή η τεχνολογία, είναι ο τομέας κατασκευής κοσμημάτων, όπως θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2.3 Τρόποι αξιοποίησης (χρήσης) της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον

Με βάση την επισκόπηση της Stratasys φαίνεται πως το μεγαλύτερο ποσοστό των ερωτηθέντων κάνει χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω εξωτερικής ανάθεσης, με τη δεύτερη θέση να κατέχει η χρήση ιδιόκτητων εκτυπωτών τύπου desktop και μόνο στην τρίτη θέση να βρίσκεται η χρήση ιδιόκτητων εκτυπωτών βιομηχανικού τύπου. Στην τέταρτη θέση που αντιστοιχεί το 4% των ερωτηθέντων δεν γίνεται ακόμη καθόλου χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Η χρήση της εξωτερικής ανάθεσης (outsourcing) είναι πιο συμφέρουσα λύση από οικονομική άποψη σε σχέση με την χρήση ιδιωτικού (inhouse) τρισδιάστατου εκτυπωτή βιομηχανικού τύπου και την αγορά εξειδικευμένου και ακριβού εξοπλισμού. Η μεγάλη τάση χρήσης της μεθόδου outsourcing/εξωτερικής ανάθεσης, αποδεικνύεται από το μέγεθος των υπηρεσιών που προσφέρουν εξειδικευμένες επιχειρήσεις αυτού του τύπου. Τα makerspaces αποτελούν τέτοιες επιχειρήσεις όπου μπορούν να συμμετέχουν και εθελοντικές οργανώσεις που χρηματοδοτούνται από το κράτος (Kantaros et al., 2022). Για τις βιομηχανίες αυτές οι λύσεις δεν είναι μόνο συμφέρουσες από οικονομική άποψη αλλά αποτελούν και μια μέθοδο προσέλκυσης και εντοπισμού εξειδικευμένου προσωπικού, που διαθέτει κατάλληλες γνώσεις και δεξιότητες, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για πρόσληψη (*Top Challenges To Widespread 3D Printing Adoption | Stratasys Direct, 2018*).

Αυτές οι επιχειρήσεις μπορεί να χρησιμοποιούν τρισδιάστατους εκτυπωτές τύπου desktop ή βιομηχανικού τύπου (Kantaros et al., 2022).

Φαίνεται λοιπόν, ότι ενώ η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης άνοιξε το δρόμο στις μικρές επιχειρήσεις να εισαχθούν δυναμικά στο βιομηχανικό περιβάλλον, η μέθοδος "outsourcing" διευκολύνει ακόμα περισσότερο αυτή τη διαδικασία.

2.2.4 Σύγχρονες χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον

Ολοκληρώνοντας την επισκόπηση της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον, αξίζει να αναφερθούν και οι κυριότερες χρήσεις της σε πολλούς και διαφορετικούς τομείς.

Με βάση τα στατιστικά της *Stratasys (Top Challenges To Widespread 3D Printing Adoption / Stratasys Direct, 2018)* φαίνεται πως οι πιο συνηθισμένες χρήσεις αυτής της τεχνολογίας αναφέρονται στην κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων (Functional Prototyping), για την κατασκευή μοντέλων, και για την κατασκευή βοηθητικών κατασκευαστικών εργαλείων (Manufacturing aids). Ένα μικρότερο ποσοστό ερωτηθέντων κάνει χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή εξαρτημάτων/τμημάτων του τελικού προϊόντος.

2.2.4.1 Κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων (Functional prototyping) και σχεδιαστικών μοντέλων (concept modeling)

Οι κύριες χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων και η κατασκευή σχεδιαστικών μοντέλων σε πολύ μικρό χρόνο. Και οι δυο χρήσεις συντελούν στην αύξηση της παραγωγικότητας αλλά και της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η συστηματική διαδικασία παραγωγής μοντέλων και πρωτοτύπων με μεθόδους όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση λέγεται και γρήγορη πρωτοτυποποίηση (Rapid prototyping) (Alexandra, 2020).

Αν και οι διαφορές μεταξύ αυτών των δυο δεν είναι πάντα εμφανείς και διακριτές, μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

Λειτουργικό πρωτότυπο: Το λειτουργικό πρωτότυπο αποτελεί ένα πρώιμο δείγμα του τελικού προϊόντος, όμοιο με αυτό και χρησιμοποιείται για το τελικό προϊόν και χρησιμοποιείται για την εξέταση της λειτουργικότητας, καθώς και για την αντοχή και την καταλληλότητα του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο τελικό προϊόν (Staff, 2016), (ELENO Engineering Learning Center, 2019).

Σχεδιαστικό μοντέλο (model) : Δημιουργείται για να δοκιμάσει μια ιδέα ή μια διαδικασία και χρησιμοποιείται για την εξέταση συγκεκριμένων πτυχών και λεπτομερειών (Staff, 2016), (ELENO Engineering Learning Center, 2019).

Σε σχέση με άλλους παραδοσιακούς τρόπους γρήγορης προτυποποίησης, η χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης γίνεται όλο και πιο δημοφιλής για εφαρμογές σε πολλούς τομείς για λόγους όπως η μεγαλύτερη ταχύτητα κατασκευής, το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε σχέση με παραδοσιακούς μηχανισμούς CNC (computer numerical control) και η ευελιξία που προσφέρει (Prashar et al., 2022, p. 7). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή της διαδικασίας εξωτερικής ανάθεσης και θα εξασφαλίζει την προστασία από τον κίνδυνο διαρροής σημαντικών πληροφοριών και σχεδίων της εταιρίας, κάτι που μπορεί να συμβεί κατά την χρήση εξωτερικών αναθέσεων, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η βιομηχανία επιθυμεί να δοκιμάσει πολλές σειρές πρωτοτύπων.

2.2.4.2 Βοηθητικά κατασκευαστικά εργαλεία (Manufacturing aids)

Ένας πολύ σημαντικός τομέας από τον οποίο εξαρτώνται σχεδόν όλοι οι βιομηχανικοί τομείς είναι ο τομέας της βιομηχανίας κατασκευής βοηθητικών κατασκευαστικών εργαλείων (tool manufacture). Αυτός ο τομέας είναι υπεύθυνος για την κατασκευή των καλουπιών, εργαλείων και ακόμα και μηχανών που πρέπει να είναι εξειδικευμένα για την διαδικασία παραγωγής προϊόντων της αντίστοιχης βιομηχανίας.

Ο τομέας αυτός παίζει τον πρώτο και τον σημαντικότερο ρόλο στη διαδικασία παραγωγής ενός προϊόντος. Είναι υπεύθυνος για μια μεγάλη και περίπλοκη λειτουργία που είναι απαραίτητη σχεδόν σε κάθε βιομηχανικό τομέα.

Επομένως, όποτε μια βιομηχανία αποφασίζει ένα νέο design πρέπει να το εξετάσει αυτός ο τομέας. Όποτε χρειάζεται να κατασκευαστεί ένα νέο εργαλείο ή εξάρτημα μηχανής, θα πρέπει να το γνωρίζει και να επεμβαίνει άμεσα αυτός ο τομέας.

Η φύση του βιομηχανικού περιβάλλοντος τείνει πάντα να συντομεύει τις διαδικασίες παραγωγής, οπότε και πάλι η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης φαίνεται να μπορεί να παίξει ένα ξεχωριστό ρόλο. Εδώ η τρισδιάστατη εκτύπωση φαίνεται να κάνει ήδη μεγάλες αλλαγές. Μέσω της χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης η βιομηχανία μπορεί να συντομεύσει τις διαδικασίες παραγωγής με την εγκατάσταση και λειτουργία ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή, που μπορεί να ανταγωνιστεί τη χρήση των CNC μηχανών.

Ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε project μιας βιομηχανίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η ανάλογη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης, που θα μπορεί να παρέχει υπηρεσίες στον τομέα κατασκευής βοηθητικών εργαλείων.

Εταιρίες όπως η Stratasys κατασκευάζουν και προσφέρουν τρισδιάστατους εκτυπωτές που ειδικεύονται στην κατασκευή βοηθητικών, εργαλείων που μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τομείς μέσα στην βιομηχανία (SYS Systems, 2020).

Παραδείγματα εφαρμογής της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή βοηθητικών κατασκευαστικών εργαλείων με βάση τους (Camuel, 2015) και (3D Printing Manufacturing Aids & Tools - YouTube, n.d.) φαίνονται στις εικόνες 17, 18, 19, 20.

Ωστόσο, ενώ είναι δύσκολο για μια βιομηχανία να αποφασίσει να εγκαταστήσει έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή λόγω του κόστους του, η αγορά του θα προσέφερε μεγαλύτερη ελευθερία στη διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής προϊόντων και σχετική ανεξαρτησία.



Εικόνα 17: Εργαλείο κατασκευασμένο με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης για την διευκόλυνση επαναλαμβανόμενων κινήσεων κατά την εγκατάσταση εξαρτημάτων σε αυτοκίνητο

Στιγμιότυπο από: (Camuel, 2015b)



Εικόνα 18: Εργαλείο κατασκευασμένο με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης για την υποβοήθηση χρήσης τρυπανιού

Πηγή: (Replacing Machined Jigs and Fixtures With 3D Printed Parts, n.d.)



Εικόνα 19: Θήκη κατασκευασμένη με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Πηγή : (Replacing Machined Jigs and Fixtures With 3D Printed Parts, n.d.)



Εικόνα 20: Εργαλείο κατασκευασμένο με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης για την βαθμονόμηση της θέσης του

Στιγμιότυπο από: (Camuel, 2015b)

2.2 Σύγχρονες προκλήσεις

Έχοντας μελετήσει τις τάσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης του βιομηχανικού περιβάλλοντος θα μπορούσε κανείς να επικεντρωθεί στην αντιμετώπιση των εμφανιζόμενων προκλήσεων που σε ένα βαθμό τροφοδοτούν και τις παραπάνω τάσεις.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει προκαλέσει άμεσα ή έμμεσα αλλαγές στο βιομηχανικό περιβάλλον. Άμεσα με την έννοια των αποφάσεων που παίρνουν τα διευθυντικά στελέχη της επιχείρησης για την υιοθέτηση της τρισδιάστατης τεχνολογίας στον τομέα τους και έμμεσα με την έννοια της συνειδητοποίησης πως η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί πλέον μια από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις στα προβλήματα ανταγωνισμού.

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο αυτή την εποχή, που είναι μεταβατική προς ένα πιο σύγχρονο και αποδοτικό βιομηχανικό περιβάλλον.

Ωστόσο για την επίτευξη αυτής της μετάβασης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι προκλήσεις και τα εμπόδια που σχετίζονται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης και αφορούν κυρίως τις βιομηχανίες.

2.3.1 Κόστος εξοπλισμού και σχεδιασμός του μοντέλου παραγωγής

Ένα εμπόδιο για τις βιομηχανίες που θέλουν να κάνουν αυτή την μετάβαση προς τον κόσμο της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι το ρίσκο απώλειας κέρδους εάν επενδύσουν στις νέες τεχνολογίες.

Ερώτημα πρώτο: Ποια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να εγκατασταθεί και να εφαρμοστεί με βάση την διαδικασία παραγωγής της συγκεκριμένης βιομηχανίας;

Αναλόγως την βιομηχανία θα πρέπει να εξεταστεί εάν τα υλικά για την παραγωγή του προϊόντος της είναι συμβατά με κάποια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στη συνέχεια θα πρέπει να αποφασιστεί ο τύπος του τρισδιάστατου εκτυπωτή που πρόκειται να εγκατασταθεί. Αυτός ο εκτυπωτής θα πρέπει να μπορεί να κατασκευάσει το προϊόν αποτελεσματικά, δηλαδή να επιτρέπει την κατασκευή του προϊόντος στις επιθυμητές διαστάσεις, κάτι που εξαρτάται από το μέγεθος του εκτυπωτή και πιο συγκεκριμένα από την πλατφόρμα εκτύπωσης και το χαρακτήρα του εκτυπωτή γενικά.

Products can only be built to the size of the build envelope, which means that it might not be possible to build some products using additive manufacturing technologies without enlarging the build envelope (Thomas & Gilbert, 2014).

Αφού ληφθούν αυτές οι αποφάσεις θα πρέπει να υπολογιστεί το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του κατάλληλου εξοπλισμού. Επιπλέον προτείνεται να προηγηθεί δοκιμή για να αν ο επιλεγμένος εξοπλισμός είναι πράγματι πιο συμφέρων από οικονομική άποψη σε σχέση με τον παρόντα (Prashar et al., 2022, p. 12).

Σύμφωνα με τον (Pereira et al., 2019, p. 16), για μοντέλα μεγάλης παραγωγής προϊόντος η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν είναι πάντα αποτελεσματική, ωστόσο αν πρόκειται για την κατασκευή περίπλοκων σχεδίων και μοντέλων χαμηλής παραγωγής, η τρισδιάστατη εκτύπωση θεωρείται πράγματι αποτελεσματική.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι βιομηχανίες που βασίζονται στην παραγωγή προϊόντων από πλαστικό είναι πιο πιθανό να κάνουν ευκολότερα την μετάβαση στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, αφού το πρόβλημα αναφέρεται κυρίως στο κόστος αγοράς και λειτουργίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών βιομηχανικού τύπου που χρησιμοποιούν μεταλλικά υλικά (Ben, 2022).

While the trends in machine costs are generally downward, large differences remain between the costs for polymer-based systems and metal-based systems, and the tremendous growth in sales of low-cost, polymer-based systems during this time has strongly influenced the average selling price of additive manufacturing systems (Thomas & Gilbert, 2014, p. 20).

Ένα μεγάλο ποσοστό επιχειρήσεων όμως, όπως έχει αναφερθεί, κάνει χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω εξωτερικής ανάθεσης (*Top Challenges To Widespread 3D Printing Adoption | Stratays Direct, 2018*). Αυτή η επιλογή θα μπορούσε να θεωρηθεί και ως μια λύση τουλάχιστον για μικρές επιχειρήσεις που θα ήθελαν να δοκιμάσουν και να κάνουν το πρώτο τους βήμα στον βιομηχανικό κόσμο.

Ερώτημα δεύτερο: Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης πρόκειται να αντικαταστήσει εξολοκλήρου την διαδικασία παραγωγής ή μόνο κάποια συγκεκριμένη διαδικασία;

Η απόφαση αυτή δεν αφορά μόνο την πλήρη μετάβαση. Είναι δυνατή και η μερική εγκατάσταση αυτής της τεχνολογίας, για παράδειγμα η κύρια χρήση αυτής με σύμφωνα με την

πηγή (*Top Challenges To Widespread 3D Printing Adoption | Strataysys Direct, 2018*) είναι για την κατασκευή βοηθητικών εργαλείων. Σε αυτή την περίπτωση η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά στη διαδικασία παραγωγής μιας βιομηχανίας που κάνει χρήση παραδοσιακής τεχνολογίας για την αύξηση της αποτελεσματικότητάς της.

Υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα της εξολοκλήρου αντικατάστασης της διαδικασίας παραγωγής, που μπορεί να προσφέρει μεγάλη ευελιξία και αυτονομία σε μια βιομηχανία αφού στην ουσία μπορεί να μειώσει κατά πολύ όχι μόνο τον αριθμό των σταδίων των διαδικασιών επεξεργασίας, αλλά και να αντικαταστήσει ένα μεγάλο τμήμα της αλυσίδας εφοδιασμού. Λόγω της δυνατότητας κατασκευής εξαρτημάτων, τμημάτων αλλά και ολόκληρου προϊόντος με την χρήση ενός εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης, τομείς της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως της κατασκευής εργαλείων και εξοπλισμού (tool manufacturing) μπορούν να καλυφθούν από την ίδια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του κόστους αποθήκευσης και μεταφοράς των κατασκευασμένων εξαρτημάτων και τμημάτων που πρόκειται να συναρμολογηθούν σε άλλο τομέα της παραγωγής. Ωστόσο όλες αυτές οι θεωρίες εξοικονόμησης εξόδων ανταγωνίζονται ακόμη με το κόστος εγκατάστασης αυτής της τεχνολογίας που εξαρτάται από το μοντέλο παραγωγής της κάθε βιομηχανίας.

Ερώτημα τρίτο: Η τεχνολογία τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αυξήσει μακροπρόθεσμα το κέρδος σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες; Μπορεί να ωφελήσει με άλλο τρόπο την επιχείρηση;

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει δείξει τα τελευταία χρόνια πως εξελίσσεται πολύ γρήγορα, μαζί της όμως εξελίσσεται και όλο το βιομηχανικό περιβάλλον, που γνωρίζοντας ότι βαδίζει προς τον αυτοματισμό και στην ευελιξία κατασκευής προϊόντων, ίσως αυτή η χρονική στιγμή είναι η κατάλληλη για τέτοιου είδους επενδύσεις. Ένας λόγος επένδυσης μπορεί να είναι ότι αυτή η τεχνολογία σύμφωνα με πολλούς όπως (Kubáč & Kodym, 2017) φαίνεται να οδηγεί το βιομηχανικό περιβάλλον προς το μοντέλο print on demand, δη-

λαδή να προσφέρει υπηρεσίες που να επιτρέπουν στους πελάτες να παραγγέλνουν το προϊόν τους προσαρμοσμένο στις επιθυμίες τους. Επιπλέον ίσως στο μέλλον να υπάρχει η δυνατότητα παραγγελίας ή κατασκευής του προϊόντος μέσω προσωπικού τρισδιάστατου εκτυπωτή ή μέσω κάποιου καταστήματος ή εργαστηρίου που διαθέτει έναν εκτυπωτή στην περιοχή του καταναλωτή.

Σίγουρα αυτή η τεχνολογία μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας επεξεργασίας, είτε αυτό θα γίνεται μέσω της κατασκευής βοηθητικών εργαλείων ή μέσω της απλούστευσης του τρόπου κατασκευής πρωτοτύπων.

2.2.1 Μόνιμη εγκατάσταση και εξωτερική ανάθεση (Inhouse vs outsource)

Μια καινούρια πρόκληση που εμφανίζεται είναι η επιλογή μεταξύ χρήσης της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω εξωτερικής ανάθεσης και της μόνιμης εγκατάστασης. Πέρα από το θέμα του κόστους, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν και άλλοι λόγοι που επηρεάζουν αυτή την απόφαση.

Κάτι που κάνει αμφίβολη την χρήση εξωτερικής ανάθεσης σε υπηρεσία που προσφέρει την κατασκευή τμημάτων και εξαρτημάτων μέσω της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι ο κίνδυνος εξάρτησης από τον εξωτερικό φορέα και της κλοπής ή διαρροής των σχεδίων και παραμέτρων που χρησιμοποιεί η βιομηχανία. Αυτό μπορεί να κρύβει τον κίνδυνο να υπάρξουν περιπτώσεις παράνομης αντιγραφής που μπορεί να στοιχίσει στον ανταγωνισμό, ειδικά αυτόν τον καιρό που δεν υπάρχουν ακόμη σταθερά πρωτότυπα παραγωγής ή σταθερή διαδικασία επεξεργασίας.

Ωστόσο, ανεξάρτητα αν υπάρχουν αυτές οι αμφιβολίες ή όχι, τα θετικά στοιχεία που παρέχει μία συνεργασία με τις υπηρεσίες εξωτερικής ανάθεσης ξεπερνούν τα αρνητικά. Μια συνεργασία με τις υπηρεσίες εξωτερικής ανάθεσης μπορεί να προσφέρει γνώσεις και εκπαίδευση στο προσωπικό, έτσι ώστε αυτό να μπορεί να προσαρμοστεί στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Επιπλέον μπορεί να είναι και αφορμή για πρόσληψη προσωπικού με τις κατάλληλες δεξιότητες και γνώσεις.

Οι (Friedrich et al., 2022, p. 644) στηρίζονται στο επιχείρημα πως οι επιχειρηματίες θα πρέπει να εξετάσουν την κατάσταση και να αποφασίσουν αν το ρίσκο μιας τέτοιας συνεργασίας ξεπερνάει το ρίσκο της δημιουργίας αξιόπιστων σχέσεων με άλλους σταθερούς εταίρους που μπορούν να βοηθήσουν την εξέλιξη της βιομηχανίας. Επιπλέον αναφέρουν πως πάροχοι λογισμικού τρισδιάστατης εκτύπωσης, κατασκευαστές τρισδιάστατων εκτυπωτών και ειδικοί στην βιομηχανία τρισδιάστατης εκτύπωσης συμφωνούν πως υπάρχουν τεχνολο-

γίες ψηφιακής ασφάλειας, που μπορούν να εφαρμοστούν για την αποφυγή αντιγραφών και απομιμήσεων από τρίτους. Ίσως με την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών η επιλογή χρήσης εξωτερικής ανάθεσης να μην είναι τόσο δύσκολη.

Οι (Friedrich et al., 2022, p. 644) συμφωνούν επιπλέον πως η στρατηγική της εξωτερικής ανάθεσης σε σχέση με την επιλογή μιας μόνιμης εγκατάστασης μειώνει την πιθανότητα απρόβλεπτων εξόδων σε περίπτωση που η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν εφαρμόζεται όπως αναμένεται.

Βλέποντας την έρευνα της Stratasis (*Top Challenges To Widespread 3D Printing Adoption / Stratasis Direct, 2018*) μπορεί κανείς να καταλάβει πως το θέμα έλλειψης προσωπικού με γνώσεις πάνω στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί μια πρόκληση. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, το μεγαλύτερο ποσοστό των όσων ερωτήθηκαν προτιμά να προσλάβει εργαζόμενους με γνώσεις πάνω στα συστήματα ή να εκπαιδεύσει το υπάρχον προσωπικό επάνω σε αυτή την τεχνολογία. Ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό δηλώνει επίσης ότι σκοπεύει να συνεργαστεί με υπηρεσίες εξωτερικής ανάθεσης.

Αξίζει να σημειωθεί όμως πως εταιρίες και βιομηχανίες που είναι αποφασισμένες να κάνουν την μετάβαση σε αυτήν την τεχνολογία γρήγορα, ασφαλώς και ανεξάρτητα, θα πρέπει να έχουν προσωπικό εκπαιδευμένο κατάλληλα και να έχουν προσχεδιασμένο το πρωτότυπο παραγωγής που πρόκειται να ακολουθήσουν. Αυτός ο τρόπος αν και περιλαμβάνει ρίσκο, μπορεί να παρέχει μία πολύ καλή ανταγωνιστική θέση στη συγκεκριμένη επιχείρηση, καθώς και μεγάλη αναγνώριση από το μελλοντικό βιομηχανικό και εμπορικό περιβάλλον.

2.3 Υλικά

Αν και τα υλικά που είναι συνεχώς σε ζήτηση στον κόσμο της Τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τα μεταλλικά και τα πολυμερή, σε αυτή την εργασία θα γίνει προσπάθεια να αναφερθούν νέα καινοτόμα υλικά που στοχεύουν στην αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων.

Αξίζει να σημειωθεί πως ακόμη και η απλή εφαρμογή αυτών των υλικών όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, αποτελεί μία πρόκληση από μόνη της, καθώς συνήθως δημιουργεί την ανάγκη αντικατάστασης του συμβατού μοντέλου του τρισδιάστατου εκτυπωτή με κάποιο άλλο πιο σύγχρονο, για την πιο αποτελεσματική εκτύπωση του νέου / καινοτόμου υλικού.

2.3.1 Κεραμικά υλικά

Ένα από τα υλικά που εξακολουθούν να ερευνώνται και βρίσκονται στο πειραματικό στάδιο για τη χρήση στην τεχνολογία της τρισδιάστατη εκτύπωσης είναι τα κεραμικά.

Ωστόσο για την επίτευξη της προσθετικής μεθόδου με την χρήση κεραμικών υλικών απαιτείται να χρησιμοποιείται τρισδιάστατος εκτυπωτής προσαρμοσμένος στην συγκεκριμένη εργασία. Για αυτό το λόγο οι κατασκευαστές έχουν αρχίσει να κατασκευάζουν τρισδιάστατους εκτυπωτές εξειδικευμένους για την εκτύπωση κεραμικών υλικών.

Η εκτύπωση κεραμικών υλικών γίνεται κυρίως με τέσσερις τεχνολογίες. Με την τεχνολογία fused deposition modeling (FDM), με την τεχνολογία Powder Bed Fusion, Selective Laser Sintering και φωτοπολυμερισμό.

Η μέθοδος FDM για την εκτύπωση κεραμικών υλικών απαιτεί εξειδικευμένους εκτυπωτές, που τροφοδοτούνται με πηλό σε ρευστή κατάσταση, ο οποίος εξωθείται με έναν κατάλληλο μηχανισμό πίεσης. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτούνται δυο περισσότερα βήματα σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο, κατά την οποία γίνεται χρήση πολυμερών. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται κατάλληλη προεπεξεργασία του πηλού πριν την εξώθηση αλλά και μετεπεξεργασία της τελικής εκτύπωσης, που αφορά το ψήσιμο του τελικού προϊόντος σε φούρνο για την σκλήρυνσή του. Η μετεπεξεργασία αφορά και τις άλλες μεθόδους εκτύπωσης.

Επομένως, ένας μεγάλος περιορισμός της εφαρμογής τρισδιάστατης εκτύπωσης κεραμικών είναι το κόστος των εκτυπωτών ειδικού τύπου και η ανάγκη χρήσης φούρνου.

Λόγω του υψηλού κόστους της μεθόδου δεν είναι δυνατόν για τον απλό ερασιτέχνη/χομπίστα να αγοράσει έναν τέτοιο εκτυπωτή. Ωστόσο ο κατασκευαστής τρισδιάστατων εκτυπωτών Eazaο κάνει προσπάθειες να κατασκευάσει σχετικά φθηνούς τρισδιάστατους εκτυπωτές

εξώθησης για την εκτύπωση πηλού. Ένα παράδειγμα αποτελεί ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Eazao Zero (Εικόνα 21) που χρηματοδοτήθηκε από την κοινότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Η ανάγκη χρήσης φούρνου περιορίζει επίσης το μέγεθος στο οποίο μπορεί να εκτυπωθεί ένα αντικείμενο. Η εκτύπωση δεν μπορεί να υπερβαίνει το μέγεθος του φούρνου.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία κεραμικών υλικών στην αγορά, ωστόσο τα πιο συνηθισμένα για την χρήση στην μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τα παρακάτω:

Αλουμίνα (οξείδιο του αργιλίου), οξείδιο του ζirkονίου, νιτρίδιο του αλουμινίου, (aluminum nitride), καρβίδιο του πυριτίου και νιτρίδιο του πυριτίου (silicon nitride) (“3D Printing with Technical Ceramics,” 2020).



Εικόνα 21: Τρισδιάστατος εκτυπωτής κεραμικών της Eazao

Πηγή : <https://www.eazao.com/product/eazao-zero/>

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης κεραμικών υλικών έχει παρουσιάσει πολλές νέες ιδέες για την κατασκευή αντικειμένων που με συμβατικές τεχνικές θα ήταν αδύνατον.

Η εταιρία Emerging Objects

Μεγάλος εμπνευστής τέτοιων ιδεών και project είναι η Emerging Objects, μία ιδιωτική εταιρία που εξειδικεύεται στην δημιουργία νέων και καινοτόμων design για την κατασκευή αντικειμένων με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η εταιρία πειραματίζεται με διαφορετικά υλικά και διαφορετικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης για να πετύχει τον σκοπό της. Όσο αφορά το χώρο τρισδιάστατης εκτύπωσης με κεραμικά, η εταιρία είναι εξειδικευμένη στην προσθετική κατασκευή ιδιαίτερων πήλινων αντικειμένων που θα ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί με τις συμβατικές τεχνικές. Σημαντικά project της εταιρίας στα οποία έγινε κατασκευή τέτοιων αντικειμένων είναι τα “Bad Ombré” (*Bad Ombrés v.1 | Emerging Objects, n.d.*) και “Future Relics” (*Future Relics | Emerging Objects, n.d.-a*) όπου κάποιος μπορεί να δει συναρπαστικά αγγεία κατασκευασμένα εξολοκλήρου μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Εικόνα 22,23).

Η εταιρία Emerging Objects έκανε την εμφάνιση της και στην εκδήλωση “Bay Area Maker Fair” το 2018 όπου έκανε επίδειξη των τρισδιάστατων εκτυπωτών της για την κατασκευή πήλινων αντικειμένων (3D Printing Nerd, 2018b). Εκεί ο ιδρυτής της εταιρίας Ronald Rael ανέφερε πώς η κατασκευή των αντικειμένων της, όπως για παράδειγμα ένα βάζο, μπορεί να κατασκευαστεί έως και 8 λεπτά, κάνοντας την διαδικασία κατασκευής πιο γρήγορη ακόμη και από την διαδικασία ψησίματος.



Εικόνα 22: Κατασκευή της καλλιτεχνικής σειράς *Bad Ombre*. Κατασκευασμένο με τρισδιάστατη εκτύπωση πηλού.

Στιγμιότυπο από: (*Bad Ombres v.1 | Emerging Objects, n.d.*) και (*Bad Ombres v.2 | Emerging Objects, n.d.*)



Εικόνα 23: Αγγεία του *Project Future Relics* της *Emerging Objects*

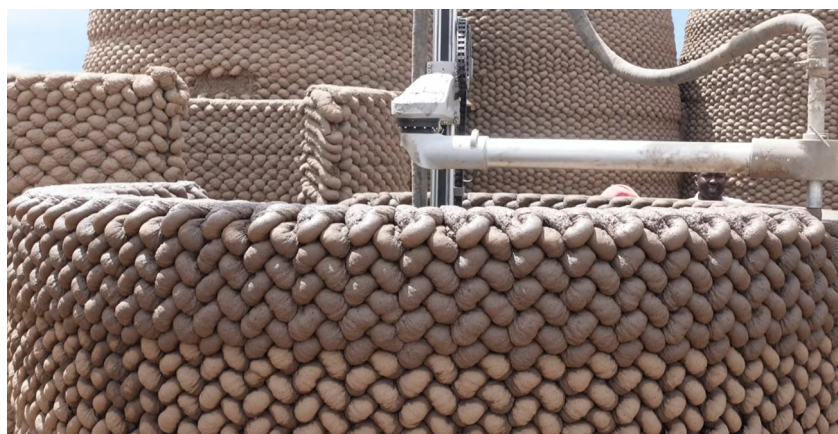
Πηγή: (*Future Relics | Emerging Objects, n.d.-b*)

Η Emerging Objects πειραματίζεται επίσης με την κατασκευή βιώσιμων σπιτιών καλούμενα Casa Covida (Casa Covida | Emerging Objects, n.d.) (Εικόνες 24-25). Τα σπίτια αυτά κατασκευάζονται με την ίδια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται και για την κατασκευή των κεραμικών αντικειμένων, σε αυτή την περίπτωση το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ο πλίνθος. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές, τα σπίτια αυτά είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με ευκολία κάνοντας χρήση ενός ειδικού τρισδιάστατου εκτυπωτή και μιας εφαρμογής που προσφέρει η εταιρία.



Εικόνα 24: Εξωτερικός και εσωτερικός χώρος των σπιτιών Casa Covida της εταιρίας Emerging objects.

Πηγές εικόνων: https://www.archdaily.com/963516/casa-covida-emerging-objects/60cab2a2f91c81e7a0000049-casa-covida-emerging-objects-photo?next_project=no
<http://emergingobjects.com/project/casa-covida/>



Εικόνα 25: Διαδικασία κατασκευής σπιτιών Casa Covida.

Στιγμιότυπο από: (Jarett Gross, 2022)

Architchen

Ενδιαφέρουσες είναι οι περιπτώσεις του studio Architchen του RenJie Huang και HanYuan Tsao. Οι συγκεκριμένοι είναι εξειδικευμένοι στην σχεδίαση και κατασκευή πλακιδίων μέσω τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης όπου αξιοποιώντας τις μαθηματικές τους γνώσεις κατορθώνουν να αποδώσουν μια νέα αισθητική με την χρήση παραμετρικού design (Εικόνα 26).



Εικόνα 26: Πλακίδια κατασκευασμένα με τρισδιάστατη εκτύπωση. Παρουσίαση του παραμετρικού design του ταϊβανέζικου αρχιτεκτονικού στούντιο Architchen.

Στιγμιότυπο από: (Boissonneault, 2018)

Το 2017 το στούντιο Architchen ολοκλήρωσε την κατασκευή του καταστήματος APUJIAN (Εικόνα 27) το οποίο αποτελούνταν από περισσότερους από 1000 λευκούς σωλήνες αλουμινίου και 1300 γκρι κεραμικά πλακάκια. Το κατάστημα APUJIAN βραβεύτηκε ως μία από τις καλύτερες αρχιτεκτονικές κατασκευές και εσωτερικό design στην Ταϊβάν (*APUJIAN Concept Store by Architchen – 3D Clay Printing, 2018*).



Εικόνα 27: Εσωτερική αρχιτεκτονική του καταστήματος Αριujan σχεδιασμένο και κατασκευασμένο από το στούντιο Architchen

Πηγή: (ARUJAN Concept Store by Architchen – 3D Clay Printing, 2018)

Unfold

Η οργάνωση Unfold με την συνεργασία του γραφίστα Tim Knapen ανέπτυξαν λογισμικό κατάλληλο για την κατασκευή και τον έλεγχο λεπτών επιπέδων κατά την εκτύπωση με τρισδιάστατο εκτυπωτή. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται, βασίζεται στο πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα του RepRap project (*Unfold Design Studio*, n.d.). Η εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας έδωσε σε αυτή την οργάνωση (Unfold) την ευκαιρία να αναπτυχθούν πολλά νέα πειράματα και projects (Εικόνες 28,29,30).



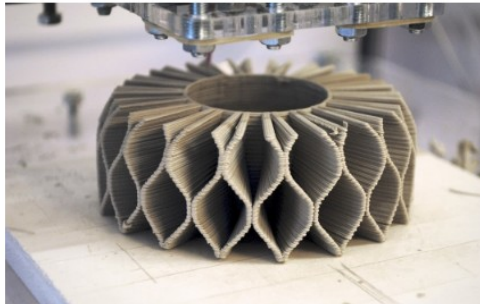
Εικόνα 28: Πειράματα τρισδιάστατης εκτύπωσης κεραμικού υλικού στο Πανεπιστήμιο Alfred

Στιγμιότυπο από: (*Ceramic 3d Printing*, n.d.)



Εικόνα 29: Κούπες κατασκευασμένες με τρισδιάστατη εκτύπωση με τη χρήση κεραμικού υλικού.

Στιγμιότυπο από (*Ceramic 3d Printing*, n.d.)



Εικόνα 30: Διαδικασία κατασκευής και τελικό αποτέλεσμα του project "Artefacts of a new history" με τη χρήση της μεθόδου τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στιγμιότυπο από : (Ceramic 3d Printing, n.d.)

2.3.2 Βιοδιασπώμενα υλικά / biodegradable materials

Μια ενδιαφέρουσα κατηγορία υλικών που εξακολουθούν να μελετώνται από τους ερευνητές είναι τα βιοδιασπώμενα. Το χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι πως προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές, όπως βιομάζα και μπορούν να διασπαστούν στο φυσικό περιβάλλον χωρίς κάποια διεργασία. Ο σκοπός αυτών των υλικών είναι να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά πλαστικά για την μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και την μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων.

Δυστυχώς τα παραπάνω είναι μόνο μια πολύ σύντομη και απλουστευμένη περιγραφή αυτών των υλικών. Μια περιγραφή που δεν περιλαμβάνει περίπλοκες και συχνά εσφαλμένες απόψεις γύρω από αυτά τα υλικά. Πριν κανείς αποφασίσει να χρησιμοποιήσει τα συγκεκριμένα υλικά με την αντίληψη ότι αυτά θα διαλυθούν αυτόματα από το περιβάλλον καλό να ενημερωθεί για τα διάφορα είδη βιοδιασπώμενων υλικών ή βιοπλαστικών και για τον τρόπο με τον οποίο αυτά μπορούν να επιδράσουν θετικά στο περιβάλλον, καθώς επίσης και για το εάν τελικά επιτυγχάνουν το σκοπό τους.

Στη συνέχεια της εργασίας θα γίνει αναφορά σε βιοδιασπώμενα υλικά σε μορφή νήματος που είναι συμβατά μόνο με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM, που φαίνεται να είναι η μόνη που έχει κάνει κάποια πρόοδο στην έρευνα σχετικά με την ανάπτυξη και χρήση νέων βιοδιασπώμενων υλικών.

Ήδη υπάρχει ένας ικανός αριθμός κατασκευαστών που υπόσχονται ότι τα υλικά τους είναι πράγματι βιοδιασπώμενα/κομποστοποιήσιμα. Ωστόσο σπάνια επικοινωνείται σωστά ότι το προϊόν για να διασπαστεί αποτελεσματικά απαιτεί συγκεκριμένο και ελεγχόμενο περιβάλλον, όπως είναι κάποιες συγκεκριμένες εγκαταστάσεις βιομηχανικής κομποστοποίησης. Άλλες φορές επικοινωνείται επίσης δύσκολα το εάν τα καλούμενα βιονήματα είναι κομποστοποιήσιμα, παρασκευασμένα από ανανεώσιμες πηγές ή παρασκευασμένα από ανακυκλώσιμα πλαστικά.

Κάποιοι από τους κατασκευαστές που προσφέρουν κομποστοποιήσιμο βιονήμα είναι η Fillamentum, της οποίας τα NonOilen βιονήματα είναι από τα πιο γνωστά στην κοινότητα. Επίσης, στον ίδιο χώρο δραστηριοποιείται η επιχείρηση B4Plastics που πρόσφατα προσπαθεί να επηρεάσει την FDM τεχνολογία με τα εξαιρετικά οικολογικά πρότυπά της με το βιονήμα COMPOST3D που μπορεί να κομποστοποιηθεί σε οικιακή εγκατάσταση. Επιπλέον η B4Plastics προσφέρει ειδική εφαρμογή που επιτρέπει τον υπολογισμό του χρόνου κομποστοποίησης του νήματος. Ο κατασκευαστής ColorFabb προσφέρει κομποστοποιήσιμα νήματα αλλά και πολλές νήματα με Polyhydroxyalkanoates (PHA) που έχουν ως σκοπό την αύξηση της ευθραυστότητας των υλικών, κάνοντάς τα να διασπώνται πιο εύκολα.

Στον πίνακα 1 αναφέρονται συνοπτικά κάποια από τα πιο γνωστά πλαστικά με τα χαρακτηριστικά τους που θεωρούνται βιοδιασπώμενα για χρήση ως νήμα στην τρισδιάστατη εκτύπωση τύπου FDM.

Ένα από τα πλαστικά που προτείνεται ως βιοδιασπώμενο και χρησιμοποιείται ως βάση για πολλά νήματα είναι το Polylactic acid (PLA). Το PLA εκτός από βιοδιασπώμενο/κομποστοποιήσιμο είναι και από τα πιο φθηνά, συμβατά και αποτελεσματικά νήματα για την FDM τεχνολογία. Ωστόσο πολλά πειράματα έχουν δείξει πως αν και είναι πράγματι κομποστοποιήσιμο, το PLA θα χρειαστεί πολλά χρόνια για να διασπαστεί στο περιβάλλον. Επομένως, ο κύριος λόγος για το οποίο το PLA μπορεί να θεωρηθεί βιοπλαστικό είναι επειδή παρασκευάζεται από βιομάζα.

Πίνακας 1: Τα πιο γνωστά βιοδιασπώμενα πλαστικά

Ανατύπωση του πίνακα από (Campana et al., 2017)

Υλικό	Παράγεται από	Χαρακτηριστικά	Θερμοκρασία εξώθησης	Θετικά	Αρνητικά
Πολυγαλακτικό οξύ (PLA)	Φυτικό άμυλο	Στιβαρό, γερό	160-222°C	Είναι βιοπλαστικό, μη-τοξικό, άοσμο, εμφανίζει μηχανική παραμόρφωση	Χαμηλή αντοχή στη θερμότητα, εύθραυστο
Πολυβινυλική αλκοόλη (PVA)	Πετρέλαιο	Διαλυτό στο νερό, καλές ιδιότητες φραγμού	190-210°C	Βιοδιασπάσιμο ανακυκλώσιμο μη-τοξικό	Ακριβό, αλλοίωση στην υγρασία, απαιτούνται ειδικές συνθήκες συντήρησης
Πολυ-υδροξυ-οξέα (PHA)	Σάκχαρα από βιοσύνθεση	Διάφορα συμπολυμερή, εύθραυστο και γερό	~160°C	Σταθερό στην υπεριώδη ακτινοβολία, ακαμψία	Ελαστικότητα, εύθραυστο
Πολυστυρένιο υψηλής αντοχής σε κρούσεις (HIPS)	Πετρέλαιο	Αντίσταση σε κρούση, διαλυτό σε λεμονένιο, διαλυτός σε λεμονένιο	190-210°C	Βιοδιασπάσιμο, οικονομικό, παρόμοιο με το ABS	Εμφανίζει μηχανική παραμόρφωση, απαιτείται η χρήση θερμαινόμενης βάσης εκτύπωσης
Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)	Πετρέλαιο	Γερό και εύκαμπτο	210-230°C	Εγκεκριμένο από τον FDA	Απορροφάει υγρασία

Το Youtube κανάλι CNC Kitchen (*CNC Kitchen - YouTube, n.d.*) έχει μεγάλη συνεισφορά στην ερευνητική δραστηριότητα της FDM κοινότητας. Σε πείραμα όπου εξετάστηκε η ικανότητα βιοδιάσπασης τεσσάρων διαφορετικών βιοημάτων PLA, όπου τα τρία ήταν εμπορικά ενώ ένα ήταν προϊόν έρευνας, παρατηρήθηκε ότι στη διάρκεια ενός χρόνου και με τη χρήση οικιακής εγκατάστασης κομποστοποίησης, ο βαθμός ικανότητας βιοδιάσπασης ήταν πολύ χαμηλός. Ωστόσο ένα από τα υλικά αυτά, το οποίο ήταν μείγμα PHA/PLA έδειξε αρκετά ση-

μάδια ικανότητας βιοδιάσπασης (CNC Kitchen, 2021) (Εικόνα 31). Στο Youtube κανάλι Makers Mashup (Makers Mashup, 2020) αναφέρεται ένα πείραμα στο οποίο αντικείμενα διαφόρων κατασκευαστών από PLA βυθίζονται σε ένα δοχείο με νερό σε σταθερή θερμοκρασία 70°C για χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας. Παρατηρήθηκε πως τα αντικείμενα διατήρησαν τη μορφή τους αλλά έγιναν εύθρυπτα και καταστρέφονταν εύκολα με την εφαρμογή ακόμη και πολύ μικρής πίεσης (Makers Mashup, 2020).



Εικόνα 31: Εξέταση της βιοδιασπασιμότητας του νήματος Nonoilen της Fillamentum μετά από 100 μέρες μέσα σε οικιακό κομποστοποιητή, από το κανάλι CNC kitchen

Στιγμιότυπο από: (CNC Kitchen, 2022)

Το PVA και το High Impact Polystyrene (HIPS) είναι ίσως από τα πιο επιτυχημένα βιονήματα που παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαδικασία εκτύπωσης. Και τα δύο είναι νήματα στήριξης, δηλαδή χρησιμοποιούνται ως σκελετός της κατασκευής. Ο σκελετός αυτός καταλαμβάνει πολλές φορές το μεγαλύτερο μέρος του όγκου μιας εκτύπωσης αλλά όχι απαραίτητα και της μάζας αυτής, κάτι που εξαρτάται από το βάρος του κύριου αντικειμένου προς εκτύπωση. Ωστόσο αποτελεί ένα μεγάλο κομμάτι της εκτύπωσης που δεν έχει καμία χρήση και το οποίο μετά το πέρας της κατασκευής θα ανακυκλωθεί (αν είναι δυνατόν), θα απορριφθεί ή στην περίπτωση του PVA και HIPS θα διαλυθεί στο νερό ή άλλους διαλύτες. Η χρήση αυ-

τών των δύο υλικών φαίνεται να είναι αξιοσημείωτη και απαραίτητη για την βιωσιμότητα αυτής της τεχνολογίας.

Πολλοί έχουν αναρωτηθεί γιατί αυτά τα υλικά δεν χρησιμοποιούνται ως κύριο νήμα για την εκτύπωση. Καταρχήν το PVA είναι ακριβό υλικό για τους περισσότερους ερασιτέχνες (χομπίστες) και επίσης το τελικό προϊόν αναμένεται να έχει υπερβολικά μικρό χρόνο ζωής αφού το PVA είναι εξαιρετικά υγροσκοπικό και ευαίσθητο. Το κόστος κατασκευής και για τα δύο (σκελετός και αντικείμενο) είναι πολύ υψηλό.

Συμπερασματικά, αποδεικνύεται πως τα βιονήματα βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα βιοπλαστικά υλικά, καλύτερη επικοινωνία μεταξύ κατασκευαστή και καταναλωτή και περισσότερη έρευνα από την πλευρά του καταναλωτή ώστε να κάνει καλύτερες δυνατές επιλογές όσον αφορά τα υλικά και τη χρήση των διαθέσιμων βιονημάτων και την ανάπτυξη των βιώσιμων εφαρμογών της τεχνολογίας FDM.

2.3.3 Νήμα ξύλου / Wood filament

Το νήμα τύπου ξύλου είναι ένα εξαιρετικό υλικό για την κατασκευή αντικειμένων που μοιάζουν να είναι κατασκευασμένα από ξύλο.

Το υλικό αυτό εφαρμόζεται μόνο με την μέθοδο FDM.

Το υλικό είναι σύνθετο και αποτελείται από τη μήτρα (matrix) που είναι μια πολυμερική βάση και μικρά τεμαχίδια (πριονίδια ή ροκανίδια) ξύλου. Παραδείγματα χρήσης αυτών των υλικών φαίνονται παρακάτω στις εικόνες 32,33,34.



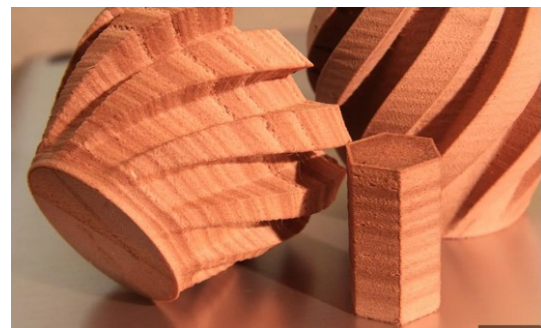
Εικόνα 32: Κουκουβάγια κατασκευασμένη από νήμα ξύλου

Πηγή : <https://www.wired.com/2012/11/3d-printer-wood-filament/>



Εικόνα 33: Φιγούρα του Groot απο την ταινία Guardians of the Galaxy κατασκευασμένη από νήμα ξύλου

Πηγή: <https://3dwithus.com/wood-filament>



Εικόνα 34: Αντικείμενα κατασκευασμένα από νήμα ξύλου

Πηγή: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-progression-with-wood-filament-material-2730/>

Η ιδέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την εκτύπωση νήματος τύπου ξύλου δεν είναι καινούρια. Περίπου από το 2012 ερευνητές άρχισαν να πειραματίζονται με την ανάμειξη PLA και τεμαχιδίων ξύλου για την κατασκευή του τώρα γνωστού ως wood filament. Ωστόσο τα πειράματα αυτά ήταν ανεπιτυχή (The Best Wood PLA Filaments of 2022 | All3DP, n.d.).

Η διαφορά τους με τα σύγχρονα νήματα τύπου ξύλου είναι ότι στη θέση των τεμαχιδίων χρησιμοποιούνται πλέον ίνες ξύλου, αλλά η βάση εξακολουθεί να είναι το PLA.

Η αναλογία PLA και ξύλου για την παραγωγή του νήματος είναι συνήθως περίπου 70% και 30% αντίστοιχα. Παρόλη την μικρή αναλογία ξύλου τα τελικά κατασκευασμένα αντικείμενα μοιάζουν με ξύλινα κι έχουν την οσμή και την αφή του ξύλου.

Για την χρήση αυτού του νήματος, όπως και κάθε σύνθετο νήμα που περιέχει μικροσωματίδια/ ίνες, προτείνεται ο τρισδιάστατος εκτυπωτής να διαθέτει ακροφύσιο με στόμιο μεγαλύτερο των 0.4mm για την αποφυγή απόφραξης. Πέρα από την αισθητική, αυτό το είδος νήματος προσφέρει και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά. Αναλόγως με τον κατασκευαστή, είναι δυνατόν να είναι τελείως βιοδιασπώμενο, όπως είναι το νήμα timberfill της Filamentum (Εικόνα 35).



Εικόνα 35: Κατασκευή γλάστρας με νήμα τύπου ξύλου της Filamentum. Νήμα Timberfill.

Στιγμιότυπο από: (Filament Containing Real Wood Fibers! (Timberfill Printing) - YouTube, n.d.)

Εάν η επιχείρηση διαθέτει κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό (όπως για παράδειγμα τόννο, τροχό, κτλ.), η κατασκευή μπορεί να αποκτήσει εμφάνιση παρόμοια με του ξύλου. Το νήμα της Hatchbox προσφέρει στην κατασκευή κατάλληλη επιφάνεια για πιο εύκολο τρόχισμα ώστε η τελική της εμφάνιση να προσεγγίζει αυτή του ξύλου (Εικόνα 36).



Εικόνα 36: Δοκιμή εκτύπωσης βαρελιού με το νήμα τύπου ξύλου της Hatchbox.

Στιγμότυπο από: (Hatchbox Wood 3D Printer Filament Review | All3DP, n.d.)

2.3.4 Ίνες άνθρακα / Carbon fiber

Οι ίνες άνθρακα αποτελούν ένα υλικό που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια στην τρισδιάστατη εκτύπωση με σκοπό περισσότερο την ενίσχυση της κατασκευής παρά την εμφάνιση. Οι ίνες άνθρακα είναι γνωστές για την κατασκευή ανθρακονημάτων, το οποίο αποτελεί ένα πολύ στιβαρό υλικό που χρησιμοποιείται για πολλαπλές χρήσεις.

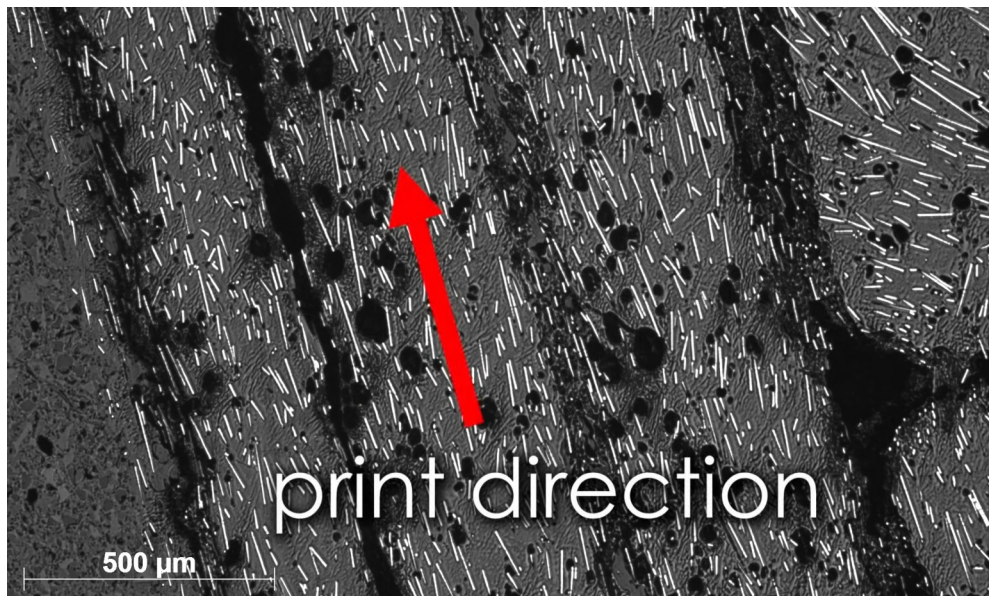
“Ένα υλικό που ψηφίστηκε από την National Academy of Engineering ως ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα του 20ου αιώνα αλλά και ένα υλικό που μόλις τα τελευταία χρόνια άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως από την βιομηχανία αυτοκινήτου”

(Σύνταξης, 2015)

Η χρήση των ινών άνθρακα για την ενίσχυση της κατασκευής εκτελείται με δύο διαφορετικές μεθόδους, που εφαρμόζονται μόνο με την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM.

1) Χρήση νημάτων με προσθήκη ινών άνθρακα (carbon-fiber-filled filament)

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί σύνθετα νήματα που είναι κατασκευασμένα από το συνδυασμό μικροσκοπικών ινών άνθρακα με πολυμερή υλικά. Ένα χαρακτηριστικό του υλικού αυτού είναι ότι κατά την εκτύπωση, γεγονός που οι ίνες προσανατολίζονται με την κατεύθυνση της εκτύπωσης που προσφέρει στην τελική κατασκευή επιπλέον στιβαρότητα (Εικόνα 37).



Εικόνα 37: Ήμα με έγχυση ινών άνθρακα όπως απεικονίζεται με τη βοήθεια μικροσκοπίου. Η κατεύθυνση των ινών άνθρακα μέσα στο πολυμερικό υλικό προσανατολίζονται παράλληλα με την κατεύθυνση εκτύπωσης.

Στιγμιότυπο από: (CNC Kitchen, n.d.)

2) Τρισδιάστατη εκτύπωση με ενισχυμένη συνεχόμενη ίνα (Continuous Fiber Reinforced 3D Printing ή CFRP-AM)

Η δεύτερη μέθοδος είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την πρώτη αλλά θεωρείται και πιο αποτελεσματική. Η κατασκευή με αυτό το υλικό προσφέρει στιβαρότητα ισοδύναμη με αυτή του αλουμινίου.

Το χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιεί ήμα που αποτελείται από συνεχόμενη ίνα άνθρακα επικαλυμμένη με πολυμερές για την ενίσχυσή της σε συνδυασμό με δεύτερο ήμα που χρησιμοποιείται ως μήτρα (matrix material).

Με απλά λόγια, αυτή η μέθοδος επιτρέπει στην τελική κατασκευή να διαθέτει “σκελετό” κι επομένως αυξημένη στιβαρότητα (Εικόνα 38).



Εικόνα 38: Παράδειγμα τρισδιάστατης εκτύπωσης με ενισχυμένη συνεχόμενη ίνα. Το κίτρινο πέρασμα είναι η ενισχυμένη ίνα ενώ η μαύρη περιοχή είναι η μήτρα (matrix material).

Στιγμιότυπο από :*(Continuous Fiber Reinforced 3D Printing: Mind-Blowing!*
| All3DP Pro, n.d.)

με ίνες άνθρακα ως μήτρα (matrix material) σε συνδυασμό με τη συνεχόμενη ίνα άνθρακα για εξαιρετική στιβαρότητα.

Για την χρήση αυτής της μεθόδου απαιτείται ειδικός εκτυπωτής που έχει τη δυνατότητα να συγκολλήσει την ίνα με το πολυμερές κατά την εκτύπωση.

Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που κάνει χρήση αυτής της μεθόδου λειτουργεί με κάποιες παραλλαγές της τεχνικής FDM. Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες μέθοδοι από αυτές:

Να σημειωθεί ότι οι ίνες άνθρακα είναι μόνο κάποιες από όσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο αυτό το υλικό παραμένει να είναι από τα δημοφιλή για χρήση με αυτή την μέθοδο.

Η συγκεκριμένη μέθοδος που κάνει χρήση ιών άνθρακα λέγεται στον επιστημονικό χώρο και CFRP-AM (Carbon Fiber Reinforced Polymers and Additive Manufacturing)

Επίσης, είναι δυνατή και η χρήση νημάτων ενισχυμένων

1) Εμποτισμός / επικάλυψη in-situ (in-situ impregnation)

Σε αυτή την περίπτωση η ίνα επικαλύπτεται με το βασικό υλικό κατά την εκτύπωση μέσα στον εξωθητή (Liu et al., 2021).

2) Προ-εμποτισμός / επικάλυψη (pre-impregnation / Towpreg extrusion)

Σε αυτή την περίπτωση η ίνα έχει επικαλυφθεί με το βασικό υλικό σε μορφή νήματος πριν την εκτύπωση οπότε στη συνέχεια, απαιτείται μόνο η θέρμανση του από τον εξωθητή (Liu et al., 2021).

3) Συνεξώθηση με προεμποτισμένη ίνα (Co-Extrusion with Towpreg)

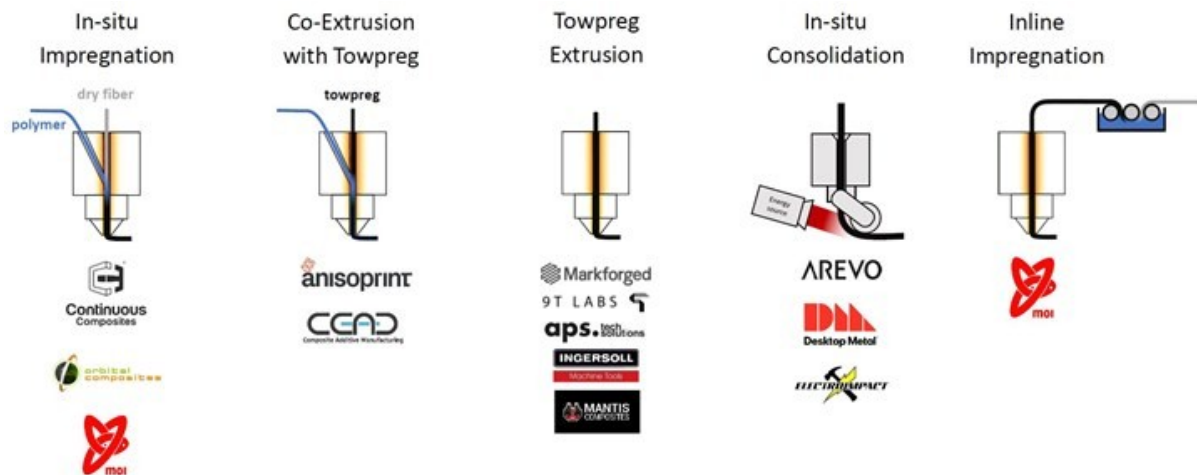
Ισχύουν όσα και στην περίπτωση (2) μόνο που στη συγκεκριμένη, η προεμποτισμένη ίνα επικαλύπτεται μέσα στον εξωθητή με επιπλέον επικαλυπτικό υλικό (*3D Printing with Continuous Fiber: A Landscape | CompositesWorld, 2020*).

4) Εμποτισμός / επικάλυψη in-line (in-line impregnation)

Σε αυτή την περίπτωση η ίνα επικαλύπτεται με το βασικό υλικό κατά την μεταφορά στον εκτυπωτή (*3D Printing with Continuous Fiber: A Landscape | CompositesWorld, n.d.*).

5) Τεχνολογία automated tape / fibre placement (ATP/AFP)

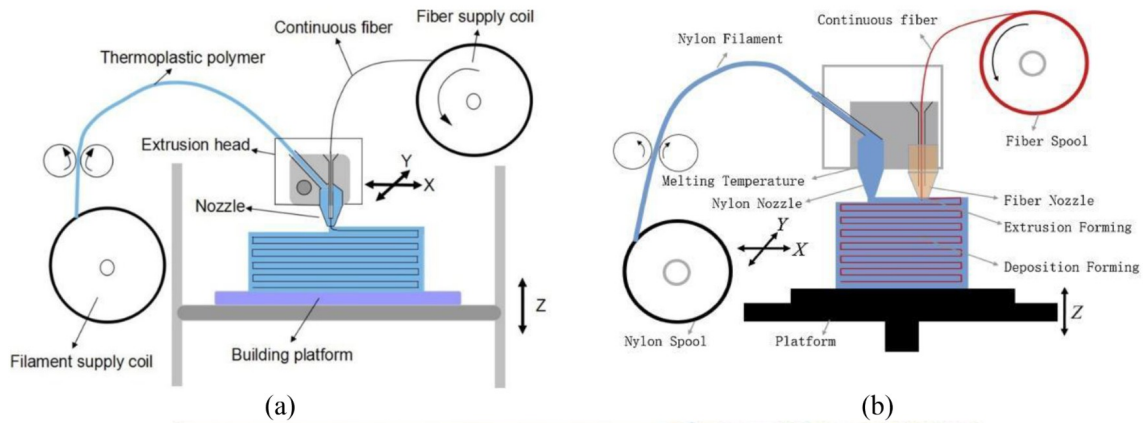
Ισχύουν όσα και στην περίπτωση (2), μόνο που στη συγκεκριμένη, η προεμποτισμένη ίνα θερμαίνεται και πιέζεται πάνω στο υπόστρωμα από εξωτερικούς μηχανισμούς κατά την εξώθησή της (*3D Printing with Continuous Fiber: A Landscape | CompositesWorld, 2020*).



Εικόνα 39: Μορφές τρισδιάστατης εκτύπωσης με τη χρήση συνεχόμενης ενισχυμένης ίνας

Στιγμιότυπο από : (3D Printing with Continuous Fiber: A Landscape | CompositesWorld, 2020)

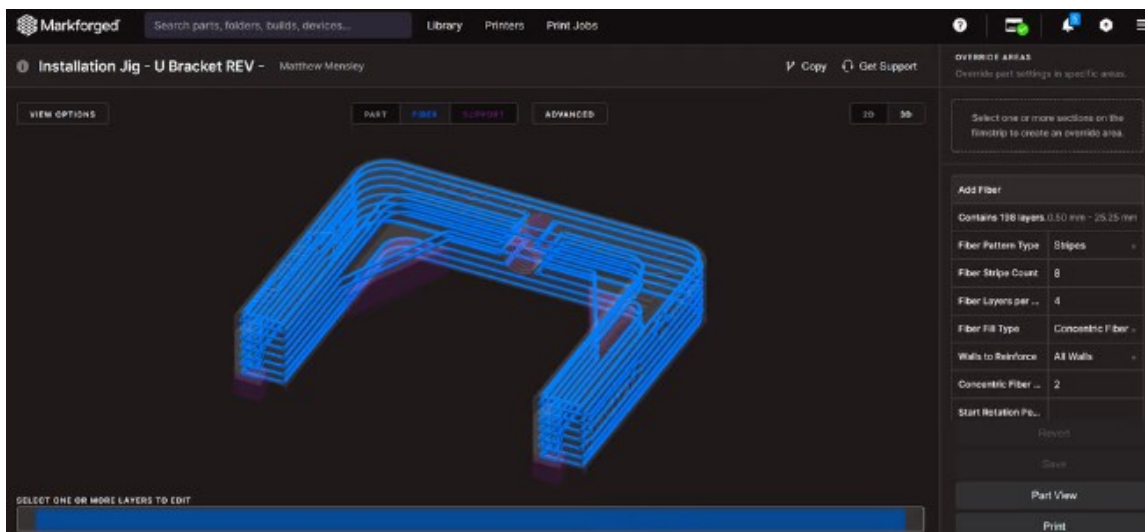
Μια από τις πιο γνωστές εταιρίες κατασκευής αυτού του είδους τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι η εταιρία Markforged. Η τεχνολογία της εταιρίας αυτής επιτρέπει την χρήση διπλού εξωθητή / dual extruder (Εικόνα 40), τον οποίο χρησιμοποιεί επίσης ο εκτυπωτής Mark Two (Kabir et al., 2020).



Εικόνα 40: Διο βασικοί μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης με ενίσχυση συνεχόμενης ίνας. (α) με απλό εξωθητή, (β) με διπλό εξωθητή

Στιγμιότυπο από : (Kabir et al., 2020)

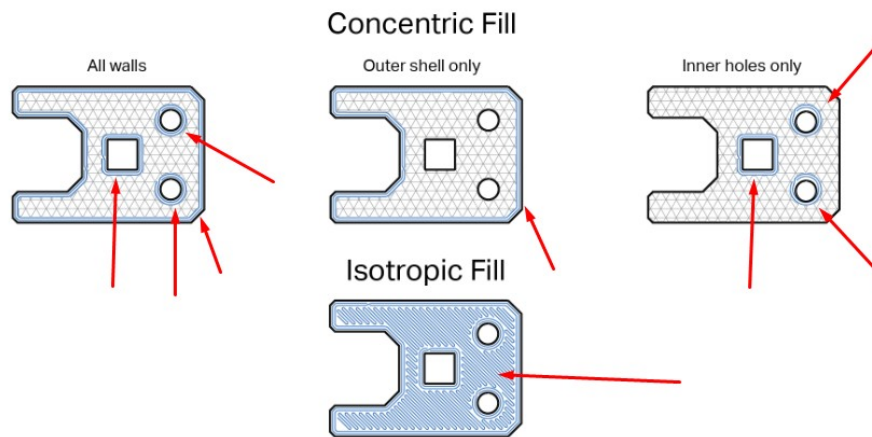
Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία αυτής της μεθόδου είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα τοποθέτησης των ινών σε συγκεκριμένα μέρη της κατασκευής μέσω των προγραμμάτων slicer (Εικόνα 41).



Εικόνα 41: Τοποθέτηση των ινών στα επιθυμητά σημεία της κατασκευής. Πρόγραμμα Eiger του κατασκευαστή Markforged.

Στιγμιότυπο από: (Continuous Fiber Reinforced 3D Printing: Mind-Blowing! | All3DP Pro, n.d.)

Τα προγράμματα Slicer επιτρέπουν την ενίσχυση της κατασκευής με διάφορους τρόπους, όπως φαίνεται στην εικόνα 42.



Εικόνα 42: Διάφοροι τρόποι ενίσχυσης της κατασκευής με το πρόγραμμα Slicer (Eiger) της Markforged.

Στιγμιότυπο από: (Fiber Reinforced 3D Printing, n.d.)

Στο πρόγραμμα Eiger της Markforged είναι δυνατή η εκτύπωση των ενισχυμένων συνεχόμενων ινών μόνο στα εσωτερικά και εξωτερικά τοιχώματα (concentric fill) ή μπορεί να πραγματοποιηθεί και για την πλήρωση της κατασκευής με πολλαπλά επίπεδα ινών σε μορφή ζγκ-ζαγκ (Isotropic Fill). Στην περίπτωση αυτή, το μοτίβο ανά επίπεδο εκτυπώνεται αυτόματα με διαφορά 45° για την βέλτιστη στιβαρότητα της τελικής κατασκευής (Fiber Reinforced 3D Printing, n.d.).

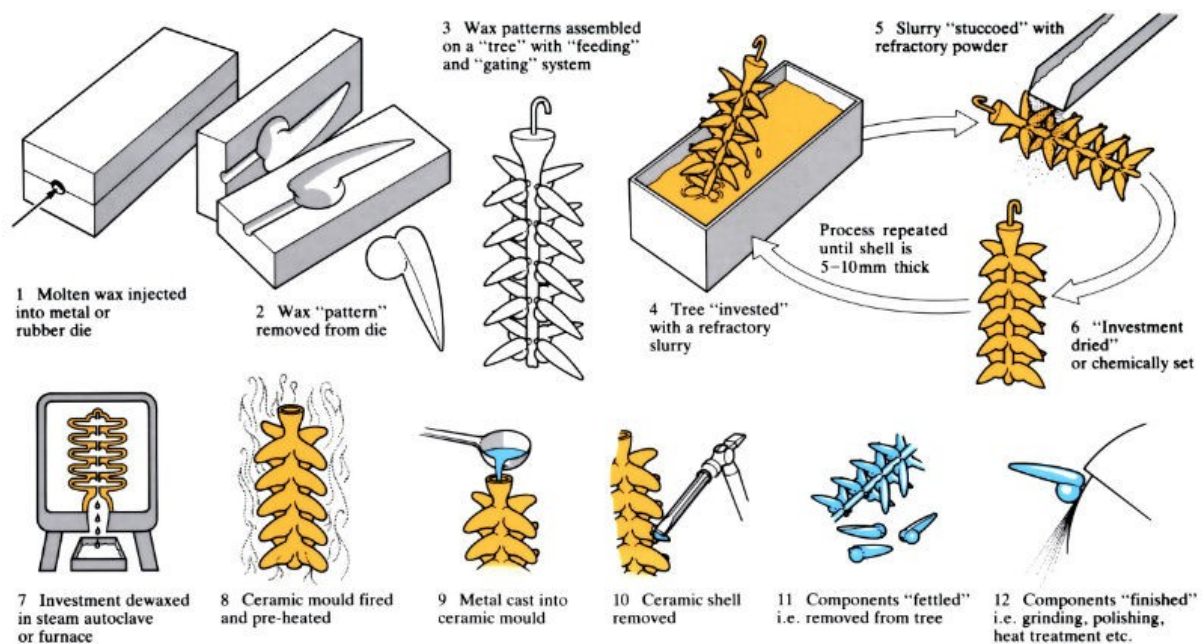
Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως αυτή η τεχνολογία εξακολουθεί να είναι σε πειραματικό στάδιο και είναι προσβάσιμη κυρίως σε επαγγελματίες καθώς είναι ακριβή. Επίσης η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε περιορισμένα σχήματα και γεωμετρίες (Continuous Fiber Reinforced 3D Printing: Mind-Blowing! | All3DP Pro, n.d.).

3. Η τρισδιάστατη εκτύπωση στις Εφαρμοσμένες τέχνες

Σε σχέση με τους άλλους τομείς που αναφέρθηκαν παραπάνω, ο τομέας Εφαρμοσμένων τεχνών αν και δύσκολα μπορεί να υιοθετήσει εξολοκλήρου αυτή την τεχνολογία, μπορεί να ωφεληθεί σε μεγάλο βαθμό από αυτήν. Ήδη φαίνεται πώς κλάδοι αυτού του τομέα, όπως η γραφιστική και οι Γραφικές τέχνες προσπαθούν να εφαρμόσουν αυτή την τεχνολογία. Ωστόσο όπως θα αναφερθεί παρακάτω, θα πρέπει να αντιμετωπίσουν κάποιες προκλήσεις που αφορούν την εκμάθηση προγραμμάτων, καθώς και την απόκτηση εμπειρίας τρισδιάστατης εκτύπωσης για την ορθή και αποτελεσματική χρήση αυτής της τεχνολογίας.

3.1 Παραγωγή κοσμημάτων

Από τις πιο βασικές και σημαντικότερες τεχνικές κατασκευής κοσμημάτων είναι η τεχνική του χαμένου κεριού (lost-wax casting) (Εικόνα 43). Σε αυτή την τεχνική γίνεται χρήση κηρόμαζας για την κατασκευή ενός μοντέλου που ακολούθως, καλύπτεται με πηλό ή άλλα υγρά κεραμικά υλικά. Στη συνέχεια το επικαλυμμένο μοντέλο ψήνεται στο φούρνο, όπου το κέρι λιώνει και παραμένει μονάχα η επικάλυψη που θα λειτουργήσει ως καλούπι. Στο νέο αυτό καλούπι τοποθετείται λιωμένο μέταλλο και στο τέλος μετά την ψύξη του θραύεται ο πηλός και αποκαλύπτεται η μεταλλική μορφή αντικειμένου, που έχει τη μορφή του αρχικού κερινού μοντέλου.



Εικόνα 43: Παραδοσιακή διαδικασία της τεχνικής χαμένου κεριού (lost-wax casting). 1. Χύτευση του κεριού σε καλούπι, 2. Αφαίρεση του κερινού μοντέλου. 3. Πρόσθεση των κερινών μοντέλων στο "δέντρο" για μαζική επεξεργασία. 4,5,6. διαδικασία επικάλυψης των κερινών μοντέλων με ειδικό κεραμικό υλικό 7. ψήσιμο της κεραμικής επικάλυψης και αφαίρεση του κεριού 8,9. Διαδικασία χύτευσης του πηλίνου καλουπιού 10. θραύση του πηλού 11. Αποκοπή της τελικής κατασκευής από το "δέντρο" 12. φινίρισμα

Πηγή: (Investment Casting, n.d.)

Η δυνατότητα της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης για κατασκευή πολύπλοκων αντικειμένων σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ταυτόχρονης εκτύπωσης διαφορετικών υλικών ανοίγει νέες προοπτικές αισθητικής έκφρασης στον τομέα κατασκευής κοσμημάτων (Εικόνα 44).



Εικόνα 44: Κατασκευή δαχτυλιδιών με μεγάλη λεπτομέρεια με τη χρήση της μεθόδου Vat polymerization.

Πηγή (3D Printing Jewelry – The Ultimate Guide, 2022)

Σε βιομηχανικό όσο και σε οικιακό επίπεδο πλέον, η τεχνική χαμένου κεριού με την υποβοήθηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπει την παράληψη του σταδίου της κατασκευής του καλουπιού (καλούμενου και ως master die) για την κατασκευή παραγωγή του βασικού μοντέλου με κεριό (καλούμενου και ως wax pattern). Επομένως, αντί για την εξωτερική ανάθεση για την κατασκευή ακριβών μεταλλικών ή πλαστικών καλουπιών, ο κατασκευαστής έχει την δυνατότητα να κατασκευάσει άμεσα το wax pattern εκτυπώνοντάς το με έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Αξίζει να σημειωθεί πως αυτή η μέθοδος :

- είναι πιο οικονομική και πιο γρήγορη από την παραδοσιακή μέθοδο λόγω παράλειψης του σταδίου κατασκευής καλουπιών,
- επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία στο design του μοντέλου,
- είναι ένας πιο οικονομικός τρόπος κατασκευής μεταλλικών αντικειμένων χωρίς την ανάγκη χρήσης ακριβών τρισδιάστατων εκτυπωτών τύπου μετάλλου από ερασιτέχνες και επαγγελματίες της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μπορεί πλέον κάποιος να βρεί ειδικά κατασκευασμένα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου κεριού, που αυξάνουν την αποτελεσματικότητα αυτής της τεχνικής. Ένας επιτυχημένος κατασκευαστής τέτοιων υλικών είναι η BlueCast των οποία τα υλικά (Εικόνα 35) είναι ειδικού τύπου ρητίνες για χρήση με την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης SLA (Selective Laser Sintering) και DLP (Digital Light Processing).



Εικόνα 45: Παραδείγματα χρήσης της τρισδιάστατης εκτυπωτικής κάνοντας χρήση των ρητινών BLUECAST X5 της εταιρίας BlueCast. Το συγκεκριμένο υλικό θα αυξήσει την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών της τεχνική χαμένου κεριού.

Πηγή: (BlueCast - High Performance Castable Resin for 3d Printers, n.d.)

Αναμφισβήτητα ο τομέας κατασκευής κοσμημάτων μπορεί να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης με πιο άμεσο τρόπο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μετάλλου αν και πιο ακριβή, επιτρέπει την κατασκευή πολλαπλών κοσμημάτων ταυτόχρονα και με μεγάλη ταχύτητα (Εικόνα 46). Όπως αναφέρθηκε, η δυνατότητα προσθετικής κατασκευής κοσμημάτων με πολυμερή υλικά είναι σημαντική για την προτυποποίηση του design.

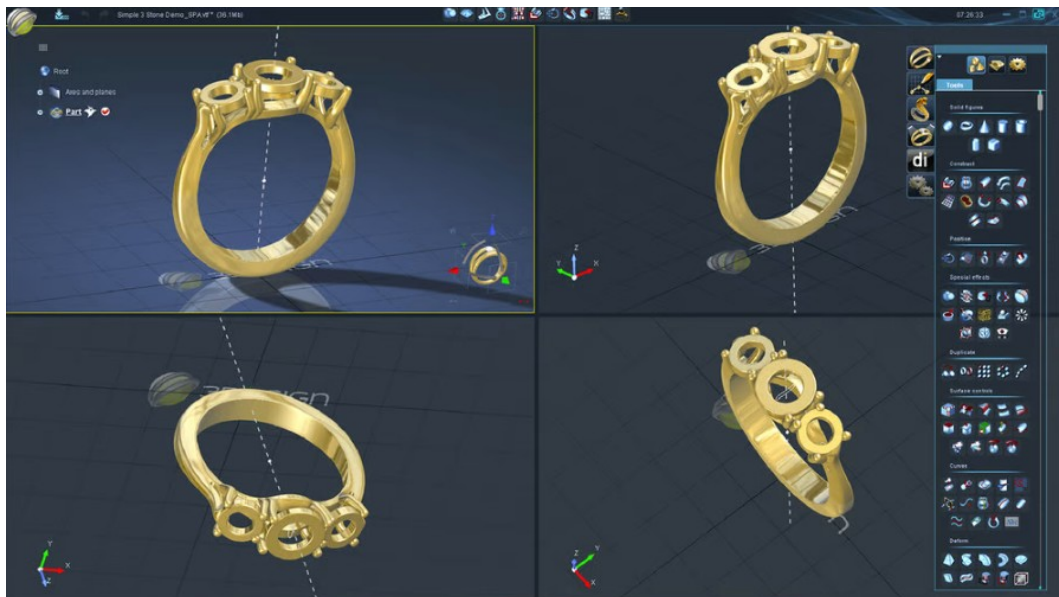


Εικόνα 46: Κατασκευή τρισδιάστατων εκτυπωμένων κοσμημάτων από μεταλλικό υλικό με την μέθοδο της στερεολιθογραφίας (SLM)

Πηγή: (Cloudfactory, n.d.)

Ωστόσο η άνεση και πρακτικότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν επηρεάζει μόνο τους κατασκευαστές αλλά, δίνει και στον πελάτη τη δυνατότητα να συμμετέχει στη διαδικασία

κατασκευής και σχεδίασης του επιθυμητού design του, χάρη στα διαθέσιμα από τους κατασκευαστές φιλικά προς τον πελάτη προγράμματα CAD, τα οποία είναι εξειδικευμένα για την σχεδίαση κοσμημάτων. Ένα πρόγραμμα τέτοιου είδους είναι το 3D design που φαίνεται στην εικόνα 47.



Εικόνα 47: Στιγμιότυπο από το εξειδικευμένο πρόγραμμα CAD για κατασκευή κοσμημάτων (3D design)

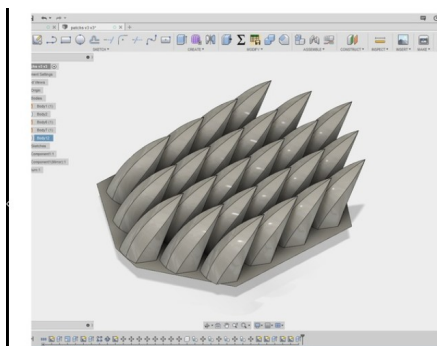
Πηγή: (3D Printing Jewelry – The Ultimate Guide, 2022)

Η δυνατότητα που παρέχει η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης να κατασκευάζονται περίπλοκες γεωμετρίες σε σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς και η δυνατότητα προσαρμογής του κοσμήματος με βάση τις επιθυμίες του καταναλωτή, χωρίς μεγάλες αλλαγές στη ροή παραγωγής, αναδεικνύει την τεχνολογία αυτή ως μια μεγάλη ευκαιρία για την βιομηχανία με σκοπό να αυξήσει τον ανταγωνισμό της (3D Printing Jewelry – The Ultimate Guide, 2022)

3.2 Δημιουργίες για το χώρο της μόδας

Ο τομέας της μόδας πειραματίζεται επίσης από την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μια εντυπωσιακή χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι η εκτύπωση εξαρτημάτων για την προσαρμογή τους επάνω σε υφάσματα. Προφανώς πραγματοποιούνται και δοκιμές κατασκευής ενδυμάτων κατασκευασμένων εξολοκλήρου μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αλλά τα αποτελέσματα δείχνουν πως δεν είναι ακόμη κατάλληλα για την κατασκευή ενός καθημερινού ενδύματος. Ο κύριος λόγος που ακόμη δεν έχουν εμφανιστεί στο εμπόριο ενδυμασίες κατασκευασμένες μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι η μικρή ποικιλία των υλικών που είναι διαθέσιμα για το σκοπό αυτό. Δεν προσφέρονται ακόμη κατάλληλα για την κατασκευή τρισδιάστατα εκτυπωμένων ενδυμάτων λόγω του βάρους τους και της ευθραυστότητάς τους. Ωστόσο η τεχνολογία αυτή εξακολουθεί να είναι ένας εύκολος και αποτελεσματικός τρόπος κατασκευής πρωτότυπων ενδυμάτων με κύριο σκοπό την προβολή/επίδειξή τους σε εκθέσεις.

Εντυπωσιακή είναι η χρήση αυτής της τεχνολογίας για την κατασκευή «φανταστικών» στολών. Στις εικόνες 48, 49, 50 παρουσιάζονται παραδείγματα κατασκευής που προσομοιάζουν με «λέπια δράκου» για την σύνδεσή τους επάνω σε ύφασμα.



Εικόνα 48: Ψηφιακή κατασκευή στολής με λέπια δράκου σε πρόγραμμα 3D μοντελοποίησης

Πηγή: (Thingiverse.com, n.d.)



Εικόνα 49: Φανταστικά λέπια δράκου κατασκευασμένα με τρισδιάστατη εκτύπωση με εκτυπωτικό υπόστρωμα διάτρητου υφάσματος

Στιγμιότυπο από: (Uncle Jessy, 2018)



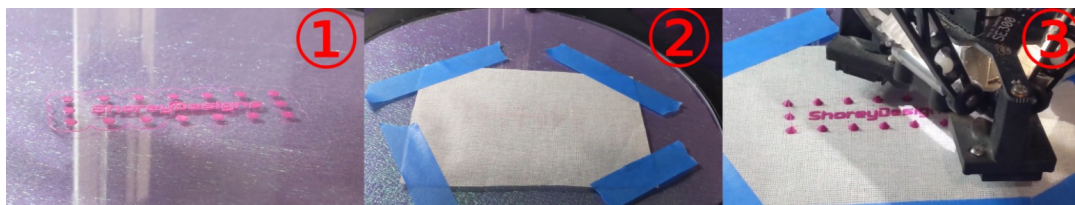
Εικόνα 50: Λέπια δράκου κατασκευασμένα με τρισδιάστατη εκτύπωση σε εκτυπωτικό υπόστρωμα διάτρητου υφάσματος. Εφαρμογή του design

Στιγμιότυπο από : (3D Printed Flexible Dragon Scales – Ytec 3D, n.d.)

Η τεχνική αυτή είναι πολύ δημοφιλής και χρησιμοποιείται με διάφορους τρόπους.

Ένας χρήστης και καλός γνώστης αυτής της τεχνικής είναι ο David Shorey που έχει προβάλλει τις κατασκευές του σε διάφορες εκδηλώσεις και διοργανώσεις, όπως στο SIGGRAPH το 2019 (ACN, 2019) και στο Bay Area Maker Faire το 2018 (3D Printing Nerd, 2018a). Σε αυτές τις διασκέψεις αλλά και σε βίντεο σε κανάλι youtube, ο David Shorey εξηγεί τη διαδικασία κατασκευής αυτών των ενδυμάτων (Εικόνα 51).

Στην ουσία η διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά την εκτύπωση των κομματιών που προεξέχουν στην αρχή της εκτύπωσης, την τοποθέτηση του υφάσματος επάνω στα ήδη εκτυπω-



Εικόνα 51: Διαδικασία κατασκευής εξοχών επάνω σε ύφασμα με την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στιγμιότυπα από: (Demystifying 3D Printing On Fabric - YouTube, n.d.)

μένα σημεία και στην συνέχεια την συνέχιση της εκτύπωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο εξωθητής να εξωθεί το υλικό με τέτοιο τρόπο, ώστε να περνάει μέσα από το ύφασμα και να συνδέεται με τα επίπεδα υλικού που βρίσκονται κάτω από το ύφασμα. Το τελικό αποτέλε-

σμα είναι τα προεξέχοντα τμήματα της κατασκευής να ενσωματώνονται ισχυρά επάνω στο ύφασμα. Σημαντικό είναι το ύφασμα να διαθέτει αραιή ύφανση για να μπορεί το υλικό που εκτυπώνεται να περνάει εύκολα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα από τα design της Sophy Wong. Η επιχείρηση χρησιμοποιεί μια παρόμοια τεχνική αλλά αυτή τη φορά χρησιμοποιούνται νιφάδες εκτυπωμένες με διαφανές PLA στις οποίες έχουν εισαχθεί φωτάκια LED που τελικά ενσωματώνονται επάνω σε μία ζακέτα (*The 3D-Printed Fashion of Sophy Wong!* - YouTube, n.d.).



Εικόνα 52: Νιφάδες εκτυπωμένες με τρισδιάστατης εκτύπωσης και εφαρμογή σε ενδυμασία. Design της σχεδιάστριας μόδας Sophy Wong

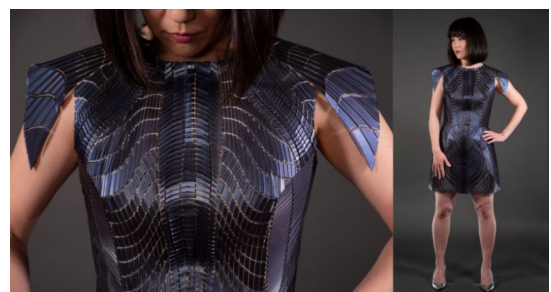
Στιγμιότυπο από : (*The 3D-Printed Fashion of Sophy Wong!* - YouTube, n.d.)



Εικόνα 53: Νιφάδες εκτυπωμένες με τρισδιάστατης εκτύπωσης και εφαρμογή σε ενδυμασία. Design της σχεδιάστριας μόδας Sophy Wong

Στιγμιότυπο από : (*The 3D-Printed Fashion of Sophy Wong!* - YouTube, n.d.)

Από τα project της Sophy Wong , σημαντικό είναι και το “3D printed dress”, μια τεχνική που δεν εφαρμόστηκε μόνο για το στόλισμα μιας ενδυμασίας, αλλά για την κατασκευή ενός φορέματος εξολοκλήρου εκτυπωμένου με τρισδιάστατη εκτύπωση (Εικόνα 54).



Εικόνα 54: Τρισδιάστατη εκτύπωση σχημάτων απευθείας επάνω σε ύφασμα για την δημιουργία ενός design. (Sophy Wong)

Πηγή: (*3D Printed Dress*, n.d.)

3.3 Κατασκευή φωτιστικών από ανάγλυφη πορσελάνη (Lithophanes)

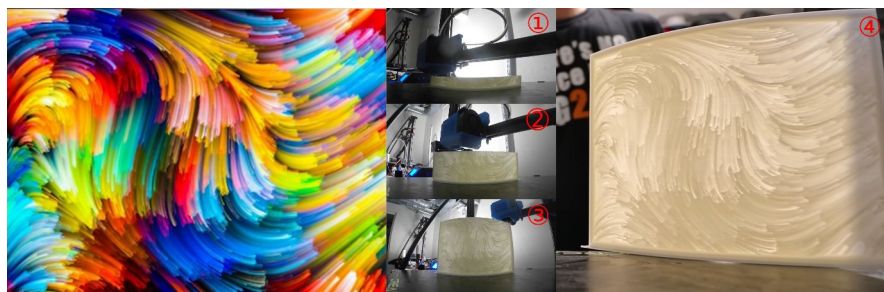
Μια παλιά τεχνική, που φαίνεται να έχει γίνει ξανά δημοφιλής με την εμφάνιση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι η κατασκευή των lithophanes. Τα lithophanes είναι φωτιστικά από ανάγλυφη πορσελάνη. Πιο συγκεκριμένα, είναι εικόνες τυπωμένες επάνω σε λεπτή πλάκα πορσελάνης, με ανάγλυφη μορφή, που όταν φωτιστούν από την πίσω όψη εμφανίζουν μία εικόνα ιδιαίτερης αισθητικής.

Η τεχνική εμφανίστηκε γύρω στον 18ο αιώνα όπου η κατασκευή της εικόνας γινόταν απευθείας σε μία πλάκα κεριού. Από αυτή την πλάκα κεριού κατασκευάζαν ένα καλούπι στο προσέθεταν μια ημιδιαφανή πορσελάνη, η οποία στη συνέχεια ψηνόταν για να λάβει την τελική της μορφή. Αυτό δημιουργούσε μία πλάκα με ανάγλυφη επιφάνεια, η οποία όταν φωτιζόταν από την πίσω πλευρά, άφηνε το φως να περάσει εύκολα από τις περιοχές όπου η επιφάνεια είχε λεπτό πάχος και πιο δύσκολα από τις περιοχές με μεγαλύτερο πάχος. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν να δημιουργείται μία εντυπωσιακή ασπρόμαυρη εικόνα.

Με την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι πλέον δυνατόν να σχεδιάζονται lithophanes μέσα σε ένα πρόγραμμα CAD μέσα σε πολύ λίγα βήματα και να εκτυπώνονται με ένα τρισδιάστατο εκτυπωτή χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά (Make With Tech

(MakeWithTech),

2020) (Εικόνες 55, 56, 57, 58).



Εικόνα 55: Διαδικασία εκτύπωσης lithophane, αριστερά η ψηφιακή εικόνα που χρησιμοποιήθηκε, στη μέση η διαδικασία εκτύπωσης, δεξιά το τελικό lithophane

Συλλογή στιγμιότυπων από (RCLifeOn, 2020)



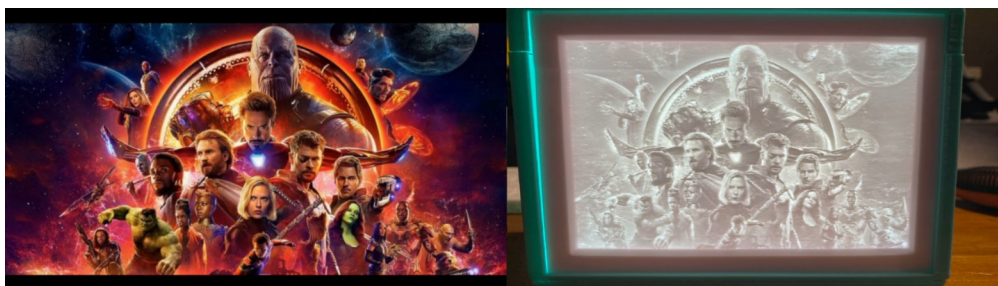
Εικόνα 56: Lithophane σε μορφή κύβου

Πηγή: (Lithophanemaker.com, n.d.)



Εικόνα 57: παράδειγμα της τέχνης lithophane

Στιγμιότυπα από (Desktop Inventions, 2021)



Εικόνα 58: Μετατροπή ψηφιακής εικόνας σε lithophane με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης

Στιγμιότυπα από : (Desktop Inventions, 2021)

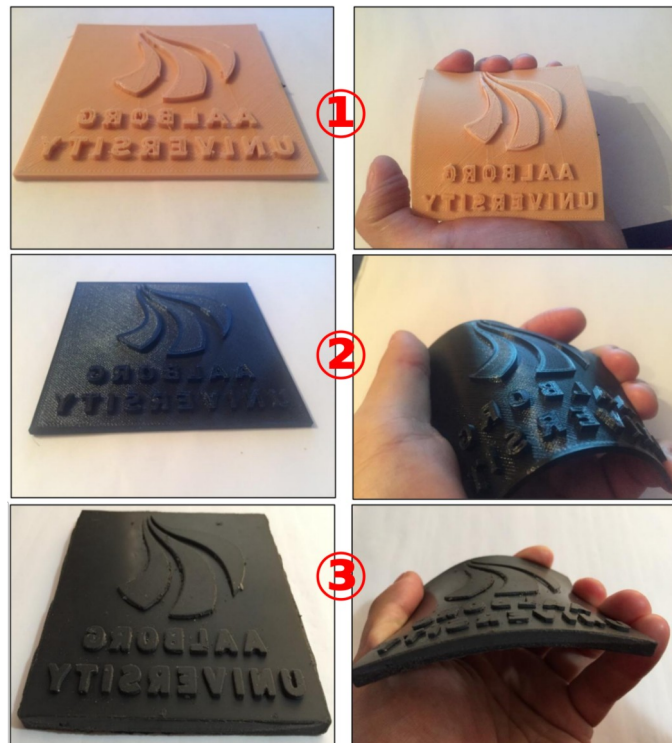
3.4 Κατασκευή εκτυπωτικής πλάκας φλεξογραφίας

Ο (Tsakos, n.d.) πειραματίστηκε με την κατασκευή εκτυπωτικών πλακών φλεξογραφίας μέσω της χρήσης διαφόρων τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Για το πείραμα επιλέχθηκαν προσεχτικά 3 διαφορετικά πολυμερή υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης, που διαθέτουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα συμβατικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται παραδοσιακά οι εκτυπωτικές πλάκες φλεξογραφίας. Τα υλικά θα έπρεπε να προσφέρουν την ίδια σκληρότητα για να αποφευχθεί παραμόρφωση της εκτύπωσης, αλλά και κατάλληλη ευκαμπτότητα για να μπορούν να τοποθετηθούν επάνω στο κύλινδρο εκτύπωσης.

Τα τρία υλικά που επιλέχθηκαν ήταν:

- Το υλικό Recreus της filaflex για την χρήση με την τεχνολογία FDM
- Το υλικό Polymaker της polyflex για την χρήση με την τεχνολογία FDM
- Το flexible resin της Formlab για την χρήση με την τεχνολογία SLA

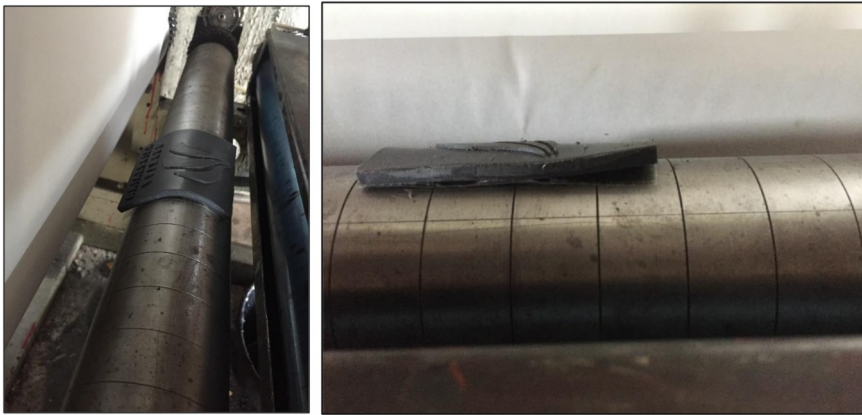


Εικόνα 59: Εκτυπωτικές πλάκες φλεξογραφίας κατασκευασμένες με τρισδιάστατης εκτύπωση. Στη δεξιά μεριά παρουσιάζεται η ευκαμπτότητα. 1) Recreus της filaflex , 2) Polymaker της polyflex 3) flexible resin της Formlab

Στην εικόνα (59) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατασκευής των εκτυπωτικών πλακών.

Στιγμιότυπο από: (Tsakos, n.d.)

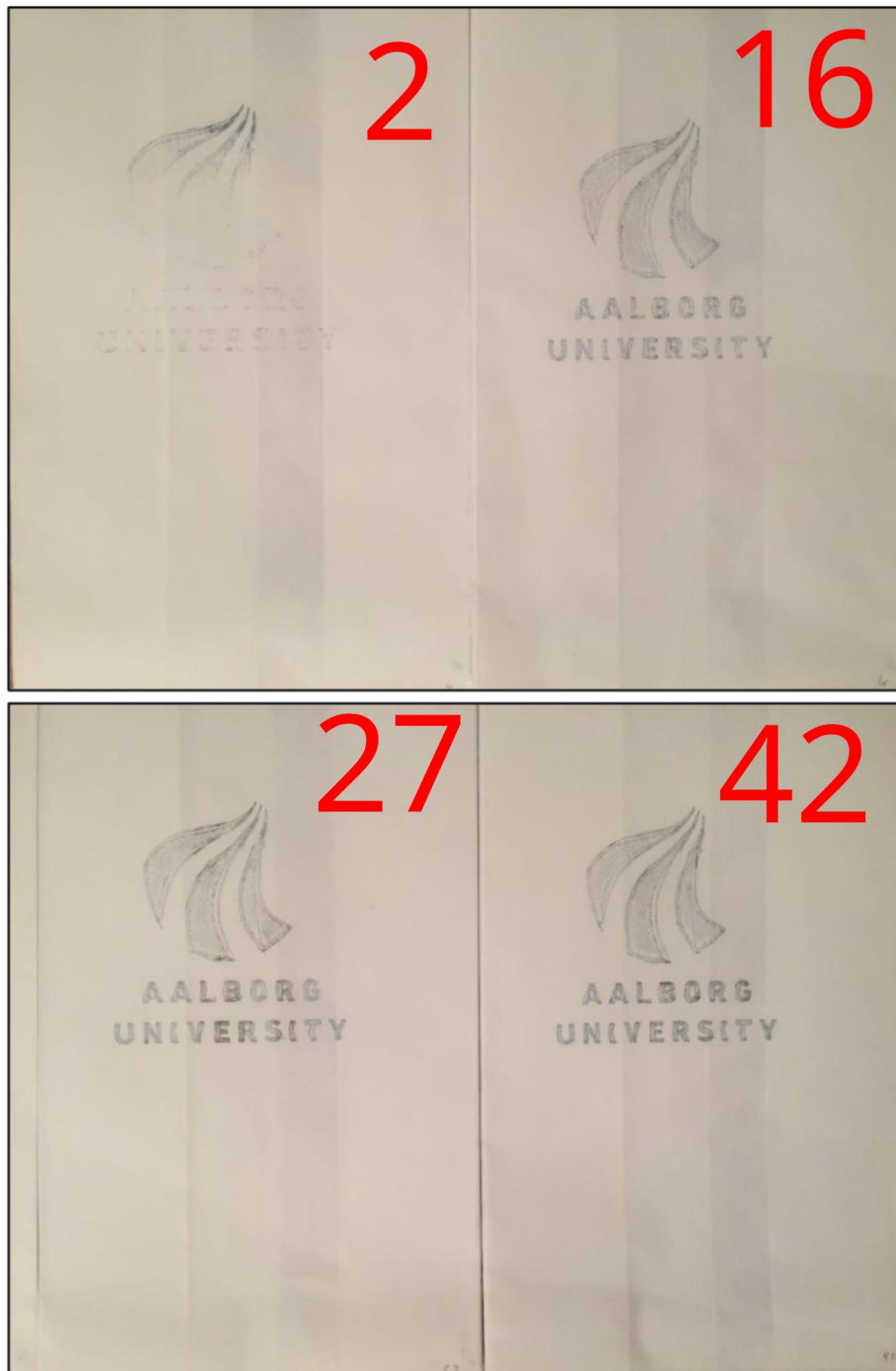
Δυστυχώς η χρήση της εκτυπωτικής πλάκας που κατασκευάστηκε με το υλικό flexible resin της Formlab δεν ήταν δυνατή, λόγω του πάχους και της μη ικανής ευκαμπτότητάς της, γεγονός που δεν την καθιστούσε κατάλληλη για τοποθέτηση επάνω στον κύλινδρο εκτύπωσης (Εικόνα 60).



Εικόνα 60: Εκτυπωτική πλάκα φλεξογραφίας κατασκευασμένη από υλικό flexible resin της Formlab, και συγκολλημένη επάνω στο κύλινδρο εκτύπωσης.

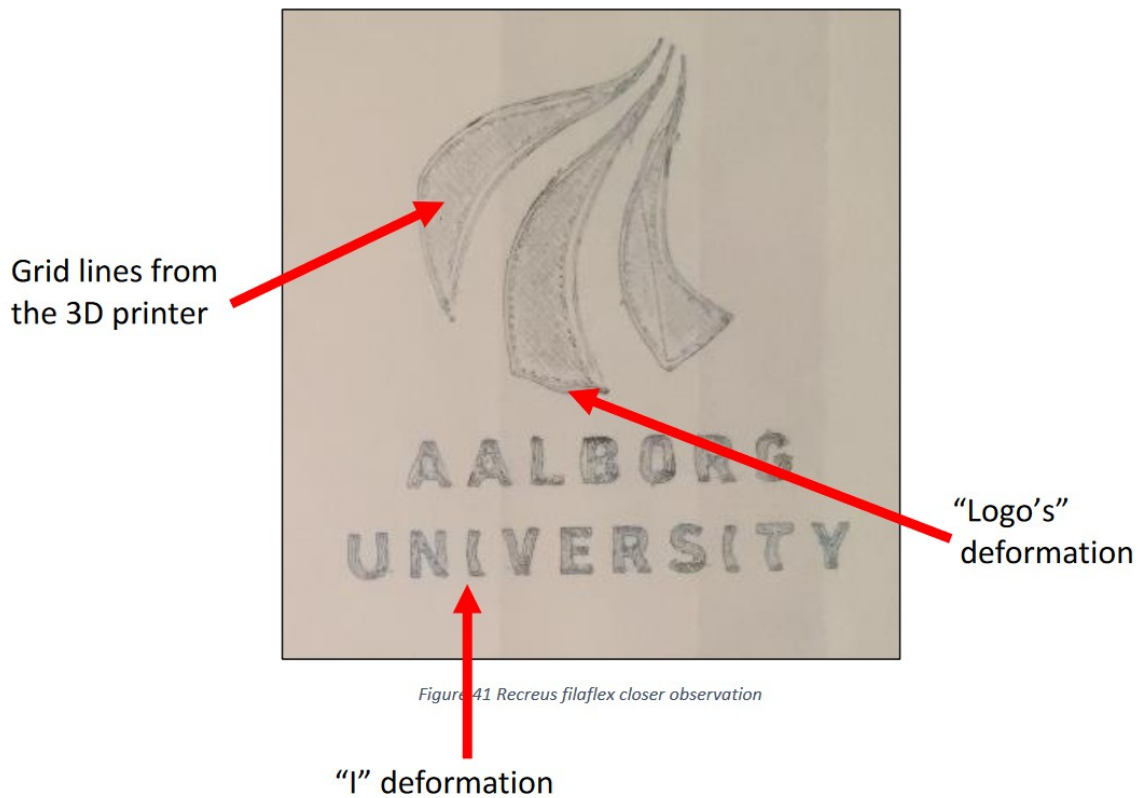
Στιγμιότυπο από: (Tsakos, n.d.)

Τα αποτελέσματα της εκτύπωσης με την εκτυπωτική πλάκα κατασκευασμένη με το υλικό Recreus της filaflex παρουσίασε παραμορφώσεις και αποτυπώματα γραμμών που παράχθηκαν κατά την κατασκευή της πλάκας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εκτυπωτική πλάκα μάλλον δεν θα είχε την απαιτούμενη αντοχή για τις ανάγκες μιας κανονικής εκτύπωσης (Εικόνες 61,62).



Εικόνα 61: Αποτελέσματα εκτύπωσης με την εκτυπωτική πλάκα φλεξογραφίας που κατασκευάστηκε με το υλικό Recreus της filaflex. Με κόκκινο σημειώνεται η σειρά εκτύπωσης.

Στιγμιότυπα από: (Tsakos, n.d.)



Εικόνα 62: Παρατήρηση των λαθών εκτύπωσης με την εκτυπωτική πλάκα που κατασκευάστηκε με το υλικό Recreus της filaflex.

Στιγμιότυπο από : (Tsakos, n.d.)

Τα αποτελέσματα της εκτυπωτικής πλάκας που κατασκευάστηκε με το υλικό Polymaker της polyflex αν και δεν εμφάνισε καμία παραμόρφωση, δεν κατάφερε ποτέ να εκτυπώσει ολόκληρο το σχέδιο (θέμα εκτύπωσης) (Εικόνα 63).



Εικόνα 63: Αποτελέσματα εκτύπωσης με την εκτυπωτική πλάκα φλεξογραφίας κατασκευασμένη με το υλικό *PolyMaker* της *Polyflex*. Με κόκκινο σημειώνεται η σειρά εκτύπωσης.

Στιγμιότυπο από: (Tsakos, n.d.)

Ο (Tsakos, n.d.) συμπεραίνει από τα αποτελέσματα πως είναι πράγματι δυνατή η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή εκτυπωτικών πλακών φλεξογραφίας. Ωστόσο μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην επιλογή των υλικών. Επίσης συμπεραίνει πως η διάρκεια ζωής των εκτυπωτικών πλακών δεν μπορεί να συγκριθεί με τις εκτυπωτικές πλάκες, που είναι κατασκευασμένες με τις συμβατικές τεχνολογίες. Τέλος προσθέτει πως αυτή η τεχνολογία μπορεί να ελαττώσει το κόστος κατασκευής των εκτυπωτικών πλακών αλλά και τον χρόνο κατασκευής τους. Αυτό ωστόσο προϋποθέτει την ανάγκη εκπαίδευσης του προσωπικού επάνω στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, που περιλαμβάνει γνώσεις πάνω σε τρισδιάστατους εκτυπωτές και σε προγράμματα CAD.

3.4 Κατασκευή διάτρητης μήτρας μεταξοτυπίας (stencil)

Η δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων δεν την εμποδίζει να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αντικειμένων δυο διαστάσεων. Ένα παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή stencil για χρήση στην τεχνική της μεταξοτυπίας. Οι διάτρητες περιοχές των stencil μπορούν να κατασκευαστούν ψηφιακά μέσω ενός προγράμματος CAD. Στη συνέχεια μπορούν να τοποθετηθούν απευθείας επάνω στο τελάρο για την εκτύπωση. Το κανάλι Digital Taxidermy στο Youtube έχει δείξει σε βίντεο (Digital Taxidermy, 2021) πώς αυτή η μέθοδος είναι πολύ αποτελεσματική (Εικόνα 64).

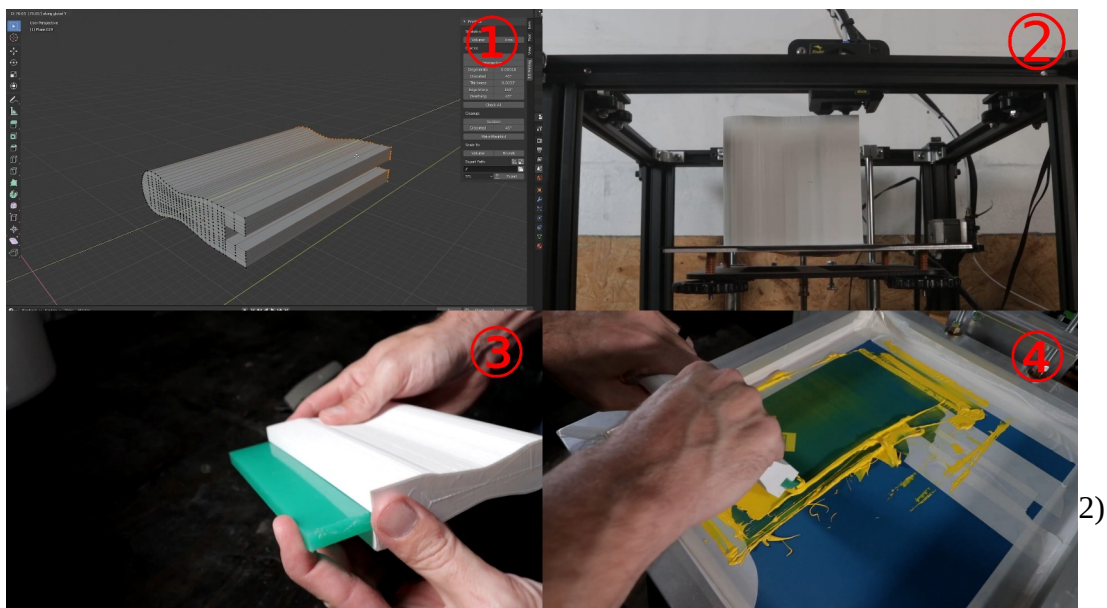


Εικόνα 64: Κατασκευή stencil μεταξοτυπίας και εφαρμογή αυτού για την εκτύπωση επάνω σε ύφασμα

Στιγμιότυπα από: (Digital Taxidermy, 2021)

3.5 Κατασκευή βοηθητικών εργαλείων των Γραφικών τεχνών

Όπως έχει αναφερθεί, η δυνατότητα κατασκευής βοηθητικών εργαλείων μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι γεγονός με ιδιαίτερη σημασία. Ο τομέας των Εφαρμοσμένων τεχνών και συγκεκριμένα οι κλάδοι του που κάνουν εκτενή χρήση βοηθητικών εργαλείων, όπως είναι ο χώρος των Γραφικών τεχνών, ακόμη δεν έχουν διερευνήσει αρκετά τις δυνατότητες που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση. Ωστόσο παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή μιας σπάτουλας (squeegee) που θα χρησιμοποιηθεί στην τεχνική της μεταξοτυπίας (Εικόνα 65).



Εικόνα 65: Σχεδιασμός της σπάτουλας σε πρόγραμμα 3D, κατασκευή με τρισδιάστατη εκτύπωση, συναρμολόγηση και εφαρμογή.

Στιγμιότυπα από: (Making a 3D Printed Squeegee For Screen Printing /// 3D Print Your Screen Printing Tools - YouTube, n.d.)

3.6 Τρισδιάστατη εκτύπωση σε ύφασμα

Το Youtube κανάλι Prusa 3D by Josef Prusa (*Prusa 3D by Josef Prusa - YouTube, n.d.*) έχει πειραματιστεί με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την εκτύπωση σχεδίων απευθείας επάνω σε ύφασμα. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται εκτύπωση του τρισδιάστατου σχεδίου απευθείας επάνω στο ύφασμα. Ανάλογα με την μέθοδο και τις ρυθμίσεις του εκτυπωτή, η εκτύπωση είναι δυνατή να αφαιρεθεί χωρίς να καταστραφεί το ύφασμα.

Στο πείραμά του ο Prusa δείχνει δυο μεθόδους εκτύπωσης, μία τύπου θερμομεταφοράς (Εικόνα 66) (heat-transfer) και μία τύπου μεταξοτυπίας (Εικόνες 67,68).

1) Μεταφορά του σχεδίου μέσω θερμομεταφοράς

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο πρώτα εκτυπώνεται το σχέδιο επάνω σε χαρτί για τη μεταφο-



Εικόνα 66: Εκτύπωση επάνω σε ύφασμα με την χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μέθοδος τύπου heat-transfer

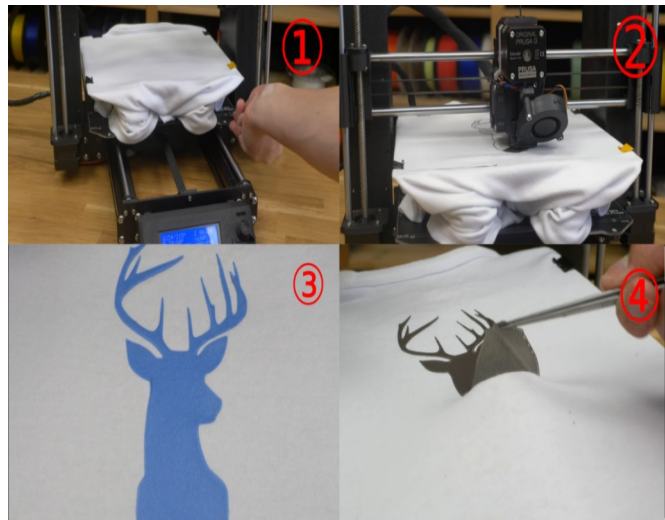
Στιγμιότυπα από: (*How to Create Your Own T-Shirt Motif with a 3D Printer? - YouTube, n.d.*)

ρά της εικόνας, η οποία επιστρώνεται με μια μικρή ποσότητα κόλλας επάνω στο ύφασμα. Στη συνέχεια ασκείται πίεση και η επιφάνεια θερμαίνεται με θερμαινόμενη πλάκα (ή σίδερο) για να μεταφερθεί στο ύφασμα, ενώ στο τέλος αφαιρείται η αποξηραμένη κόλλα. Η μέθοδος μπορεί να συγκριθεί με την μέθοδο heat-transfer, ωστόσο σε αυτή γίνεται

χρήση μη συμβατικών υλικών και τεχνικής, που οδηγούν στην επίτευξη ενός παρόμοιου αποτελέσματος.

2) Απευθείας εκτύπωση επάνω σε ύφασμα

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το ύφασμα τοποθετείται και στερεώνεται επάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης του τρισδιάστατου εκτυπωτή και στην συνέχεια επάνω του εκτυπώνεται το σχέδιο απευθείας. Η διαφορά μεταξύ αυτής της μεθόδου και της μεταξοτυπίας είναι πως σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται η χρήση τελάρου, Stencil και σπάτουλας για την μεταφορά του σχεδίου. Επιπλέον σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται πολυμερή και όχι μελάνια εκτύπωσης.



Εικόνα 67: Εκτύπωση απευθείας σε ύφασμα

Στιγμιότυπα από: (How to Create Your Own T-Shirt Motif with a 3D Printer? - YouTube, n.d.)



Εικόνα 68: Εκτύπωση επάνω σε ύφασμα μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης

Εικόνα από: (Κοζί, 2021)

3.7 Κατασκευή εκτυπωτικής πρέσας

Αν και οι γραφικές τέχνες αποτελούν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την μετάδοση πληροφοριών τόσο σε έντυπη μορφή όσο και στο χώρο της συσκευασίας μπορούν επίσης να δραματίσουν σημαντικό ρόλο στην αισθητική έκφραση και τη δημιουργία καλλιτεχνικών έργων. Ωστόσο κάποιον που επιθυμεί να εφαρμόσει αυτές τις τέχνες, η κύρια πρόκληση είναι να αποκτήσει πρόσβαση ακριβό και εξειδικευμένο εξοπλισμό και εκτυπωτικές μηχανές. Συνειδητοποιώντας αυτό το γεγονός οι δυο γραφίστες Martin Schneider και Dominik Schmitz οργάνωσαν το Open Press Project για να μπορέσουν να επικοινωνήσουν το ενδιαφέρον τους σχετικά με την μέθοδο της βαθυτυπίας (*Our Story*, n.d.).

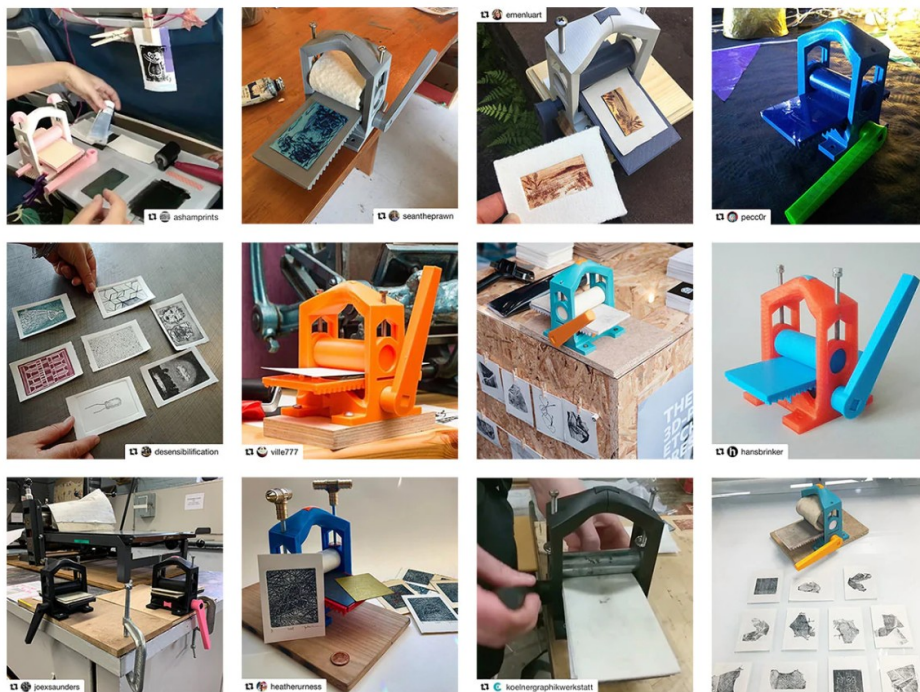


Εικόνα 69: Λειτουργικός εκτυπωτής βαθυτυπίας κατασκευασμένος με τρισδιάστατη εκτύπωση. Design του Open Press Project

Στιγμιότυπο από: (*Open Press Project – The 3D-Printed Printing Press*, n.d.)

Το project είχε ως σκοπό την σχεδίαση μιας εκτυπωτικής πρέσας βαθυτυπίας που θα μπορούσε με σκοπό να κατασκευαστεί εξολοκλήρου από κάποιον ενδιαφερόμενο με τη χρήση ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή (Εικόνα 69). Στόχος τους ήταν να κατασκευαστεί μια πρέσα μικρή και ελαφριά για να μεταφέρεται εύκολα, αλλά και οικονομική για να είναι προσιτή σε έναν απλό καταναλωτή. Το project σχεδιάστηκε να είναι ανοιχτού κώδικα, οπότε το μόνο κόστος αποτελούν τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή, ενώ τα αρχεία του τρισδιάστατου μοντέλου μπορούν να είναι διαθέσιμα από την ιστοσελίδα των δημιουργών.

Πράγματι το Open Press Project είχε μεγάλη επιτυχία. Μέχρι σήμερα τα αρχεία της πρέσας έχουν ληφθεί σχεδόν 60.000 φορές. Δημιουργοί από όλο τον κόσμο άρχισαν να κατασκευάζουν μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης την δικιά τους πρέσα με διάφορες τροποποιήσεις και να μοιράζουν τα έργα τους που εκτύπωσαν μέσω αυτής (Εικόνα 70).



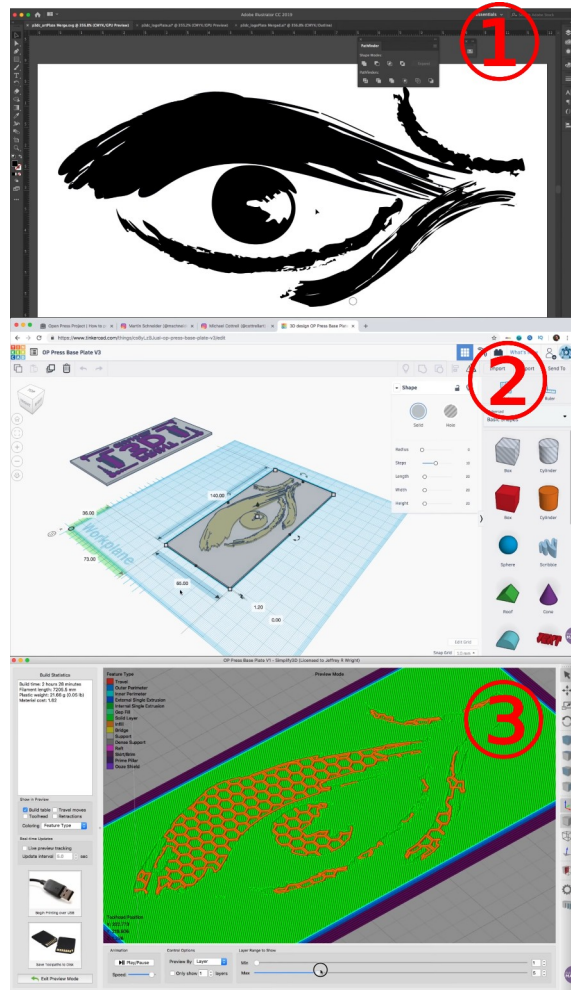
Εικόνα 70: Εκτυπώσεις και τρισδιάστατες εκτυπωμένες εκτυπωτές της κοινότητας Open Press Project

Στιγμιότυπο από: (Our Story, n.d.)

Οι διάφορες τροποποιήσεις που κατασκευάστηκαν από την κοινότητα είναι πραγματικά εντυπωσιακές. Αφορούν διαφοροποιήσεις σχετικά με τις διαστάσεις των εκτυπωτών για την εκτύπωση σε μεγαλύτερα υποστρώματα έως και τροποποιήσεις για την δυνατότητα χρήσης διαφορετικών εκτυπωτικών πλακών υψιτυπίας, οι οποίες μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα κανάλια στο youtube (Kris Slyka, 2021) και (Ransom Makes, 2019) δείχνουν αναλυτικά σε βίντεο πως μπορεί κανείς να κατασκευάσει μια εκτυπωτική πλάκα με τη χρήση ψηφιακών προγραμμάτων που είναι διαθέσιμα (Εικόνα 71). Η διαδικασία

περιλαμβάνει την απλή σχεδίαση του σχεδίου σε ένα πρόγραμμα επεξεργασίας/σχεδίασης γραφικών όπως είναι το adobe photoshop, το adobe Illustrator ή το Inkscape. Στη συνέχεια το αρχείο θα πρέπει να αποθηκευτεί σε μορφή .svg. Προγράμματα όπως το Tinkercad μπορούν να μετατρέψουν δισδιάστατα αρχεία τύπου .svg σε τρισδιάστατα. Έτσι με τέτοια προγράμματα εύκολα μπορεί κανείς να σχεδιάσει μια βάση και πάνω σε αυτή να τοποθετήσει το σχέδιο του ως μια επιπλέον προεξέχουσα κατασκευή. Προφανώς η διαδικασία απαιτεί γνώσεις των προγραμμάτων αυτών και επιπλέον της χρήσης των τρισδιάστατων εκτυπωτών για βέλτιστα αποτελέσματα.

Τέτοιες προσπάθειες που προέρχονται από το ερασιτεχνικό περιβάλλον είναι σημαντικές και αξιοπρόσεκτες. Με ανάλογα μέσα θα μπορούσε ο τομέας των Γραφικών τεχνών να κάνει περισσότερο γνωστές τις υπηρεσίες του. Για παράδειγμα θα μπορούσαν κατασκευαστές εκτυπωτών τύπου offset ή φλεξογραφίας να επενδύσουν στην εφεύρεση τρόπων κατασκευής εκτυπωτών με χαμηλό κόστος μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το αποτέλεσμα θα μπορούσε να δημιουργήσει την δυνατότητα κατασκευής εκτυπωτικών μηχανών στην τοποθεσία όπου πρόκειται να εγκατασταθεί μια νέα εταιρία εκτυπώσεων. Θα μπορούσε να κάνει την τεχνολογία των κατασκευαστών πιο προσιτή σε μικροεπιχειρήσεις αυξάνοντας τον αριθμό των πελατών και ταυτόχρονα θα ελάττωνε το κόστος κατασκευ-



Εικόνα 71: Τρισδιάστατη εκτύπωση εκτυπωτικής πλάκας υψιτυπίας. 1) σχεδίαση του design σε πρόγραμμα επεξεργασίας γραφικών (Illustrator) 2) μετατροπή δισδιάστατου σχεδίου σε τρισδιάστατο για την κατασκευή εκτυπωτικής πλάκας (Tinkercad) 3) επεξεργασία και προετοιμασία του μοντέλου για εκτύπωση

Στιγμιότυπα από: (Ransom Makes, 2019)

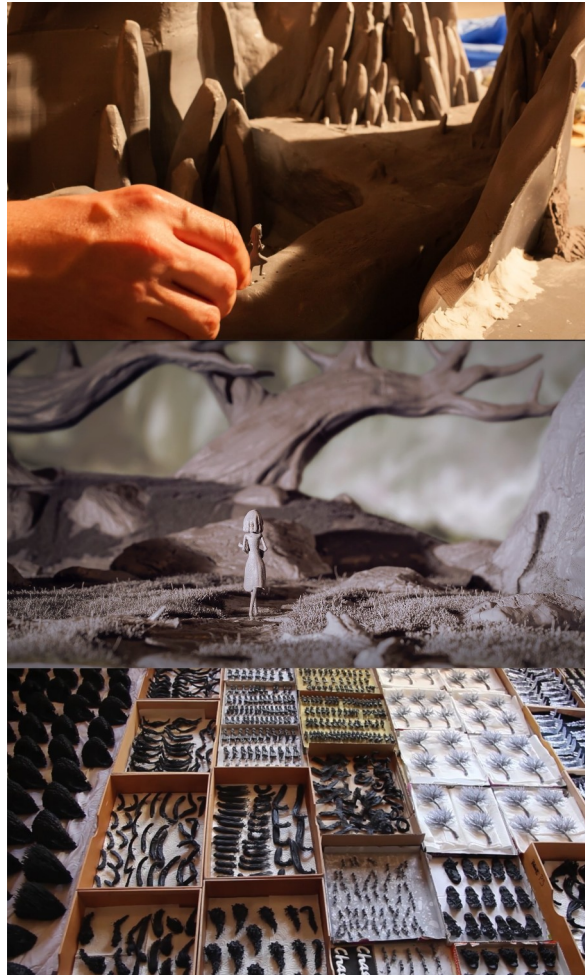
ής των εκτυπωτικών μηχανών. Ο πειραματισμός όσον αφορά την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο χώρο των Γραφικών τεχνών είναι ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο και έχει ακόμα πολλά περιθώρια βελτίωσης. Αποτελεί μια ευκαιρία για μεγάλες εταιρίες Γραφικών τεχνών να συνεισφέρουν και να μοιράσουν τις γνώσεις τους στο περιβάλλον της τρισδιάστατης εκτύπωσης, εάν επιθυμούν να μεταβούν σε αυτό με δυναμικό τρόπο.

3.8 Εφαρμογές για το Animation/ stop-motion

Ένας ιδιαίτερος τομέας στον οποίο μπορεί να ωφελήσει αυτή η τεχνολογία είναι και ο τομέας του κινούμενου σχεδίου/ Animation. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν αρκετά παραδείγματα, όπου έχει χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνολογία για την καταγραφή animation τύπου stop motion. Η τεχνική stop motion παραμένει να είναι animation, ωστόσο σε αυτή γίνεται χρήση κάμερας με την οποία φωτογραφίζεται κάθε φορά ένα frame μιας σκηνής από την πραγματικότητα με σκοπό να δημιουργείται παρόμοια οφθαλμαπάτη κάνοντας να φαίνεται ότι τα αντικείμενα στην σκηνή κινούνται από μόνα τους.

Η φύση αυτής της τέχνης έχει να κάνει με την κατασκευή και κίνηση τρισδιάστατων αντικειμένων, επομένως η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αποδειχτεί πολύ

χρήσιμη. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα είναι το stop motion animation με τίτλο "Chase Me" του σκηνοθέτη Gilles-Alexandre Deschaud (Εικόνα 72) που βραβεύτηκε ως Best in Show στην εκδήλωση SIGGRAPH Asia το 2015 και ως Best Experimental στην εκδήλωση Paris Short film Festival το 2016 (A 3D Printed Film —, n.d.). Αυτό το έργο μικρής έκτασης έγινε εξολοκλήρου με την χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή των φιγούρων και του



Εικόνα 72: Διαδικασία κατασκευής και σκηνές από το animation Chase Me

Πηγή: (A 3D Printed Film —, n.d.)

περιβάλλοντος. Κάθε δευτερόλεπτο του αποτελείται αποτελείτε από 12 frames που σημαίνει πως για κάθε από αυτά χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό μοντέλο, το οποίο κάθε φορά έπρεπε να εκτυπωθεί ξεχωριστά. Πρέπει να σημειωθεί πως ανάλογα με την προοπτική κάθε σκηνής, οι φιγούρες έπρεπε να εκτυπωθούν σε διαφορετικές διαστάσεις για την καλύτερη απόδοση του βάθους.

Πέρα από την εξαιρετική και συναρπαστική σκηνοθεσία του έργου, είναι πολύ σημαντικό να παρατηρήσει κανείς πόσο η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να βελτιώσει την έκφραση και την αίσθηση της κίνησης σε ένα animation τύπου stop motion.

3.9 Εφαρμογές για τον κινηματογράφο

Η δυνατότητα κατασκευής περίπλοκων αντικειμένων σε σύντομο χρόνο και μάλιστα με μικρό κόστος, έχει κάνει την τρισδιάστατη εκτύπωση ένα σημαντικό παράγοντα για τον τομέα του κινηματογράφου. Μια κινηματογραφική εταιρία που κάνει συνεχή χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι η κινηματογραφική εταιρία Marvel. Ως σκηνοθέτης ταινιών που παράγει ετησίως έργα φανταστικού περιεχομένου ωφελείται ιδιαίτερα από αυτή την τεχνολογία. Στην εταιρία Marvel η κύρια χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης αφορά την κατασκευή των στολών και τον εξοπλισμό των υπερηρώων της.

Παραδείγματα αυτών των κατασκευών είναι η περικεφαλαία της Hela από την ταινία Thor Ragnarok (Εικόνα 73). Η περικεφαλαία αυτή κατασκευάστηκε με την τεχνολογία Vat Photopolymerization με εκτυπωτή τύπου Selective Laser Sintering (SLS) αφού έγινε το κατάλληλο τρισδιάστατο σκανάρισμα της ηθοποιού Cate Blanchett για την ακριβή καταγραφή των διαστάσεων. Η εκτύπωση έγινε με την χρήση σύνθετου υλικού σε μορφή σκόνης, το οποίο ενισχύθηκε με ίνες άνθρακα, ώστε η τελική κατασκευή να είναι ελαφριά αλλά και να διαθέτει στιβαρότητα. Λόγω του μεγέθους της κατασκευής, η περικεφαλαία έπρεπε να κατασκευαστεί σε πολλά τμήματα και μετά να συναρμολογηθεί (Adam Savage's Tested, 2017).



Εικόνα 73: Η περικεφαλαία της Hera

Πηγή: (Adam Savage's Tested, 2017)

Άλλο παράδειγμα χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης στα έργα της Marvel αφορά την κατασκευή του πολύ γνωστού σφυριού του Thor το οποίο στο έργο μπορεί να μοιάζει ότι είναι φτιαγμένο από πολύ βαριά μέταλλα αλλά στην πραγματικότητα είναι κατασκευασμένο με πολυμερή υλικά με την χρήση της τεχνολογία Binder jetting (Εικόνα 74). Η επαγγελματική επεξεργασία της κατασκευής, όπως το φινίρισμα, το βάψιμο καθώς και τα video effects συνεισφέρουν στο φανταστικό αποτέλεσμα της εμφάνισης του σφυριού (Propshop, 2014).



Εικόνα 74: Κατασκευή και τελικό αποτέλεσμα του σφυριού του Thor.

Πηγή: (Propshop, 2014)

4. Κατασκευή λειτουργικής πρέσας υψιτυπίας

Ο στόχος της εργασίας είναι η κατασκευή μιας πρέσας υψιτυπίας με την χρήση τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση του λογοτύπου του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Αποτελεί μια προσπάθεια καταγραφής και μεταφοράς γνώσεων, που αποκτήθηκαν κατά την διαδικασία της κατασκευής και της χρήσης αυτής της τεχνολογίας στον τομέα των Εφαρμοσμένων τεχνών και ιδιαίτερα στον τομέα των Γραφικών τεχνών.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής χωρίζεται στα παρακάτω μέρη:

1. Προετοιμασία
2. Προσαρμοστική σχεδίαση του λογοτύπου προς εκτύπωση
3. Επιλογή και χρήση του προγράμματος CAD
4. Επιλογή και χρήση του προγράμματος Slicer
5. Τρισδιάστατη εκτύπωση και συναρμολόγηση της πρέσας υψιτυπίας
6. Εκτύπωση με τη χρήση της κατασκευασμένης πρέσας υψιτυπίας.

4.1 Προετοιμασία

Κατανόηση της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης ενός αντικειμένου

Η διαδικασία που απαιτείται για την κατασκευή ενός αντικειμένου μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Σχεδιασμό του ψηφιακού τρισδιάστατου αντικειμένου σε ένα πρόγραμμα CAD
- Μετατροπή του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου αντικειμένου σε αρχείο μορφής stl μέσω του προγράμματος CAD
- Εισαγωγή του αρχείου stl σε πρόγραμμα slicer όπου θα γίνουν οι “προεκτυπωτικές διεργασίες” που περιλαμβάνουν:
 - Το στήσιμο του ψηφιακού μοντέλου στη κατάλληλη κλίση και θέση.
 - Την σχεδίαση της βάσης στήριξης του αντικειμένου
 - Τον καθορισμό των διαστάσεων του αντικειμένου
 - Την μετατροπή του αρχείου σε αρχείο μορφής G-code
- Τροφοδότηση και ενεργοποίηση του τρισδιάστατου εκτυπωτή
- Εκτύπωση/κατασκευή του αντικειμένου
- Μετεκτυπωτικές διεργασίες.

Επιλογή του design της πρέσας υψυτιπίας

Η σχεδίαση του αντικειμένου που πρόκειται να εκτυπωθεί μπορεί να αρχίσει με μολύβι και χαρτί, με γραφίδα και ένα πρόγραμμα ψηφιακής σχεδίασης ή σε ένα πρόγραμμα επεξεργασίας γραφικών.

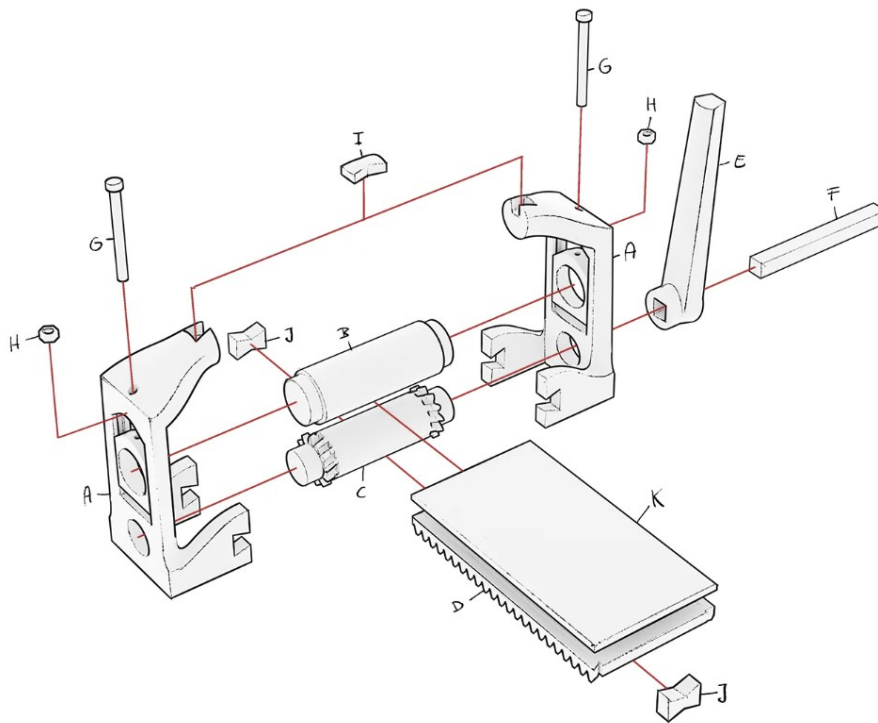
Μετά την σχεδίαση, παίρνοντας αναφορά από τα σχέδια μπορεί να δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο σε πρόγραμμα CAD.

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας το μοντέλο που εκτυπώθηκε ήταν ήδη σχεδιασμένο και αποθηκευμένο σε μορφή αρχείου stl. Ως μοντέλο επιλέχθηκε η πρέσα του Open Press Project που αναφέρθηκε προηγουμένως και ήταν διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <https://www.thingiverse.com/thing:2841592>.

Το μοντέλο αποτελείται από διάφορα μέρη που περιλαμβάνονται σε αρχεία stl. Τα μέρη της πρέσας (εικόνα 74) είναι:

- A) Δύο πλευρικά τμήματα
- B) Ο κύλινδρος συμπίεσης
- C) Ο κύλινδρος μεταφοράς πλατφόρμας εκτύπωσης
- D) Η πλατφόρμα εκτύπωσης
- E) Ο μοχλός
- F) Συνδετικό στοιχείο (καρφί/nail)
- G) Δύο βίδες τύπου M4 (δεν εκτυπώνονται)
- H) Δύο κοχλίες (δεν εκτυπώνονται)
- I) Η επάνω επιφάνεια σύνδεσης των δυο πλευρών
- J) Δύο κομμάτια σύνδεσης των δυο πλευρών
- K) Ύφασμα ελάττωσης τριβής (αφρολέξ) (δεν εκτυπώνεται)

Επιπλέον, θα πρέπει να σχεδιαστεί από την αρχή η εκτυπωτική πλάκα που θα περιέχει το λογότυπο του Πανεπιστημίου. Η διαδικασία θα αναλυθεί παρακάτω.



Εικόνα 75: Τα μέρη της εκτυπωτικής πρέσας όπως περιγράφονται στο Open Source Project

Εικόνα από: (How to 3D Print Your Own Printing Press, n.d.)

Εξοπλισμός και υλικά

Ηλεκτρονικός εξοπλισμός:

Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας ιδιωτικός υπολογιστής με τον οποίο έγινε η χρήση των προγραμμάτων σχεδίασης/μοντελοποίησης. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν :

- Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής CraftBot Plus (τεχνολογίας FDM) που λειτουργεί στο εργαστήριο 3DHUB (Βόλος) και χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση των εκτυπωτικών πλακών.

- Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές Creality Ender-3 Pro και Creality Ender-3 MAX (τεχνολογίας FDM) που λειτουργούν στο εργαστήριο 3D GORESHOP (Βόλος) για την κατασκευή των μερών της πρέσας αλλά και για επιπλέον εκτυπωτικές πλάκες.

Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη κατασκευή ήταν το πρόγραμμα Inkscape για την επεξεργασία των γραφικών και προγράμματα Blender και TinkerCad για τα προγράμματα σχεδιασμού CAD. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα PrusaSlicer και το Cura (προγράμματα Slicer).

Ως εξοπλισμός για την συναρμολόγηση της εκτυπωτικής πρέσας χρησιμοποιήθηκαν :

- επαναφορτιζόμενο τρυπάνι/δρέπανο με τρυπάνι 5 χιλ.
- χαρτοκόπτης για την λείανση των περαιτέρω πλαστικών
- εξάρτημα λείανσης για το δρέπανο για την λείανση της επιφάνειας και απομάκρυνση περιττών πλαστικών
- ηλεκτρικός τροχός για την λείανση μεταλλικών εξαρτημάτων των αιχμηρών επιφανειών των κοχλιών.
- 2 κοχλίες σε μορφή ντίζας τα οποία κόπηκαν στο επιθυμητό μήκος. Για την λαβή χρησιμοποιήθηκαν δυο περικόχλια M5 που συγκολλήθηκαν με ηλεκτροσυγκόλληση. Στη συνέχεια οι επιφάνειες λειάνθηκαν με τροχό.
- Έγινε χρήση υδραυλικής τανάλιας για την πίεση των συνδετικών πλευρών της πρέσας.
- Σφυρί για την περαιτέρω πίεση των κομματιών σύνδεσης των πλευρών της πρέσας.
- Υαλόχαρτο για το φινίρισμα των τρισδιάστατα εκτυπωμένων εκτυπωτικών πλακών

Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση των εντύπων μέσω της πρέσας:

- Ταμπόν σφραγίδας
- Υπόστρωμα εκτύπωσης: χαρτί CANSON 220 g/m²

Για την κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης των μερών της πρέσας και ενός σετ εκτυπωτικών πλακών χρησιμοποιήθηκε PLA (σε μορφή filament). Επίσης χρησιμοποιήθηκε TPU (σε μορφή filament) για την κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης ενός επιπλέον σετ εκτυπωτικών πλακών.

4.2 Προσαρμογή του σχεδίου του λογοτύπου προς εκτύπωση

Αρχικά επιλέχθηκε να σχεδιαστεί το λογότυπο που επρόκειτο να εκτυπωθεί. Πρόκειται για το λογότυπο του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Το αρχείο έπρεπε να είναι σε μορφή SVG ώστε να μπορεί να εισαχθεί στο πρόγραμμα CAD για επεξεργασία και να είναι σχεδιασμένο με διανυσματικά γραφικά (vector graphics) για την βέλτιστη ανάλυση.

Για την σχεδίαση του λογοτύπου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Inkscape. Οι μορφές του λογοτύπου είναι πολλές όπως φαίνεται στην επίσημη ιστοσελίδα (εικόνα 76) όπου περιγράφεται η οπτική ταυτότητα του Πανεπιστημίου (<https://www.uniwa.gr/to-panepistimio/optiki-taytotita/meros-2o/>). Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η ασπρόμαυρη εμβληματική μορφή του λογοτύπου.

Δύο μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την σχεδίαση του λογοτύπου:

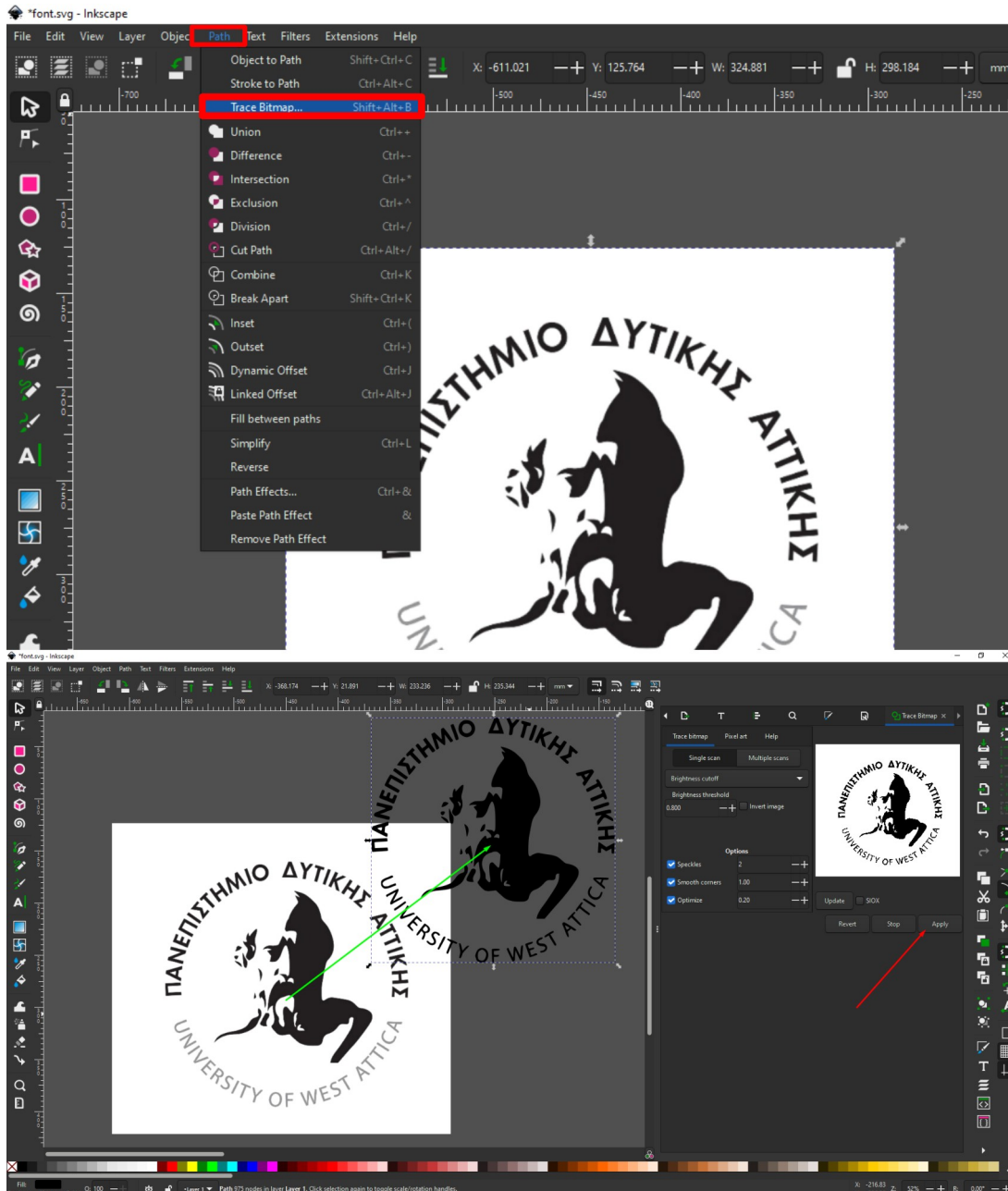
Πρώτα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος trace bitmap που επιτρέπει την απομόνωση των σκούρων σημείων μιας εικόνας και την μετατροπή αυτών σε paths/διανυσματικά γραφικά. Η διαδικασία εφαρμογής αυτής της τεχνικής περιγράφεται στην εικόνα 77. Η μέθοδος αυτή διευκολύνει όταν απαιτείται γρήγορη εφαρμογή, αλλά παρουσιάζει λάθη, όπως φαίνεται στην εικόνα 78, τα οποία όμως δεν επηρεάζουν την γενική εικόνα. Τα λάθη φαίνονται κυρίως στον τίτλο αλλά το καλ-



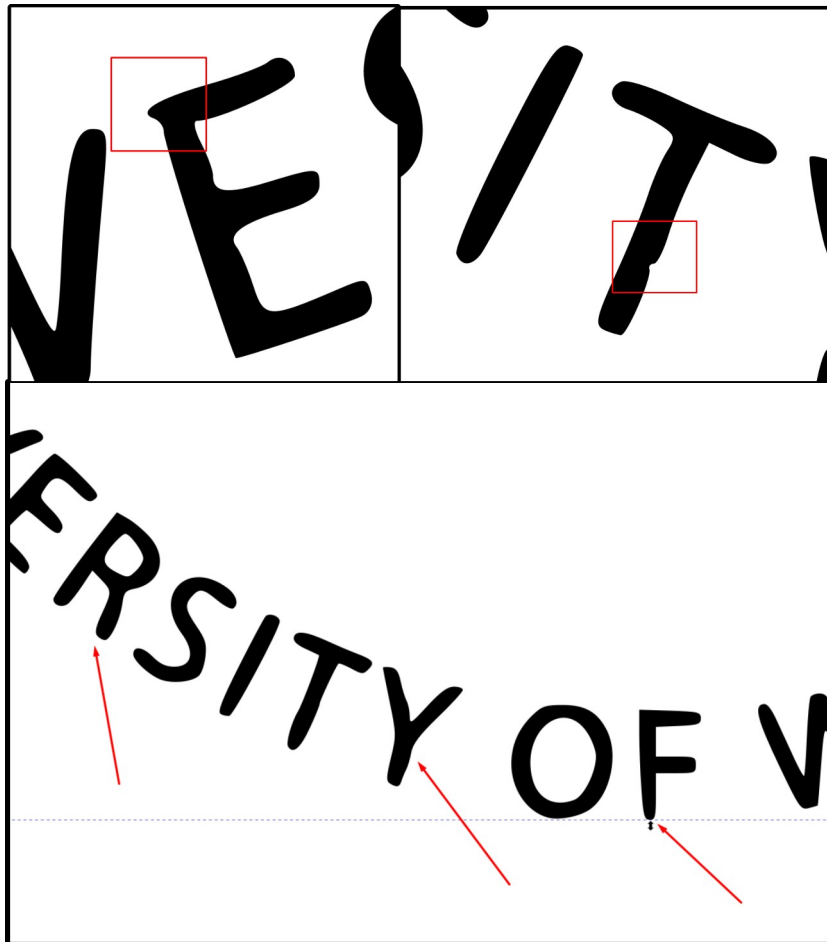
Εικόνα 76: Οι επίσημες μορφές του λογοτύπου του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Στιγμιότυπο από: <https://www.uniwa.gr/to-panepistimio/optiki-taytotita/meros-2o/>

λιτεχνικό κομμάτι (η προτομή του Πλάτωνα) δεν εμφανίζει καμία διαφορά με το πρωτότυπο. Τα λάθη του τίτλου διορθώθηκαν με επεξεργασία των paths του.



Εικόνα 77: Χρήση της λειτουργίας trace bitmap



Εικόνα 78: Λάθη που προέκυψαν κατά την λειτουργία *trace bitmap*

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας. Σε αυτή την περίπτωση το λογότυπο θα έπρεπε να αποτελείται από το δημιουργικό μέρος του λογοτύπου που παράχθηκε με την προηγούμενη μέθοδο και με την εισαγωγή, επεξεργασία και τοποθέτηση του τίτλου από την αρχή, που σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο με το πρωτότυπο.

Στην εικόνα 79 φαίνονται κάποιες αποκλίσεις που προέκυψαν σε σχέση με το πρωτότυπο.



Εικόνα 79: Απόκλιση του λογοτύπου που σχεδιάστηκε με την υβριδική μέθοδο. Σε κόκκινο φαίνεται το λογότυπο που σχεδιάστηκε και, με μαύρο το λογότυπο, όπως αναφέρεται στην επίσημη ιστοσελίδα του Πανεπιστημίου.

Τέλος, έγινε σύγκριση μεταξύ των δυο σχεδίων που δημιουργήθηκαν και του πρωτότυπου, όπως φαίνεται στην εικόνα 80.

Να σημειωθεί πως τα σχέδια έπρεπε να σχεδιαστούν σε κατάλληλη μορφή (κατοπτρική) ώστε να εκτυπωθεί σωστά το λογότυπο στο τέλος.



Εικόνα 80: Σύγκριση των λογοτύπων που σχεδιάστηκαν.

4.3 Επιλογή και χρήση του προγράμματος CAD

Περιγραφή Προγραμμάτων CAD

Τα προγράμματα CAD επιτρέπουν την σχεδίαση/μοντελοποίηση δισδιάστατων ή τρισδιάστατων μοντέλων μέσα από τρισδιάστατο ψηφιακό χώρο. Ως CAD (Computer Aided Design) ορίζεται η χρήση λογισμικού υπολογιστών για την υποβοήθηση της διαδικασίας σχεδιασμού ενός design (Wesley Chai, n.d.). Τα προγράμματα CAD μπορούν να χαρακτηριστούν ως προγράμματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Αυτά τα προγράμματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές εργασίες, που αφορούν τομείς, όπως είναι η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αρχιτεκτονική και όποιος άλλος τομέας είναι δυνατόν να επωφεληθεί από την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Το σημαντικό στοιχείο σε αυτά τα προγράμματα είναι ότι επιτρέπουν την σχεδίαση, επεξεργασία και προβολή τρισδιάστατων αντικειμένων στο χώρο πριν να κατασκευαστούν. Επίσης μπορούν να προσφέρουν εξοικονόμηση χρόνου συγκριτικά με άλλους παραδοσιακούς τρόπους κατασκευής, όπως είναι το σκάλισμα στο κερί και πηλό.

Τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα μπορούν να αποκτήσουν πραγματική μορφή στον φυσικό κόσμο με την τεχνολογία τύπου computer numerical control (CNC). Τέτοιες τεχνολογίες είναι οι τόρνοι τύπου CNC, οι κόπτες λέιζερ και η τρισδιάστατη εκτύπωση. Η τρισδιάστατη εκτύπωση διαφέρει από τις παραδοσιακές τεχνολογίες CNC στο ότι είναι προσθετική μέθοδος και όχι αφαιρετική. Για να μπορέσουν αυτές οι τεχνολογίες να κατασκευάσουν τα τρισδιάστατα μοντέλα, θα χρειαστεί να τροφοδοτηθούν με τις κατάλληλες εντολές (G-Code), που περιγράφουν το πώς θα κατασκευαστεί το συγκεκριμένο μοντέλο. Η μετατροπή του τρισδιάστατου μοντέλου σε G-Code έχει πλέον αυτοματοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων, ενώ παλαιότερα έπρεπε να προγραμματιστούν οι εντολές με την γραφή κατάλληλου κώδικα. Στην περίπτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η μετατροπή σε G-Code γίνεται με τα προγράμματα slicer που θα αναφερθούν αργότερα.

Είδη τρισδιάστατης μοντελοποίησης

Τα προγράμματα CAD δεν είναι όλα ίδια μεταξύ τους, αντίθετα κάθε πρόγραμμα εξειδικεύεται σε ένα είδος τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Κάποια προγράμματα μπορούν να παρέχουν πολλαπλά είδη τρισδιάστατης μοντελοποίησης, αλλά συνήθως μόνο ένα από αυτά είναι κατάλληλα προσαρμοσμένο για ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα. Παρακάτω θα αναφερθούν τα τρία βασικά είδη τρισδιάστατης μοντελοποίησης.

Solid Modeling

Αυτό το είδος τρισδιάστατης μοντελοποίησης βασίζεται κυρίως στην χρήση τρισδιάστατων σχημάτων. Τα σχήματα αυτά μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους για την επίτευξη διαφόρων αποτελεσμάτων. Ένα σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία εσοχής μέσα σε άλλο, ενώ κάποιο άλλο σχήμα μπορεί να δημιουργήσει εξοχή ή να συνδεθεί με κάποιο τρίτο. Κάθε σχήμα μπορεί να τροποποιηθεί με προσαρμογή των διαστάσεών του ή με τη χρήση κατάλληλων τροποποιητών (modifiers) σε διάφορα προγράμματα μοντελοποίησης. Είναι δυνατή μέχρι και η κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων από δισδιάστατα σχέδια κάνοντας χρήση της πιο κλασικής λειτουργίας extrude, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια του project.

Γενικά η χρήση αυτού του είδους λειτουργίας χρησιμοποιείται κυρίως για την σχεδίαση απλών μοντέλων ή αντικειμένων, όπως μηχανικών εξαρτημάτων, όπου απαιτούνται απλά γεωμετρικά μοντέλα με επίπεδες επιφάνειες.

Προγράμματα που εξειδικεύονται επάνω σε αυτό το είδος τρισδιάστατης μοντελοποίησης είναι το Tinkercad, FreeCAD, SketchUp και το Fusion 360.

Το είδος αυτό είναι κατάλληλο για κάποιο νέο χρήστη στο περιβάλλον της τρισδιάστατης μοντελοποίησης αφού είναι από τα λιγότερο περίπλοκα, ασφαλή όσο αφορά την εμφάνιση προβλημάτων και επίσης, δεν απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Ωστόσο το μειονέκτημα τους είναι ότι δεν επιτρέπουν την σχεδίαση μοντέλων που απαιτούν μεγάλη λεπτομέρεια. Στην περίπτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, μοντέλα σχεδιασμένα με αυτό το είδος είναι δύσκολο να εμφανίσουν προβλήματα κατά την προσθετική κατασκευή (Leon Ortiz, 2020).

Polygonal Modeling

Αυτό το είδος τρισδιάστατης μοντελοποίησης διαφέρει από το προηγούμενο στο ότι ο σχεδιασμός γίνεται με δομικά στοιχεία που δημιουργούν ένα τρισδιάστατο σχήμα. Το είδος τρισδιάστατης μοντελοποίησης χαρακτηρίζεται από την δημιουργία και επεξεργασία πολυγώνων (polygons). Για την σχεδίαση ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με αυτή τη μοντελοποίηση, δισδιάστατα πολύγωνα συνδυάζονται μεταξύ τους με κατάλληλες κλίσεις. Τα πολύγωνα αποτελούνται από τα παρακάτω στοιχεία.

Vertex: αποτελεί την κορυφή ενός πολυγώνου

Edge: είναι το άκρο ή η γραμμή που συνδέει δυο κορυφές. Ένα άκρο μπορεί να είναι η τομή δύο ή περισσότερων επιφανειών (faces).

Face: είναι μία κλειστή επιφάνεια που ορίζεται από τρεις ή περισσότερες ακμές

Η χρήση των στοιχείων αυτών επιτρέπει την μοντελοποίηση περίπλοκων μοντέλων σε σχέση με έτοιμα τρισδιάστατα σχήματα. Βέβαια το αρνητικό αυτού του είδους μοντελοποίησης είναι ότι για την σχεδίαση απλών γεωμετρικών μοντέλων χρειάζεται πολύ περισσότερος χρόνος σε σχέση με το solid modeling. Εδώ αξίζει να αναφερθεί πως τα πιο δημοφιλή προγράμματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης και των δύο ειδών μοντελοποίησης, γεγονός που επιτρέπει την χρήση solid modeling για την μοντελο-

ποίηση της γενικής εμφάνισης του μοντέλου και στη συνέχεια την χρήση του polygonal modeling για την μοντελοποίηση λεπτομερειών.

Τα πιο γνωστά προγράμματα που παρέχουν αυτόν τον συνδυασμό μοντελοποίησης είναι το Blender, Rhino και το Maya.

Surface Modeling

Με την τρισδιάστατη μοντελοποίηση συνήθως σχεδιάζονται στερεά (solid) μοντέλα. Αυτό σημαίνει ότι τα μοντέλα αυτά περιέχουν πληροφορία σχετικά με την επιφάνεια αλλά και τον εσωτερικό τους χώρο. Αυτό φαίνεται όταν ενεργοποιείται η λειτουργία mesh στο πρόγραμμα μοντελοποίησης που επιτρέπει να εμφανιστεί το πλέγμα του αντικειμένου. Το πλέγμα αυτό επιτρέπει να εμφανιστεί ο τρόπος που συνδέονται μεταξύ τους τα διάφορα δομικά στοιχεία του μοντέλου. Το πλέγμα είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της τρισδιάστατης μοντελοποίησης γιατί είναι ο κύριος παράγοντας που θα καταστήσει το μοντέλο κατάλληλο για την τελική του χρήση, είτε αυτό πρόκειται να κατασκευαστεί με τρισδιάστατη εκτύπωση και άλλες τεχνολογίες CNC ή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως φιγούρα σε βιντεοπαιχνίδι.

Αν και το μοντέλο χρειάζεται να είναι πάντα συμπαγές, η surface modeling στηρίζεται κυρίως στην μοντελοποίηση των επιφανειών των μοντέλων. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία αντικειμένων τα οποία διαθέτουν περίπλοκες επιφάνειες και που δεν μπορούν να κατασκευαστούν με solid modeling. Τέτοιου είδους επιφάνειες είναι κυρίως οι αεροδυναμικές.

Αν και είναι δυνατή η μοντελοποίηση συμπαγών μοντέλων με αυτή τη μέθοδο, τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι επιφάνειες/πολύγωνα που δεν συνδέονται μεταξύ τους αυτόματα, αλλά πρέπει να συνδεθούν χειροκίνητα. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία στη μοντελοποίηση αλλά την καθιστά κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές, που αφορούν τομείς όπως την αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία.

Ωστόσο χρησιμοποιείται πολλές φορές σε συνδυασμό με τη μέθοδο solid modeling σε ειδικές περιπτώσεις. Επίσης surface modeling επιφανειακή μοντελοποίηση επιτρέπει την διόρθωση του πλέγματος συμπαγών μοντέλων που πιθανόν έχουν λάθη (Autodesk Fusion 360, 2020).

Να σημειωθεί πως είναι δυνατή η μετατροπή μοντέλων τύπου surface σε solid, όπως και το αντίστροφο, αλλά μοντέλα surface δεν διαθέτουν ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως πλέγματα και πάχος επιφανειών, γεγονός που δεν επιτρέπει τη χρήση τους για εφαρμογή με τεχνολογίες CNC (*3D Printing Explained*, n.d.).

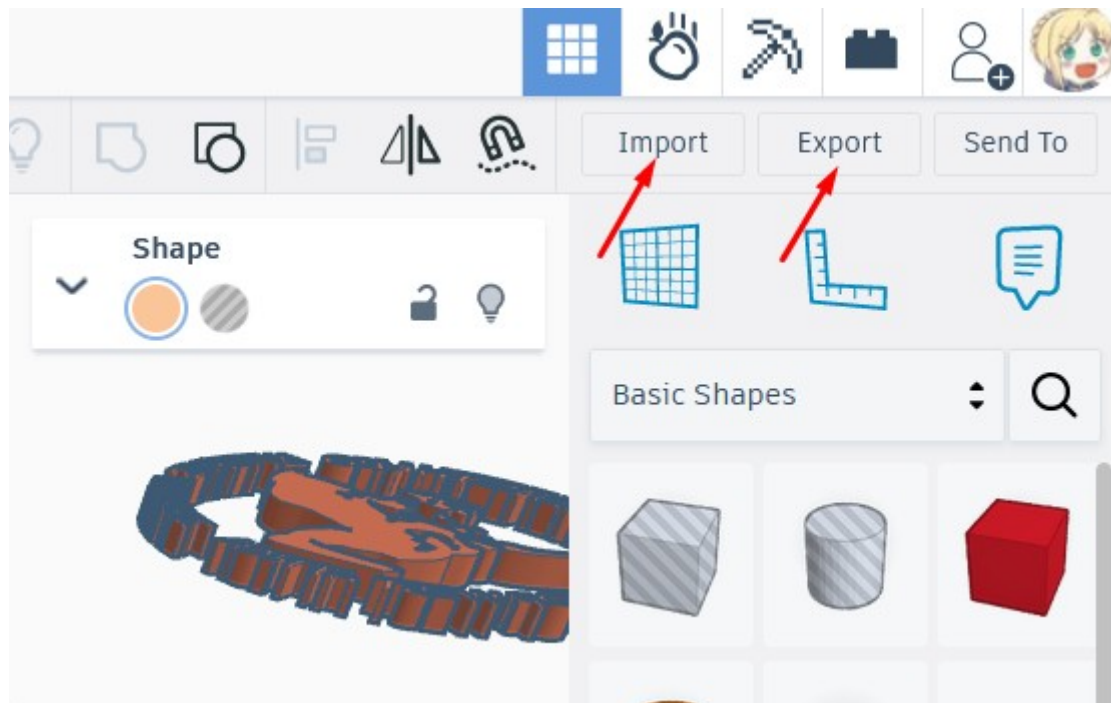
Κάποια από τα προγράμματα που είναι εξειδικευμένα στην surface modeling είναι το Autodesk Fusion 360, Maya και το Zbrush.

Χρήση του προγράμματος CAD

Τα προγράμματα CAD που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο project ήταν το Tinkercad και το Blender. Το Tinkercad χρησιμοποιήθηκε επειδή είναι από τα λιγότερο περίπλοκα προγράμματα και και ταυτόχρονα είναι φιλικό προς αρχάριους χρήστες και πολύ αποτελεσματικό. Το Blender χρησιμοποιήθηκε επειδή προσφέρει πολύ περισσότερες λειτουργίες για βελτιστοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου. Η ιδέα ήταν πως ένα πρόγραμμα τόσο δημοφιλές όπως το Blender θα ήταν εύκολο στην εκμάθησή του λόγω του άπειρου υλικού που διατίθεται στο διαδίκτυο. Σημειώνεται ότι και τα δυο προγράμματα είναι δωρεάν.

Μοντελοποίηση με το πρόγραμμα Tinkercad

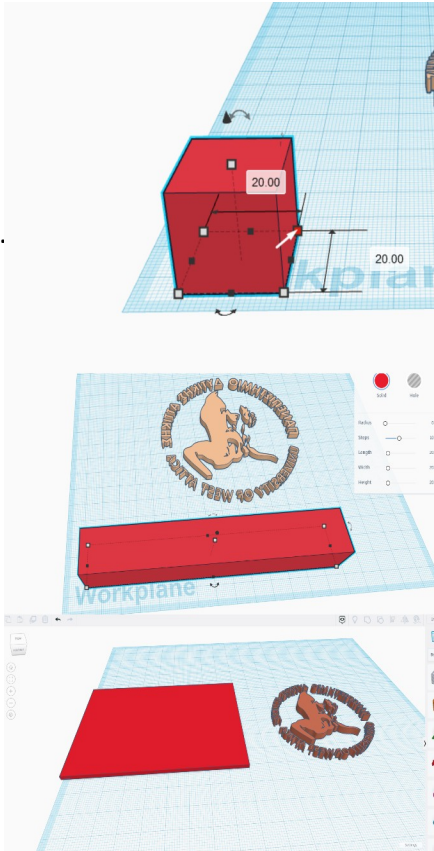
Το πρόγραμμα επιτρέπει την γρήγορη εισαγωγή αρχείων μορφής .svg όπως και την επεξεργασία αυτών. Μάλιστα κατά την εισαγωγή των δισδιάστατων αρχείων .svg το πρόγραμμα μπορεί να τα αποδώσει (extrude) κατευθείαν σε τρισδιάστατη μορφή.



Εικόνα 81: Απλός τρόπος εισαγωγής και εξαγωγής αρχείων

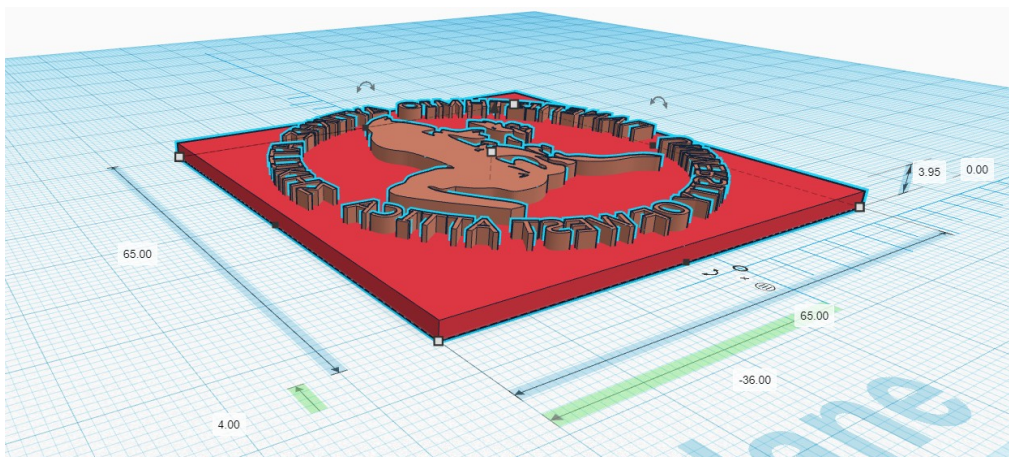
Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Tinkercad

Επιπλέον το πρόγραμμα διαθέτει και έτοιμα τρισδιάστατα σχήματα τα οποία μπορούν να τροποποιηθούν, ώστε να δημιουργηθεί το σχήμα της επιλογής του χρήστη. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται να κατασκευαστεί μια πλάκα με πάχος 2 mm και λοιπές διαστάσεις 65x65 mm για να χρησιμοποιηθεί ως βάση για το εκτυπωτικό στοιχείο (λογότυπο). Για την κατασκευή της πλάκας χρησιμοποιήθηκε ως βάση ένας κύβος και στη συνέχεια τροποποιήθηκαν οι διαστάσεις του.



Εικόνα 82: Τροποποίηση βασικού τρισδιάστατου σχήματος

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Tinkercad



Εικόνα 83: Οι διαστάσεις του μοντέλου της τρισδιάστατα κατασκευασμένης εκτυπωτικής πλάκας

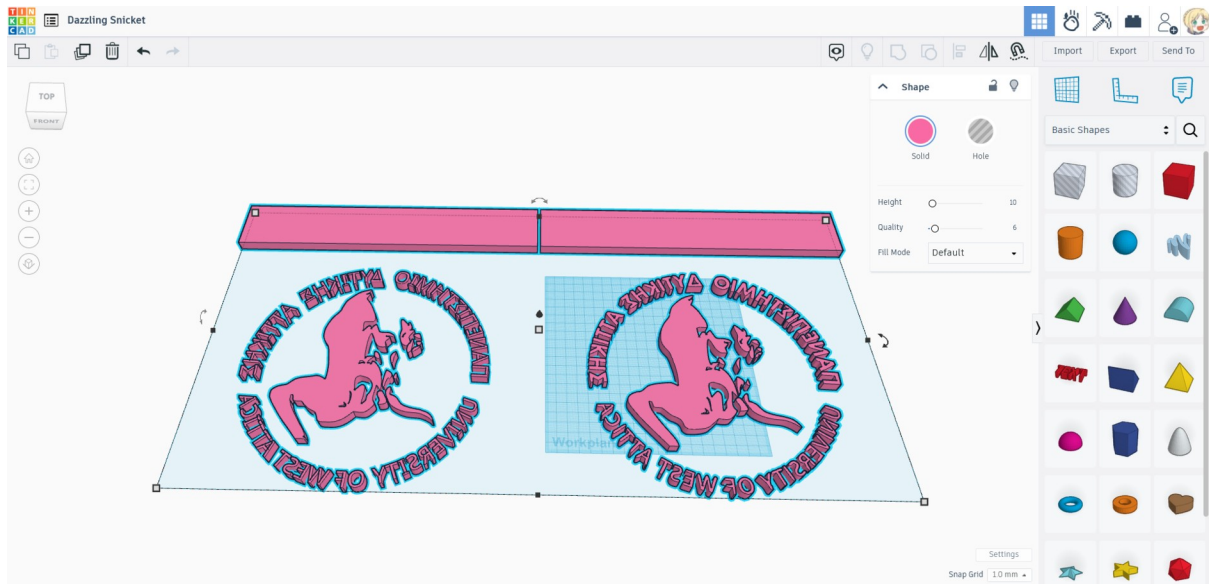
Στιγμιότυπο από: το πρόγραμμα Tinkercad

Η ένωση του λογοτύπου και της πλάκας επιχειρήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το τελικό ύψος της εκτυπωτικής πλάκας να αθροίσει περίπου στα 3.95 mm.

Τέλος έγινε η εξαγωγή (export) του αρχείου σε μορφή stl. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για το σχέδιο που δημιουργήθηκε με την τεχνική trace bitmap και την υβριδική τεχνική.

Παρατηρήσεις

Αρχικά, κατά την εισαγωγή του αρχείου .svg που περιείχε και τις δύο μορφές του λογοτύπου, ήταν αδύνατος ο διαχωρισμός τους και το πρόγραμμα αναγνώριζε τα δύο σχέδια ως ένα (Εικόνα 84). Ακολούθησε ο αναγκαστικός διαχωρισμός των δύο διαφορετικών σχεδίων σε ξεχωριστά αρχεία .svg και τότε μόνο έγινε δυνατή η εισαγωγή τους στο Tinkercad.



Εικόνα 84: Αδύνατος διαχωρισμός στοιχείων που εισάχθηκαν στο πρόγραμμα ως ένα αρχείο.

Μοντελοποίηση με το πρόγραμμα Blender

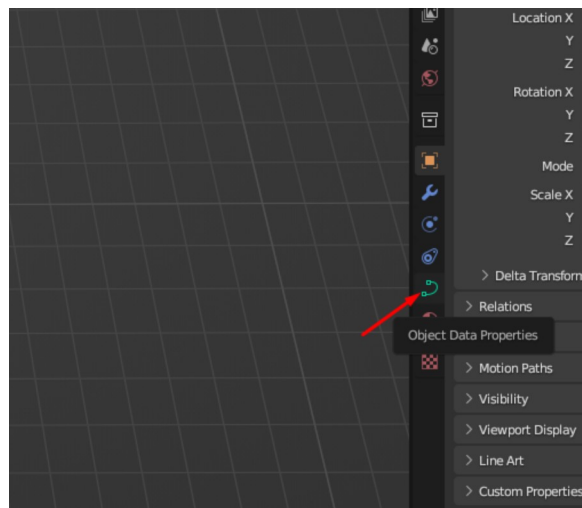
Το πρόγραμμα τρισδιάστατης μοντελοποίησης Blender μπορεί να θεωρηθεί πολυεργαλείο λόγω των διαφόρων τρόπων μοντελοποίησης που περιλαμβάνει (polygonal, surface, solid, κτλ.). Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα εφαρμογής ρεαλιστικών εφέ σε τρισδιάστατα μοντέλα αλλά και της δημιουργίας animaton.

Στην περίπτωση του μοντέλου της εκτυπωτικής πλάκας χρησιμοποιήθηκε η μοντελοποίηση τύπου solid modeling (όπως έγινε και στο πρόγραμμα Tinkercad) και έγινε και προσπάθεια χρήσης της polygonal modeling.

Για την κατασκευή του μοντέλου με την χρήση της solid modeling ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως στο πρόγραμμα Tinkercad. Η διαδικασία ήταν πολύ πιο δύσκολη λόγω της δυσκολίας κατανόησης του προγράμματος. Τελικά, εφαρμόστηκαν δυο διαφορετικές μέθοδοι για την μοντελοποίηση των εκτυπωτικών πλακών.

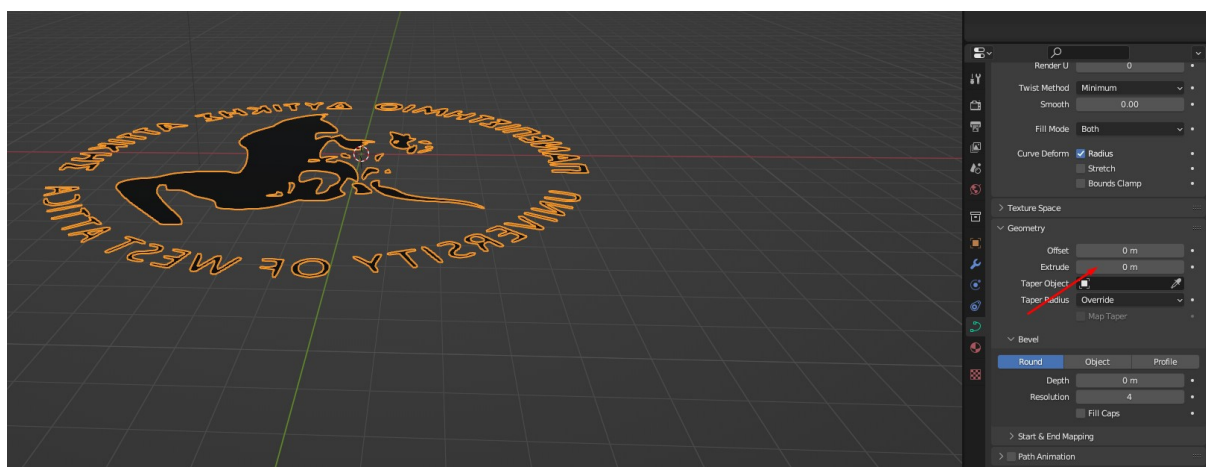
Η πιο εύκολη μέθοδος περιελάμβανε την χρήση των μεταβλητών στο μενού geometry. Τα βήματα για την μοντελοποίηση ήταν τα παρακάτω:

1. Εισαγωγή του αρχείου .svg
2. Προσαρμογή των διαστάσεων του λογότυπου
3. Έχοντας επιλέξει το λογότυπο: επιλογή object data properties > geometry > extrude.
Με την μεταβλητή extrude επιλέγονται οι διαστάσεις του λογότυπου (για παράδειγμα το ύψος).



Εικόνα 83: Μενού Object Data Properties

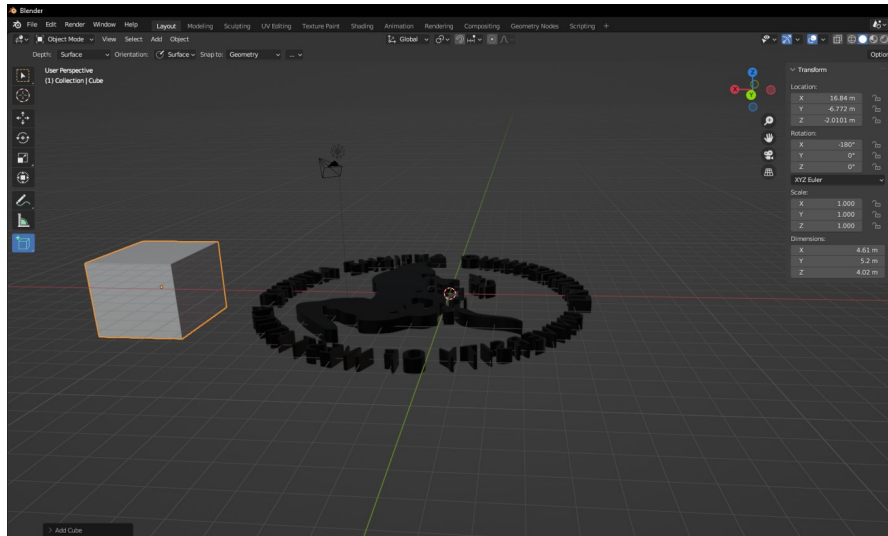
Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender



Εικόνα 84: Η λειτουργία extrude.

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender

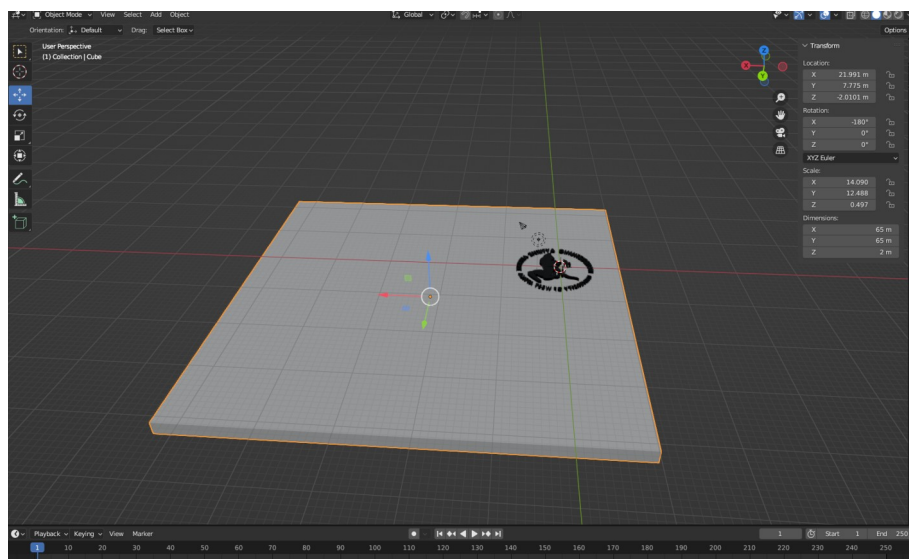
4. Εισαγωγή ενός βασικού τρισδιάστατου σχήματος, που σε αυτή την περίπτωση επε-
λέγη ο κύβος.



Εικόνα 85: Εισαγωγή κύβου

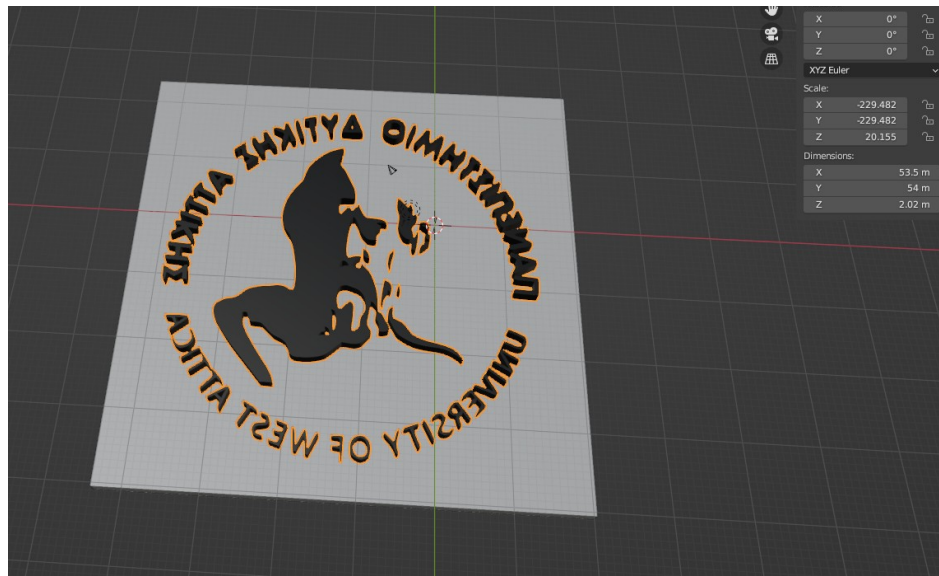
Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender

5. Τροποποίηση των διαστάσεων του μοντέλου έτσι ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμη-
τή πλάκα.



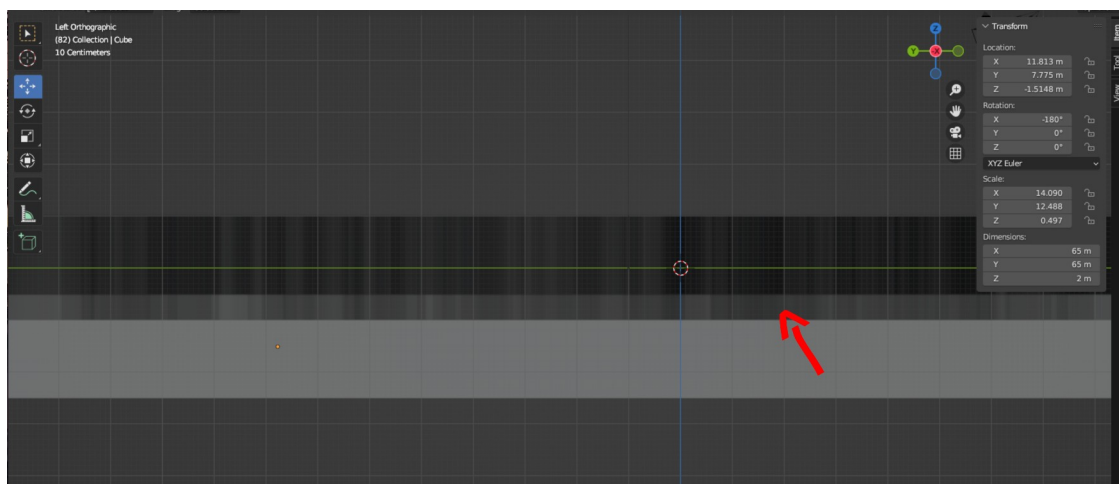
Εικόνα 86: Τροποποίηση διαστάσεων

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender



Εικόνα 87: Συνδυασμός πλάκας και λογότυπου

6. Συνδυασμός της πλάκας με το λογότυπο δίνοντας προσοχή να υπάρχει επαφή μεταξύ αυτών των στοιχείων.



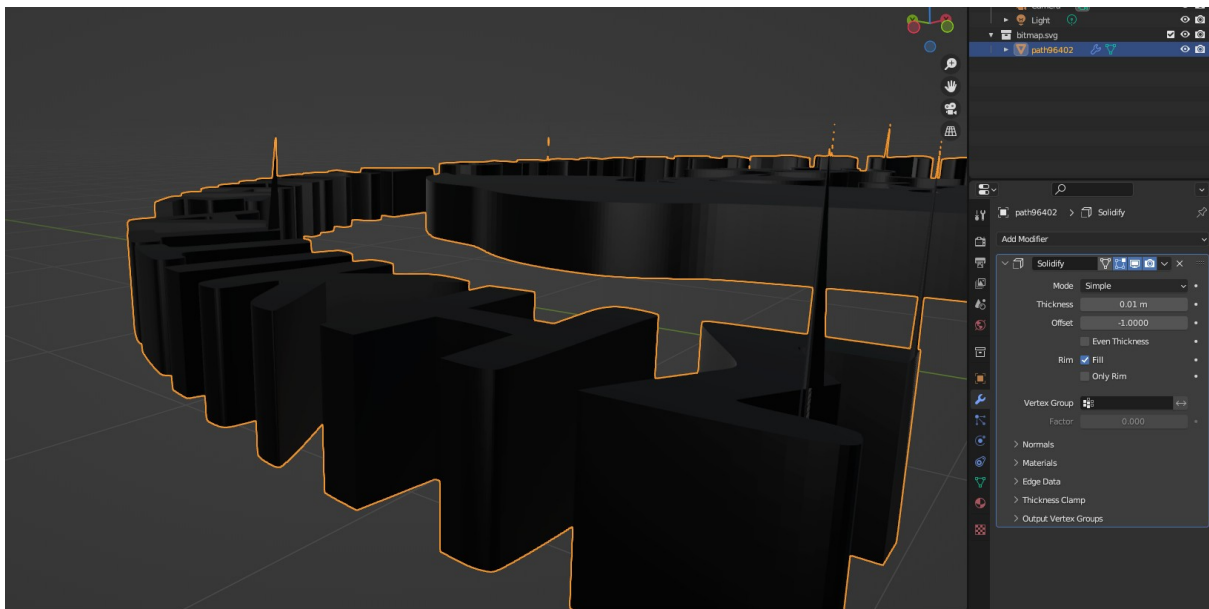
Εικόνα 88: Το σημείο που έχει βυθιστεί το λογότυπο (μαύρο) με την πλάκα (γκρι)

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender

7. Εξαγωγή σε αρχείο .stl

Αφού ολοκληρώθηκε το αρχείο με την παραπάνω μέθοδο, έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης της ποιότητας του μοντέλου με τη χρήση άλλης μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός αυτής της μεθόδου ήταν η εφαρμογή της μεταβλητής Boolean που σύμφωνα με στοιχεία που ανασύρθηκαν κατά τη διαδικτυακή έρευνα, βελτιστοποιεί την επεξεργασία του μοντέλου από το πρόγραμμα Slicer και αντίστοιχα βελτιώνει την τελική εκτύπωση του μοντέλου. Η μεταβλητή Boolean βοηθάει στο λογικό συνδυασμό των πλεγμάτων των μοντέλων, ώστε να μην εμφανίζονται γεωμετρικές ανωμαλίες (προβλήματα στις διατάξεις πλέγματος).

Η εφαρμογή αυτής της λειτουργίας όμως απαιτεί τη μετατροπή του δισδιάστατου μοντέλου (λογότυπο) σε πλέγμα πολυγώνων. Κάνοντας την μετατροπή, το πλέγμα που δημιουργήθηκε παρουσίασε λάθη (ελαττώματα και εξογκώματα).

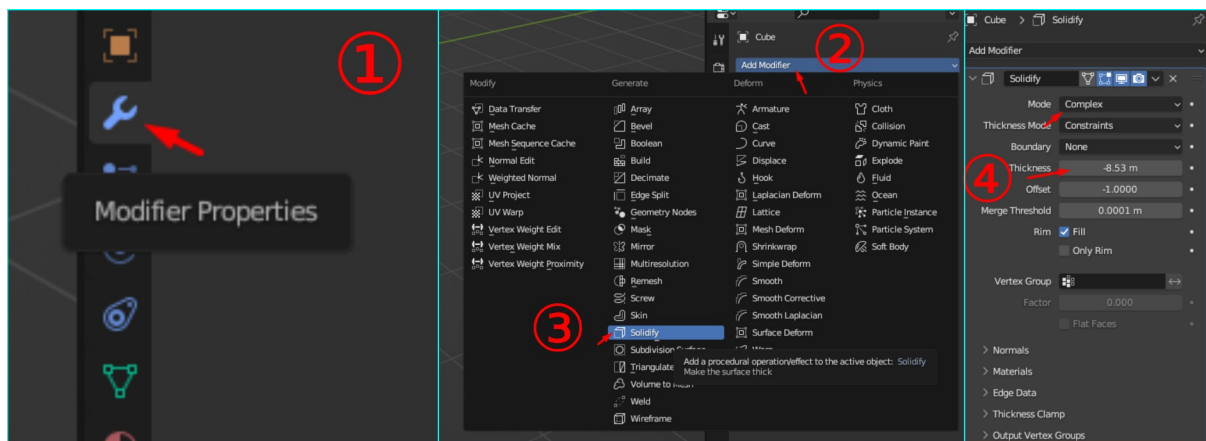


Εικόνα 89: Λάθη στο πολυγωνικό πλέγμα του μοντέλου όπου εμφανίζονται ακίδες

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender

Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες λύσεις που αφορούσαν τον καθαρισμό των περιττών πολυγώνων που δημιουργούσαν τα εξογκώματα. Η διαδικασία περιλάμβανε τα παρακάτω βήματα:

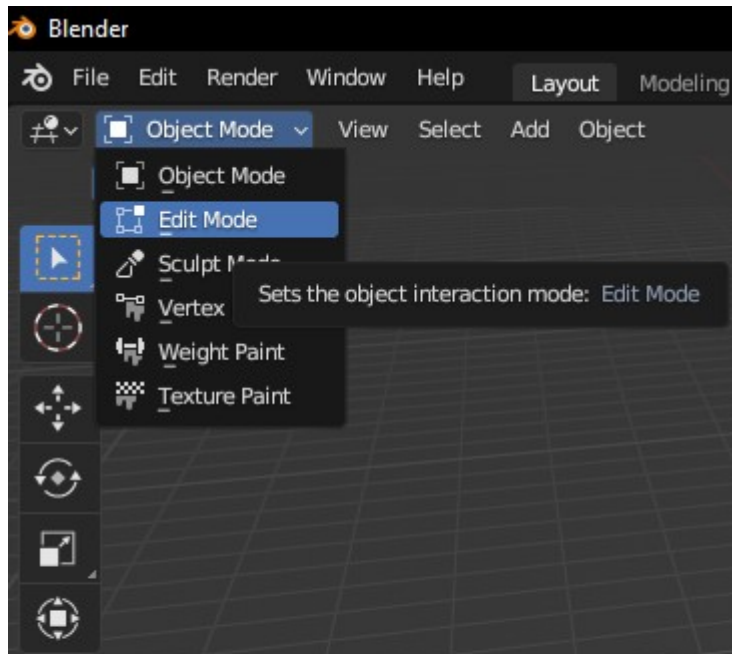
1. Εισαγωγή του αρχείου .svg
2. Προσαρμογή των διαστάσεων του λογοτύπου
3. Δεξί κλικ επάνω στο δισδιάστατο σχέδιο που πρόκειται να γίνει η εξώθηση και επιλογή convert to > mesh
4. Έχοντας επιλέξει το λογότυπο: modifier properties > add modifier > solidify. Στη συνέχεια επιλέγεται το ύψος του λογοτύπου με τη βοήθεια της μεταβλητής thickness σε αυτή την περίπτωση. Επίσης έγινε αλλαγή του mode σε complex που περιόρισε τις λανθασμένες διατάξεις πλέγματος.



Εικόνα 90: 1) Επιλογή Modifier Properties 2-3) Επιλογή του modifier Solidify 4) Αλλαγή του mode σε Complex

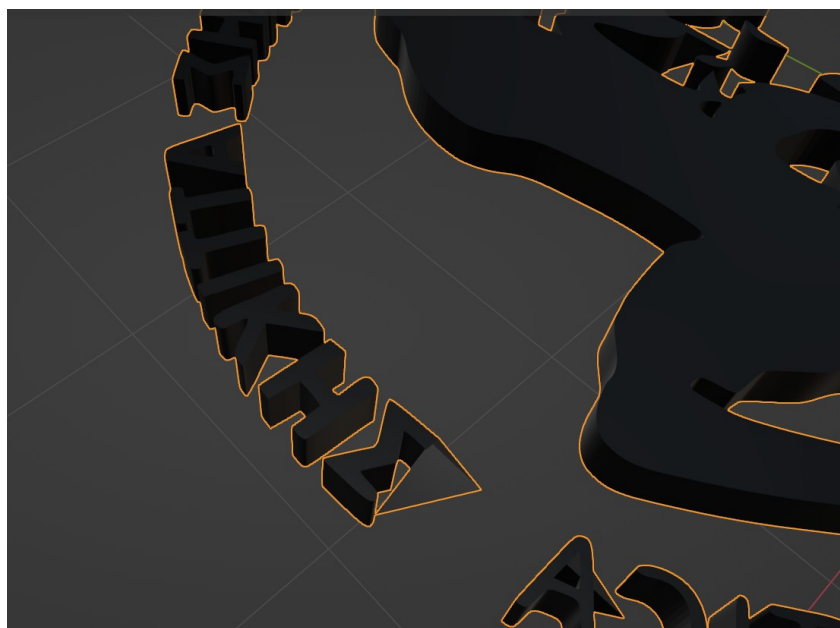
Στιγμιότυπα από το πρόγραμμα Blender

5. Σε αυτό το βήμα γίνεται καθαρισμός των περιττών πολυγώνων, που αφορά την μετάβαση στο edit mode για την επεξεργασία του πλέγματος των μοντέλων.



Εικόνα 91: Μετάβαση στο Edit Mode

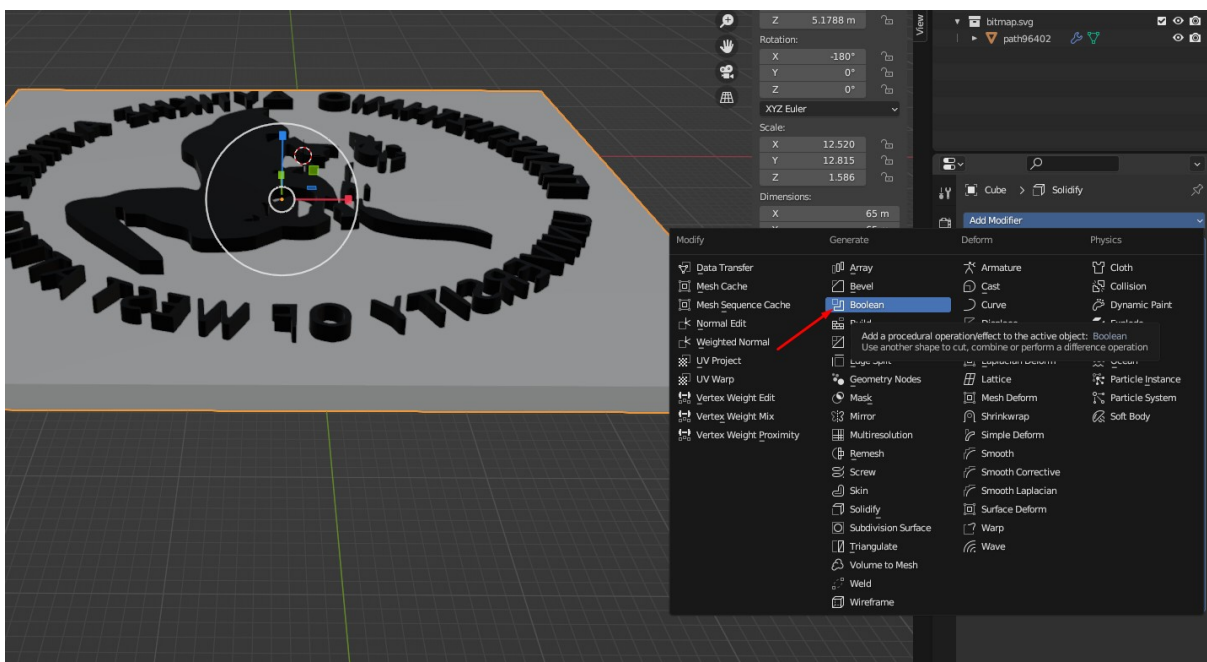
Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender



Εικόνα 92: Περιττά πολύγωνα όπως φαίνεται στο γράμμα "σ"

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender

6. Μετά το καθάρισμα γίνεται και πάλι εισαγωγή ενός βασικού τρισδιάστατου σχήματος (κύβος)
7. Ακολουθεί τροποποίηση των διαστάσεων του μοντέλου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή πλάκα.
8. Στη συνέχεια γίνεται συνδυασμός της πλάκας με το λογότυπο δίνοντας προσοχή να υπάρχει επαφή μεταξύ αυτών των στοιχείων.
9. Σε αυτό το σημείο της μεταβλητής Boolean έχοντας επιλέξει τα δυο στοιχεία που θέλουμε να συνδυάσουμε και στη συνέχεια επιλέγουμε modifier properties > add modifier > Boolean



Εικόνα 93: Εφαρμογή του modifier "Boolean"

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα Blender

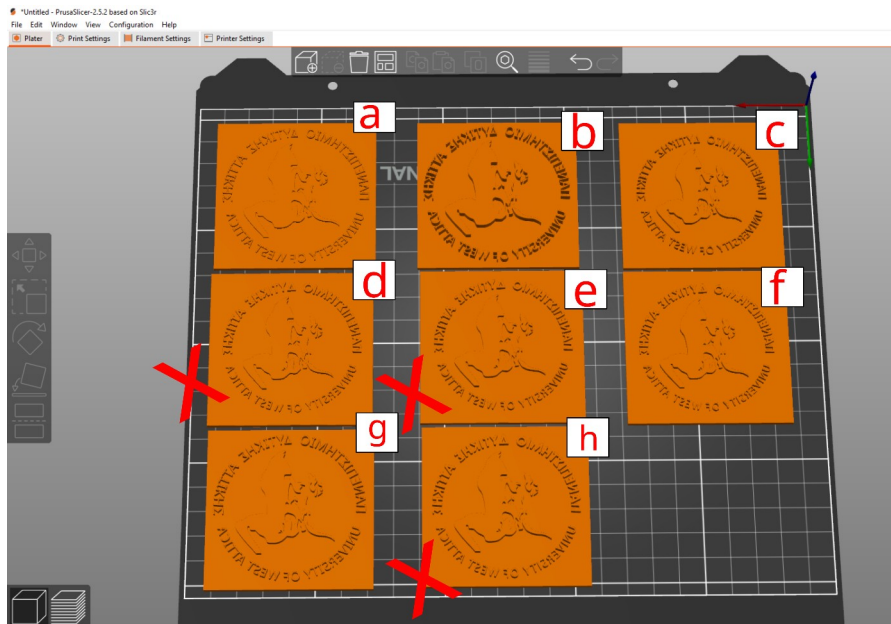
10. Εξαγωγή σε αρχείο .stl

Ολοκληρώνοντας την μοντελοποίηση των τρισδιάστατων αρχείων συλλέχθηκε ένας αριθμός διαφορετικών μοντέλων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν ήταν όλοι οι συνδυασμοί που φαίνονται στον πίνακα (2), όπου αριστερά αναγράφονται οι μέθοδοι σχεδίασης του λογοτύπου στο Inkscape και επάνω αναγράφονται με τη σειρά οι διάφορες μέθοδοι μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν.

- Με ● σημειώνονται οι συνδυασμοί που σχεδιάστηκαν
- Με x σημειώνονται τα μοντέλα που ήταν ελαττωματικά και έπρεπε να απορριφθούν
- Με ▲ σημειώνονται τα μοντέλα που εκτυπώθηκαν
- Με E σημειώνονται οι εκτυπωτικές πλάκες των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση με την πρέσα.
- Με P σημειώνονται τα μοντέλα που εκτυπώθηκαν με PLA
- Με T σημειώνονται τα μοντέλα που εκτυπώθηκαν με TPU

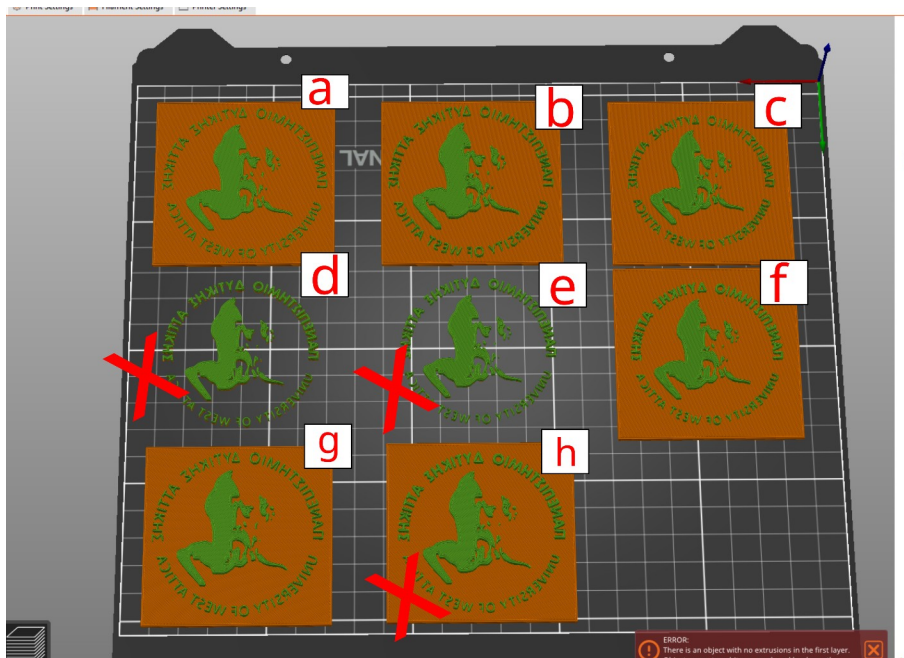
Πίνακας 2: Τα σχεδιασμένα μοντέλα και οι συνδυασμοί μεθόδων

Μέθοδος σχεδίασης στο Inkscape/ Μέθοδος Μοντελοποίησης	Blender Polygonal modeling	Blender Polygonal modeling + Boolean	Blender Solid modeling	Tinkercad Solid modeling
Υβριδική μέθοδος	●	●▲PTE	●	●▲PT
Trace bitmap	●x	●x	●▲PTE	●x



Εικόνα 94: Τα ελαττωματικά μοντέλα των εκτυπωτικών πλακών

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα PrusaSlicer



Εικόνα 95: Ελαττωματικά μοντέλα εκτυπωτικών πλακών όπως φαίνονται κατά την παραγωγή των layers

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα PrusaSlicer

4.4 Επιλογή και χρήση του προγράμματος Slicer.

Περιγραφή προγραμμάτων Slicer

Όπως έχει αναφερθεί το πρόγραμμα Slicer είναι πρόγραμμα που ως κύρια λειτουργία του έχει την μετατροπή ενός δισδιάστατου μοντέλου (σε μορφή stl) σε εντολές (G-Code) που περιγράφουν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή την διαδικασία κατασκευής του. Στην πραγματικότητα, το G-Code μεταφράζει το τρισδιάστατο μοντέλο σε επίπεδα και ταυτόχρονα περιγράφει τις κινήσεις της κεφαλής του εκτυπωτή για την κατασκευή. Με αυτή την λειτουργία, το πρόγραμμα επιτρέπει την επιλογή της θέσης και της κλίσης κατασκευής του μοντέλου επάνω στην πλατφόρμα κατασκευής/εκτύπωσης.

Πίνακας 3: Σημαντικότερες ρυθμίσεις και αναφορά καταχωρημένων τιμών

Λειτουργίες	Επεξήγηση ορολογίας	Ρύθμιση
Layer height	Ύψος των επιπέδων	0.2mm
Nozzle	Το μέγεθος του ακροφυσίου	0.5mm
infill	Το ποσοστό της πλήρωσης	100%
Print speed	Η ταχύτητα εκτύπωσης	60
Temperature	Η θερμοκρασία του ακροφυσίου	210°C
Travel speed	Η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής	20mm
Wall thickness	Το πάχος των εξωτερικών και εσωτερικών τοιχωμάτων	1.0mm
Wall line count	Ο αριθμός των εξωτερικών τοιχωμάτων	2
supportmaterial	Χρήση υλικού στήριξης	όχι



Σε αντίθεση με τα προγράμματα CAD, τα διάφορα προγράμματα Slicer δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Οι διαφορές τους αναφέρονται στις διαθέσιμες προεκτυπωτικές ρυθμίσεις και λειτουργίες. Στον πίνακα 3 αναφέρονται οι σημαντικότερες από αυτές τις λειτουργίες και ο τρόπος ρύθμισης αυτών στο πρόγραμμα Cura για τα τμήματα της πρέσας.

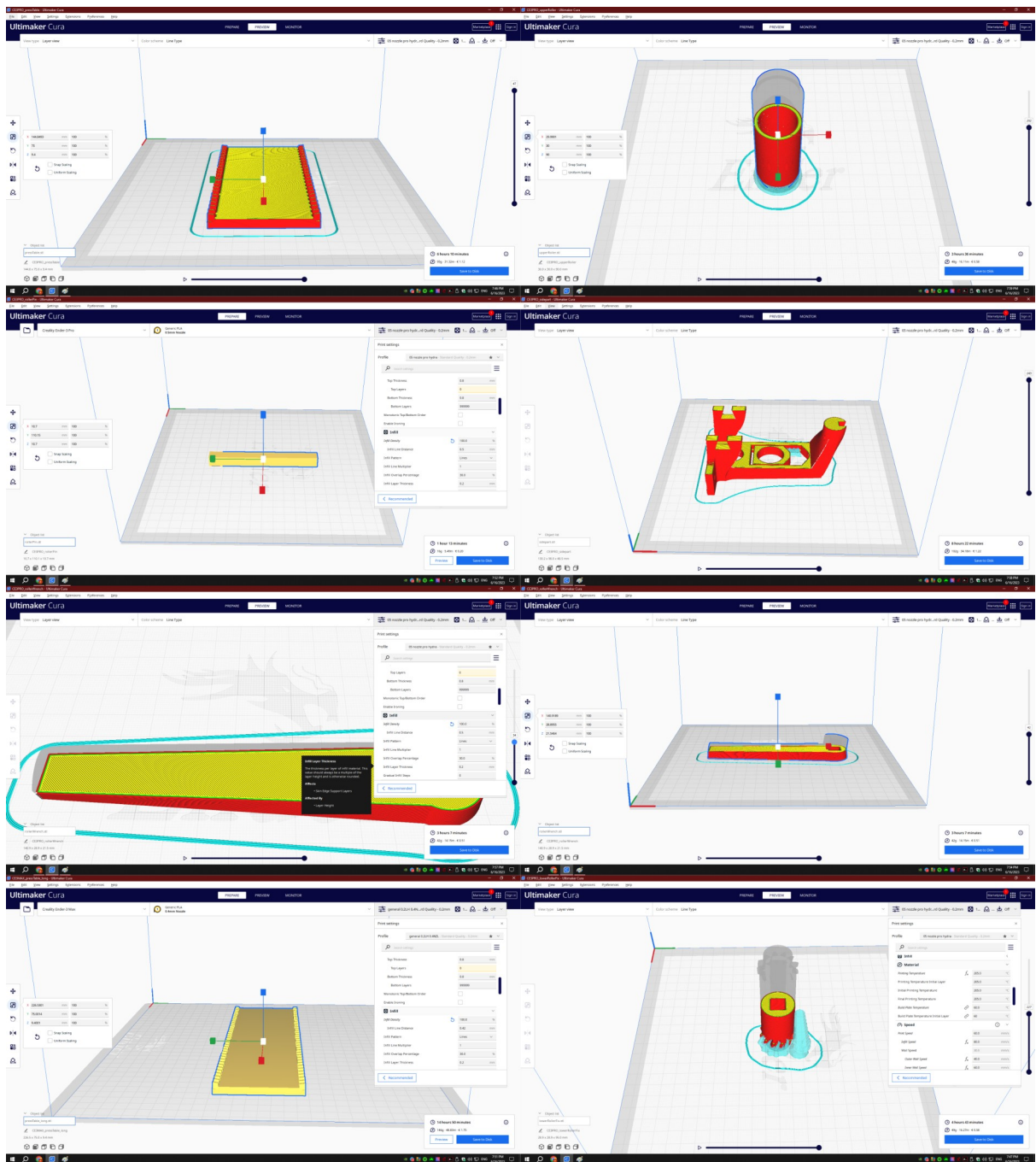
Για την προεκτύπωση των εκτυπωτικών πλακών χρησιμοποιήθηκε το PrusaSlicer και το Cura. Οι ρυθμίσεις δεν καταγράφηκαν.

Όπως προαναφέρθηκε, κάποια μοντέλα εκτυπωτικών πλακών έπρεπε να απορριφθούν επειδή εμφάνιζαν παραμορφώσεις ή δεν ήταν επεξεργάσιμα από το πρόγραμμα Slicer. Παράδειγμα παραμόρφωσης παρουσιάζεται παρακάτω στην εικόνα 96 από το μοντέλο που κατασκευάστηκε με την τεχνική trace bitmap και μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα Tinkercad.



Εικόνα 96: Ελαττωματικά στοιχεία των απορριφθέντων εκτυπωτικών πλακών

Στιγμιότυπο από το πρόγραμμα PrusaSlicer



Εικόνα 97: Η διαδικασία μετατροπής των τμημάτων της πρέσας σε G-code

Στιγμιότυπα από το πρόγραμμα Cura

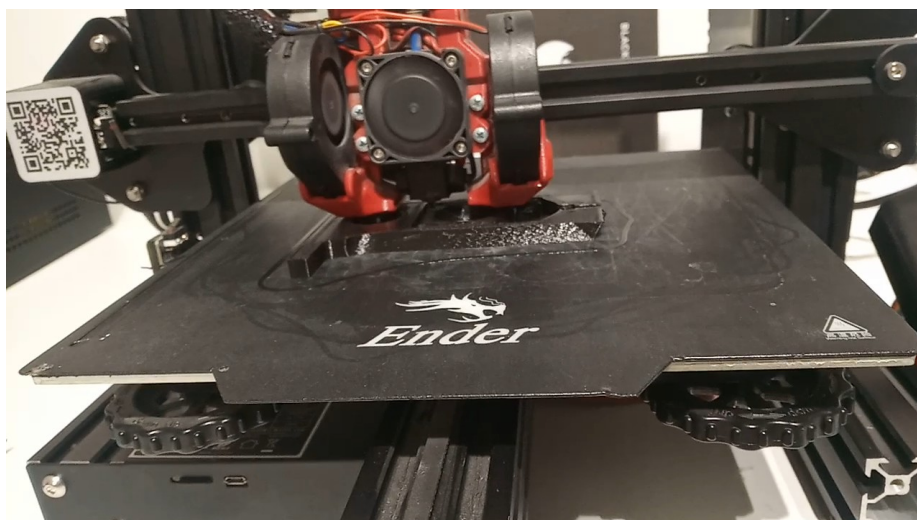
4.5 Τρισδιάστατη εκτύπωση και συναρμολόγηση της πρέσας υψι-τυπίας

Τρισδιάστατη εκτύπωση των τμημάτων της πρέσας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πρέσα και οι πλάκες εκτυπώθηκαν με διαφορετικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές.



Εικόνα 98: Εκτύπωση της εκτυπωτικής πλατφόρμας με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή Creality Ender-3 Max



Εικόνα 99: Εκτύπωση του ενός πλευρικού τμήματος της πρέσας με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή Creality Ender-3 Pro

Με βάση τους σχεδιαστές της πρέσας, εκτύπωση προτείνεται να υλοποιηθεί με infill 50-60% αλλά οι υπεύθυνοι του εργαστηρίου προτίμησαν να εκτυπωθεί κάθε μέρος της πρέσας με infill 100% ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη στιβαρότητα.



Εικόνα 100: Αποτέλεσμα εκτύπωσης

Αποτελέσματα τρισδιάστατης εκτύπωσης των εκτυπωτικών πλακών.

Στον πίνακα 2 αναφέρονται οι εκτυπωτικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν και εκείνες που απορρίφθηκαν.

Παρακάτω αναφέρονται παρατηρήσεις για κάθε εκτυπωμένη πλάκα εκτύπωσης.

Εκτυπωτική πλάκα εκτύπωσης με TPU που σχεδιάστηκε με την τεχνική trace bitmap και με την εφαρμογή solid modeling στο πρόγραμμα Blender.

Δεν χρησιμοποιήθηκε για εκτύπωση λόγω των πολλών ελαττωμάτων που παρουσίαζε ειδικά στα γράμματα του λογοτύπου.



Εικόνα 101: Εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με τεχνική trace bitmap και με solid modeling στο πρόγραμμα Blender

Εκτυπωτική πλάκα εκτύπωσης με TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα Tinkercad.

Δεν χρησιμοποιήθηκε για εκτύπωση εξαιτίας των πολλών ελαττωμάτων που παρουσίαζε ειδικά στα γράμματα του λογοτύπου. Το βασικό πρόβλημα που είχε αυτή η εκτυπωτική πλάκα ήταν ότι εμφάνιζε πολλές ίνες πλαστικού, που ήταν σχεδόν αδύνατον να αφαιρεθούν.



Εικόνα 102: Εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα Tinkercad

Εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling + μεταβλητή Boolean στο πρόγραμμα Blender.

Αυτή η εκτυπωτική πλάκα απεικονίζει πολύ καλά το λογότυπο του Πανεπιστημίου, χωρίς να εμφανίζει προβλήματα στα γράμματα ή στην επιφάνεια. Η εκτυπωτική πλάκα επιλέχτηκε για την χρήση της στην εκτύπωση.



Εικόνα 103: Εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και polygonal modeling + μεταβλητή Boolean στο πρόγραμμα Blender

Εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα Blender.

Αυτή η εκτυπωτική πλάκα ήταν πολύ ποιοτική. Σε σχέση με την προηγούμενη πλάκα από PLA αυτή είχε το λογότυπο σε μικρότερη διάσταση κάνοντας λιγότερο καθαρή την απεικόνιση. Ωστόσο ήταν κατάλληλη για χρήση.



Εικόνα 104: Εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα Blender

Εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με την τεχνική trace bitmap και με solid modeling στο πρόγραμμα Tinkercad.

Σε αυτή την εκτυπωτική πλάκα η απεικόνιση του λογοτύπου ήταν επίσης πολύ καλή. Παρόλο που η συγκεκριμένη πλάκα σχεδιάστηκε με άλλη τεχνική, διαφορετική μοντελοποίηση και σε διαφορετικό πρόγραμμα, εμφανίζει ίδια χαρακτηριστικά και ποιότητα με αυτή στην εικόνα 103. Αν και κατάλληλη για εκτύπωση, τελικά δεν χρησιμοποιήθηκε λόγω της ομοιότητας με την προαναφερόμενη εκτυπωτική πλάκα.



Εικόνα 105: Εκτυπωτική πλάκα από PLA και σχεδιασμένη με τεχνική trace bitmap και με συμπαγής μοντελοποίηση στο πρόγραμμα Tinkercad

Εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα blender.

Η εκτυπωτική πλάκα εμφάνιζε πολλά προβλήματα, όπως πολλές ίνες πλαστικού και μη ολοκληρωμένα γράμματα. Η εκτυπωτική πλάκα απορρίφθηκε.



Εικόνα 106: Εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα blender

Εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling στο πρόγραμμα blender.

Αυτή η εκτυπωτική πλάκα εμφάνιζε αρκετά μεγάλο φαινόμενο stringing (ίνες πλαστικού) αλλά κυρίως μόνο στο τελευταίο επίπεδο (layer) των εκτυπωτικών στοιχείων. Μετά το τρόχισμα της επιφάνειας η εκτυπωτική πλάκα θεωρήθηκε κατάλληλη για την χρήση της στην εκτύπωση.



Εικόνα 107: Εκτυπωτική πλάκα από TPU και που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling + μεταβλητή Boolean στο πρόγραμμα Blender

Οι εκτυπωτικές πλάκες αξιολογήθηκαν αφού οι επιφάνειές τους επεξεργάστηκαν με ψαλίδι, υαλόχαρτο και σκληρή βούρτσα για την κοπή των περιττών ινών και την ισοπέδωση των εκτυπωτικών στοιχείων.



Εικόνα 108: Φινίρισμα των εκτυπωτικών πλακών

Τελικά για χρήση στην εκτύπωση χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις καλύτερες εκτυπωτικές πλάκες, που ήταν οι παρακάτω:

- Εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling + μεταβλητή Boolean στο πρόγραμμα Blender, όπως φαίνεται στην εικόνα 109 πάνω δεξιά.
- Εκτυπωτική πλάκα από PLA και που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα Blender, όπως φαίνεται στην εικόνα 109 πάνω αριστερά.
- Εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling στο πρόγραμμα blender, όπως φαίνεται εικόνα 109 κάτω.



Εικόνα 109: Οι εκτυπωτικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση του λογοτύπου του Πανεπιστημίου. Η εικόνα ελήφθη μετά τη χρήση των πλακών.

Συναρμολόγηση της τρισδιάστατα εκτυπωμένης πρέσας



Εικόνα 110: Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη της πρέσας

Πριν την συναρμολόγηση της πρέσας έπρεπε να ολοκληρωθεί το φινίρισμα των τμημάτων της πρέσας πριν τη σύνδεσή τους. Το φινίρισμα περιλάμβανε την μεγέθυνση των υποδοχών των κοχλιών με τη χρήση τρυπανιού, το τρόχισμα του καρφιού ένωσης και των άκρων των κοχλιών με κόπτη και τροχό αντίστοιχα.

Η διαδικασία συναρμολόγησης έχει καταγραφεί στην εικόνα 111.



Εικόνα 111: Φινίρισμα των τμημάτων της πρέσας.



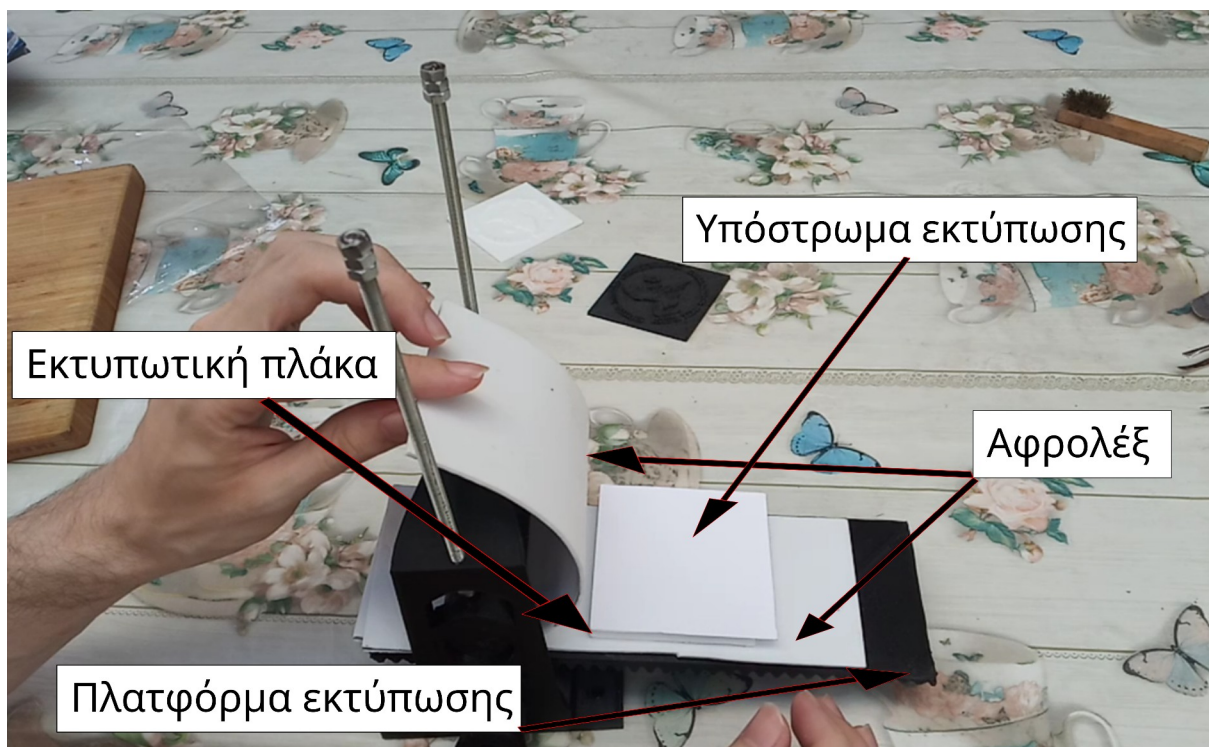
Εικόνα 112: Η διαδικασία συναρμολόγησης των τμημάτων της πρέσας

4.6 Εκτύπωση με την τρισδιάστατα εκτυπωμένη πρέσα

Προετοιμασία και διαδικασία της εκτύπωσης

Η προετοιμασία της εκτύπωσης περιλάμβανε την τοποθέτηση των κατάλληλων στρωμάτων από υλικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 113.

- Πλατφόρμα εκτύπωσης
- Ύφασμα ελάττωσης τριβής. Το ύφασμα που επιλέχτηκε ήταν τύπου αφρολέξ.
- Εκτυπωτική πλάκα
- Υπόστρωμα εκτύπωσης που τοποθετήθηκε επάνω στην πλάκα εκτύπωσης.
- Ύφασμα ελάττωσης τριβής



Εικόνα 113: Τα στρώματα των υλικών για την προετοιμασία της εκτύπωσης

Η εκτύπωση άρχιζε με την επικάλυψη της εκτυπωτικής πλάκας με μελάνι και επάνω της τοποθετούνταν το εκτυπωτικό υπόστρωμα το οποίο επίσης μετά καλύπτονταν από το αφρολέξ. Η επικάλυψη γινόταν με την χρήση ταμπόν σφραγίδας που πιεζόταν προσεκτικά επάνω στην εκτυπωτική πλάκα, ενώ ήταν είχε τοποθετηθεί πάνω στο αφρολέξ. Στη συνέχεια μετά από προσεκτική ρύθμιση της πίεσης του κυλίνδρου συμπίεσης μέσω των δύο κοχλιών, γινόταν χειρισμός της μανιβέλας ώστε να κινηθεί η πλατφόρμα εκτύπωσης και να συμπιεστεί η εκτυπωτική πλάκα με το εκτυπωτικό υπόστρωμα από τον κύλινδρο συμπίεσης. Η πλατφόρμα εκτύπωσης στο τέλος περνούσε στην άλλη μεριά και ήταν δυνατή η αφαίρεση του εκτυπωμένου υποστρώματος.



Εικόνα 114: Επικάλυψη της εκτυπωτικής πλάκας

Κατά την εκτύπωση εμφανίστηκαν σημαντικά προβλήματα. Το ύφασμα ελάττωσης τριβής που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν κατάλληλο για την συγκεκριμένη χρήση. Αν και ελάττωνε την τριβή μεταξύ εκτυπωτικής πλάκας και κυλίνδρου συμπίεσης, δεν είχε αρκετή τριβή για να τραβηχτεί από τον κύλινδρο συμπίεσης, με αποτέλεσμα το ύφασμα να γλιστράει από την πλατφόρμα εκτύπωσης μαζί με την εκτυπωτική πλάκα και το υπόστρωμα εκτύπωσης.



Εικόνα 115: Το αφρολέξ μετά την επεξεργασία του στερεώθηκε επάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης

Το πρόβλημα λύθηκε με την επεξεργασία του υφάσματος έτσι ώστε να γίνει πιο τραχύ με τη χρήση σκληρής βούρτσας. Επιπλέον στερεώθηκε επάνω στη πλατφόρμα εκτύπωσης με ταινία διπλής όψης. Η ταινία χρησιμοποιήθηκε επίσης και για τη στερέωση της εκτυπωτικής πλάκας

Αποτελέσματα εκτύπωσης

Το πρώτο σετ εκτυπώσεων έγινε με την εκτυπωτική πλάκα από PLA και που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling + μεταβλητή Boolean στο πρόγραμμα Blender.

Η πρώτη εκτύπωση δεν εμφανιζόταν ολόκληρη. Ο λόγος για αυτό ήταν ότι οι κοιλίες δεν είχαν ρυθμιστεί σωστά, ώστε ο κύλινδρος να πατάει ομοιόμορφα επάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Επίσης η εκτύπωση εμφανιζόταν θολή και μουντζουρωμένη, λόγω της υπερβολικής πίεσης που δέχονταν το υπόστρωμα.

Χρειάστηκαν 4-5 δοκιμαστικές εκτυπώσεις (σκάρτα) για να ολοκληρωθούν οι ρυθμίσεις και να εμφανιστεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Η εκτυπωτική πλάκα άφηνε αποτύπωμα γραμμών στο υπόστρωμα που είχαν δημιουργηθεί κατά την κατασκευή της με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Το πρόβλημα αυτό εμφανιζόταν με όλες τις εκτυπωτικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν. Το θετικό ήταν πως μετά την σωστή ρύθμιση ήταν δυνατή η σταθερή εκτύπωση εντύπων με αναγνώσιμους τίτλους. Επιπλέον λόγω του ύψους των εκτυπωτικών στοιχείων και της πίεσης που ασκούσαν, τα έντυπα αποκτούσαν και ανάγλυφη υφή.



Εικόνα 116: Το καλύτερο αποτέλεσμα με την εκτυπωτική πλάκα από PLA και που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με *polygonal modeling* + μεταβλητή *Boolean* στο πρόγραμμα *Blender*



Εικόνα 117: Όλες οι εκτυπώσεις με την εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling + μεταβλητή Boolean στο πρόγραμμα Blender

Το δεύτερο σετ εκτυπώσεων έγινε με την εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling στο πρόγραμμα blender.

Όλες οι εκτυπώσεις που πραγματοποιήθηκαν με την πλάκα που κατασκευάστηκε από TPU εμφάνιζαν μουντζούρωμα, αν και σχεδόν όλες οι εκτυπώσεις της ήταν αναγνώσιμες. Το φαινόμενο ενδέχεται να προέκυπτε όταν η πίεση του κυλίνδρου την συμπιέζε υπερβολικά πολύ με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται. Επιπλέον παρόλο που η πλάκα δέχτηκε εκτενές διαδικασία φινιρίσματος, πολλά ελαττωματικά στοιχεία εμφανίζονται στην εκτύπωση.



Εικόνα 118: Το καλύτερο αποτέλεσμα με την εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling στο πρόγραμμα blender.



Εικόνα 119: Όλες οι εκτυπώσεις με την εκτυπωτική πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με polygonal modeling στο πρόγραμμα blender



Εικόνα 120: Αφαίρεση εκτυπωτικής πλάκας με λεπτό εργαλείο



Εικόνα 121: Επικόλληση επόμενης εκτυπωτικής πλάκας

Το τελευταίο σετ των εντύπων εκτυπώθηκε με την εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα Blender.

Όπως και τις προηγούμενες εκτυπωτικές πλάκες, ήταν απαραίτητο να γίνουν δοκιμές και να απορριφθούν τα σκάρτα μέχρι να ρυθμιστούν σωστά οι κοχλίες.



Εικόνα 122: Το καλύτερο αποτέλεσμα με την εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και με solid modeling στο πρόγραμμα Blender.

Η εκτυπωτική πλάκα κατάφερε να βγάλει αναγνώσιμα έντυπα. Ωστόσο σε σχέση με την πρώτη εκτυπωτική πλάκα από PLA υπήρχε δυσκολία να μεταφερθεί η απαραίτητη ποσότητα μελανιού. Λόγοι για αυτό μπορεί να ήταν τα σχετικά χαμηλότερα σε ύψος εκτυπωτικά στοιχεία και το μη επαρκές τρόχισμα της εκτυπωτικής πλάκας.



Εικόνα 123: Όλες οι εκτυπώσεις με την εκτυπωτική πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με υβριδική τεχνική και solid modeling στο πρόγραμμα Blender

4.7 Συμπεράσματα από το πειραματικό μέρος (project)

Από κάθε στάδιο εργασιών του πειραματικού μέρους αποκτήθηκαν σημαντικές γνώσεις και εμπειρίες. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα σχόλια που αντιστοιχούν σε κάθε στάδιο:

Προετοιμασία

Πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας έγινε εκτενής έρευνα για την κατανόηση της διαδικασίας κατασκευής με τη χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στη συνέχεια, έπρεπε να αποφασιστεί ποια τεχνολογία, ποια υλικά και ποια προγράμματα επιλέγονται για την πραγματοποίηση της κατασκευής.

Ακολούθησαν τα προσχέδια της πρέσας που επρόκειτο να κατασκευαστεί, κάτι που δεν ήταν απαραίτητο σε αυτή την περίπτωση αφού χρησιμοποιήθηκε το διαθέσιμο μοντέλο Open Press Project. Ωστόσο προσχέδια έπρεπε να γίνουν για την κατασκευή των εκτυπωτικών πλακών. Ως προσχέδια νοούνται τα σχέδια και τα προκαταρκτικά πειράματα που διεξάχθηκαν μέσα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Inkscape και τα προγράμματα CAD (Blender, Tinkercad).

Σχεδίαση λογοτύπου

Η σχεδίαση του λογοτύπου αφορούσε την αντιγραφή του λογοτύπου του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Για την επίτευξη πιστής αντιγραφής έγινε πειραματισμός με δύο διαφορετικούς μεθόδους σχεδίασης. Η μέθοδος Tracebitmap αποδείχτηκε πολύ αποτελεσματική όσον αφορά την ταχύτητα παραγωγής των διανυσματικών γραφικών του λογοτύπου, ωστόσο τα περισσότερα τρισδιάστατα μοντέλα που σχεδιάστηκαν με αυτή την μέθοδο εμφάνισαν τις περισσότερες γεωμετρικές ανωμαλίες πολυγώνων με αποτέλεσμα να πρέπει να απορριφθούν. Η υβριδική μέθοδος σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε ήταν πιο χρονοβόρα

από την προηγούμενη λόγω των διαφόρων λειτουργιών που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν, ωστόσο αποδείχτηκε πιο αποτελεσματική αφού σχεδόν όλα τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν με αυτή ήταν κατάλληλα για χρήση κατά την εκτύπωση των εντύπων.

Τρισδιάστατη μοντελοποίηση των εκτυπωτικών πλακών

Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση των εκτυπωτικών πλακών χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικά προγράμματα CAD για να επιλεγθεί το πιο αποτελεσματικό για την παρούσα εργασία. Το πρώτο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Tinkercad. Αν και δεν υπήρχε προηγούμενη γνώση και εξοικείωση με τέτοιου είδους προγράμματα, η χρήση του ήταν πολύ εύκολη και κατανοητική, ωστόσο δεν αποδείχτηκε κατάλληλο για την κατασκευή αντικειμένων με λεπτές λεπτομέρειες, όπως τα γράμματα επάνω στο λογότυπο. Αυτό το πρόβλημα δεν ήταν εμφανές κατά την μοντελοποίηση αφού το πρόγραμμα δεν επέτρεπε την εξέταση του πολυγωνικού πλέγματος του μοντέλου, κάτι που ήταν δυνατόν στο πρόγραμμα Blender και στα προγράμματα Slicer όπου οι γεωμετρικές ανωμαλίες που είχαν παραχθεί έγιναν εμφανείς.

Το πρόγραμμα Blender απαιτούσε περισσότερο χρόνο για να επιτευχθεί ικανοποιητική εξοικείωση για χρήση. Λόγω των πολλών λειτουργιών και δυνατοτήτων του προγράμματος, απλά πράγματα όπως ήταν η χρήση της μεθόδου solid modeling ήταν αρκετά πιο δύσκολη και χρονοβόρα. Παρόλες τις δυσκολίες, το Blender επέτρεπε καλύτερη αποτελεσματικότητα λόγω της ακρίβειας που προσφέρει. Επίσης το Blender και με τη χρήση της μεθόδου polygonal modeling δίνει τη δυνατότητα διόρθωσης του πολυγωνικού πλέγματος για την αποφυγή απρόβλεπτων σφαλμάτων. Η μετατροπή των τρισδιάστατων μοντέλων σε πολυγωνικά μοντέλα επέτρεπε την χρήση της μεταβλητής Boolean, που βάση διαδικτυακών πηγών διασφάλιζε καλύτερη συνέργεια μεταξύ τρισδιάστατου μοντέλου και Slicer. Πράγματι τα μοντέλα στα οποία εφαρμόστηκε αυτή η μεταβλητή είχαν καλύτερα αποτελέσματα κατά την τρισδιάστατη εκτύπωσή τους αλλά και κατά την χρήση τους με την πρέσα.

Συμπερασματικά, σε περίπτωση επανάληψης του πειράματος και της συγκεκριμένης κατασκευής, θα προτιμηθεί η χρήση άλλου προγράμματος που είναι περισσότερο εξειδικευμένο επάνω στο polygonal και solid modeling και που παρέχει ταυτόχρονα στο χρήστη πιο φιλικό περιβάλλον εργασίας.

Αν και αφιερώθηκε πολύ χρόνος για την εκμάθηση και τα πειράματα στο περιβάλλον του προγράμματος με σκοπό την κατασκευή των βέλτιστων εκτυπωτικών πλακών, στο τέλος φάνηκε πως για αντικείμενα με τόσο μικρή διάσταση τη μεγαλύτερη σημασία έχει η σωστή ρύθμιση του τρισδιάστατου εκτυπωτή και του προγράμματος Slicer.

Χρήση του προγράμματος Slicer

Τα προγράμματα Slicer που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το Cura για την εκτύπωση της πρέσας και ένα σετ εκτυπωτικών πλακών από PLA και το PrusaSlicer για την εκτύπωση ενός σετ εκτυπωτικών πλακών από TPU. Διαπιστώθηκε πως τα προγράμματα Slicer είναι αρκετά εύκολα στον χειρισμό μετά την κατανόηση όλων των ρυθμίσεών τους, ωστόσο για την βέλτιστη χρήση τους απαιτείται εκτενής πειραματισμός στην επεξεργασία και εκτύπωση τρισδιάστατων μοντέλων για την πραγματική εξοικείωση.

Τρισδιάστατη εκτύπωση και συναρμολόγηση των τμημάτων της πρέσας

Η τρισδιάστατη εκτύπωση όλων των τμημάτων της πρέσας διήρκησε περίπου μια εβδομάδα και ο λόγος ήταν ο μεγάλος φόρτος εργασίας του εργαστηρίου

Η συναρμολόγηση της πρέσας ξεκίνησε με την εξέταση των εκτυπωμένων μερών της και στη συνέχεια ακολούθησε το φινίρισμα των εσοχών και γενικά των επιφανειών τους. Ήταν αδύνατη η συναρμολόγηση χωρίς το φινίρισμα, αφού πολλά μέρη δεν ενώνονταν λόγω πε-

ριπτών πλαστικών απολήξεων. Μάλιστα διαπιστώθηκε ότι κάποια μέρη έπρεπε να επανεκτυπωθούν λόγω του υπερβολικού πάχους τους. Κάποια από αυτά ήταν τα συνδεδεμένα μέρη.

Όσον αφορά τις εκτυπωτικές πλάκες, προβλήματα υπήρχαν κυρίως σε αυτές που ήταν εκτυπωμένες με υλικό TPU. Το πρόβλημα που εμφάνιζαν ήταν κυρίως το υπερβολικό stringing (δηλαδή η εμφάνιση ινών), κάτι που πιθανόν να αποφεύγονταν με την πιο προσεκτική ρύθμιση του εκτυπωτή και του προγράμματος Slicer. Ακόμα πιο αποτελεσματικό θα ήταν αν οι εκτυπωτικές πλάκες ήταν μεγαλύτερης διάστασης.

Οι εκτυπωτικές πλάκες από PLA δεν εμφάνισαν κάποιο σοβαρό πρόβλημα πέρα από έναν μικρό αριθμό γραμμμάτων που είχαν ενωθεί μεταξύ τους. Άλλες μικρές ατέλειες στα τελευταία layer αυτών των εκτυπωτικών πλακών αφαιρέθηκαν εύκολα με διεργασίες φινιρίσματος.

Εκτύπωση εντύπων

Η διαδικασία εκτύπωσης των εντύπων ήταν απλή αφού αντιμετωπίστηκαν ορισμένες δυσκολίες. Οι δυσκολίες ήταν κυρίως δύο, που αφορούσαν το ύφασμα ελάττωσης τριβής (αφρολέξ) και την εξοικείωση με το σύστημα ρύθμισης της πίεσης της πρέσας.

Το ύφασμα ελάττωσης τριβής (αφρολέξ) αν και πράγματι βοήθησε στην ελάττωση της τριβής μεταξύ εκτυπωτικής πλάκας και κυλίνδρου συμπίεσης, δεν επέτρεπε το τράβηγμα της από τον κύλινδρο. Αυτό λύθηκε με την επεξεργασία του αφρολέξ έτσι ώστε να γίνει πιο τραχύ. Επιπλέον συγκολλήθηκε με την πλατφόρμα εκτύπωσης για μεγαλύτερη σταθερότητα.

Το πρόβλημα της ρύθμισης της πίεσης της πρέσας λύθηκε πρακτικά μετά από αρκετές δοκιμές εκτύπωσης εντύπων και την επιτόπου προσαρμογή της πίεσης μέσω των κοχλιών.

Τα αποτελέσματα της εκτύπωσης του λογοτύπου ήταν ικανοποιητικά με τις εκτυπωτικές πλάκες από PLA αλλά όχι τόσο καλά με αυτή από TPU. Οι εκτυπωτικές πλάκες από PLA έδειξαν ότι μπορούν να προσθέτουν ανάγλυφο στο εκτυπωτικό υπόστρωμα, ενώ το μελάνι μεταφέρονταν με σχετική δυσκολία. Τέλος, η αποτύπωση του λογοτύπου ήταν αναγνώσιμη. Οι εκτυπωτική πλάκα από TPU δεν μπορούσε να αποδώσει ικανοποιητικά το ανάγλυφο, η μεταφορά του μελανιού ήταν πιο εύκολη σε σχέση με το PLA αλλά λόγω των προβλημάτων του φαινόμενου stringing, η απεικόνιση του λογοτύπου ήταν μεν αναγνώσιμη αλλά όχι ικανοποιητική από αισθητικής πλευράς.

Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται στον πίνακα 4 τα μοντέλα εκτυπωτικών πλακών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση του λογοτύπου και η απόδοσή τους.

Πίνακας 4 : Απόδοση εκτυπωτικών πλακών

Είδος εκτυπωτικής πλάκας/ απόδοση	Ευκολία μεταφοράς μελανιού	Ποιότητα απεικόνισης του λογοτύπου	Ποιότητα της εκτυπωτικής πλάκας
Πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Blender και τη μέθοδο Polygonal modeling + μεταβλητή Boolean (+ υβριδική μέθοδο σχεδίασης του λογοτύπου)	Εύκολη αλλά χρονοβόρα. Η πλάκα έπρεπε να μελανώνεται μετά από κάθε χρήση.	Αναγνώσιμη με εντυπωσιακό ανάγλυφο.	Πολυ καλή, με το μόνο πρόβλημα να είναι η σύνδεση μικρού αριθμού γραμμάτων κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση που όμως δεν δημιουργούσε πρόβλημα στην αναγνωσιμότητά τους.
Πλάκα από TPU που σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Blender και τη μέθοδο Polygonal modeling + μεταβλητή Boolean (+ υβριδική μέθοδο σχεδίασης του λογοτύπου)	Εύκολη. Μετά από καλό μελάνωμα της εκτυπωτικής πλάκας ήταν δυνατή η εκτύπωση παραπάνω του ενός αντιτύπου	Αναγνώσιμη αλλά όχι ικανοποιητική από αισθητική άποψη. Αναπόφευκτη η εμφάνιση μουντζούρας και υπολείμματα υλικού που δεν μπόρεσαν να φινιριστούν	Μη ικανοποιητική. Αν και η εκτυπωτική πλάκα ήταν εύκαμπτη, αυτό δεν την βοήθησε να απεικονίσει καλύτερα το λογότυπο. Ακόμη και μετά από εκτενές φινιρισμα, η πλάκα εμφάνιζε πολλά στοιχεία του φαινόμενου stringing.

<p>Πλάκα από PLA που σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Blender και τη μέθοδο Blender Solid modeling (+ υβριδική μέθοδο σχεδίασης του λογοτύπου)</p>	<p>Εύκολη αλλά χρονοβόρα. Η πλάκα έπρεπε να μελανώνεται μετά από κάθε χρήση.</p>	<p>Αναγνώσιμη με εντυπωσιακό ανάγλυφο.</p>	<p>Πολύ καλή, με το μόνο πρόβλημα να είναι η σύνδεση μικρού αριθμού γραμμάτων κατά την τρισδιάστατης εκτύπωση που όμως δεν δημιουργούσε πρόβλημα στην αναγνωσιμότητά τους.</p>
--	--	--	--

5. Συμπέρασμα εργασίας

Στην εργασία αυτή έγινε αρχικά έρευνα σχετικά με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως και τις διάφορες μορφές της. Η εξερεύνηση της Ιστορίας της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης παρουσίασε μεγάλο ενδιαφέρον. Είναι σημαντικό να καταγραφεί ότι ο κύριος λόγος της δημοτικότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης ήταν ο ρόλος που έπαιξαν οι οργανώσεις ανοιχτού κώδικα, οι οποίες ανέπτυξαν αυτή την τεχνολογία ενώ ταυτόχρονα επέτρεπαν την ελεύθερη πρόσβαση στα σχέδια από τους ερασιτέχνες και άλλους ενδιαφερόμενους.

Στη συνέχεια, φάνηκε πως η υιοθέτηση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης στο βιομηχανικό περιβάλλον άρχισε να γίνεται όλο και πιο δημοφιλής λόγω των οικονομικών λύσεων που προσφέρει. Με βάση τις έρευνες που αναφέρθηκαν φαίνεται πως οι κυριότερες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που πρόκειται να κυριαρχήσουν στο μέλλον θα είναι η Material jetting και η Vat photopolymerization. Σε περίπτωση υιοθέτησης της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα διευθυντικά στελέχη θα ήταν προτιμότερο να προτιμήσουν τις συγκεκριμένες.

Μεγάλη σημασία θα πρέπει επίσης να δοθεί στον τρόπο με τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνολογία. Κύρια χρήση της στο βιομηχανικό περιβάλλον φαίνεται να είναι για την κατασκευή σχεδιαστικών και λειτουργικών μοντέλων. Άλλη σημαντική εφαρμογή της είναι η κατασκευή βοηθητικών κατασκευαστικών εργαλείων. Από αυτή την χρήση μάλλον πρόκειται να βγει ιδιαίτερα κερδισμένος ένας βιομηχανικός τομέας, αφού με την σωστή εφαρμογή αυτής μπορεί να αφαιρέσει ένα μεγάλο μέρος της ροής της παραγωγής αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα και μειώνοντας τα κόστη.

Στην εργασία διαπιστώθηκε η μεγάλη σημασία που πρέπει να δίνεται στην απαραίτητη προετοιμασία που θα πρέπει να κάνει μία βιομηχανία πριν την μετάβασή της στο περιβάλλον της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία αφορά κυρίως το κόστος του εξοπλισμού και

τον σχεδιασμό του μοντέλου παραγωγής που πρόκειται να ακολουθηθεί. Τα διευθυντικά στελέχη θα πρέπει να προβληματιστούν σχετικά με την επιλογή της χρήσης ιδιωτικών τρισδιάστατων εκτυπωτών ή/και την χρήση της εξωτερικής ανάθεσης των κατασκευών.

Στην εργασία αναφέρθηκαν σύγχρονα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης που δίνουν νέες προοπτικές σε αυτή την τεχνολογία. Παρουσιάστηκαν υλικά που επιτρέπουν κατασκευές που με τις συμβατικές τεχνικές θα ήταν αδύνατον να κατασκευαστούν ή θα ήταν πολύ χρονοβόρες.

Μεγάλο μέρος της εργασίας αφιερώθηκε σε παραδείγματα εφαρμογής της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης και ιδιαίτερα στον τομέα των Γραφικών τεχνών. Η ενότητα αυτή απέδειξε πως υπάρχει χώρος για ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας και σε αυτό τον τομέα. Μάλιστα, η ερασιτεχνική ενασχόληση στο πεδίο αυτού του τομέα φανερώνει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της ευκολίας πραγματοποίησης των κατασκευών.

Στο τέλος της εργασίας διεξάχθηκε πειραματική - ερευνητική εργασία (project) επηρεασμένη από τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, που αφορούσε την κατασκευή μιας εκτυπωτικής πρέσας με εκτυπωτικές πλάκες μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, για πραγματική χρήση. Με το project αποδείχτηκε εντυπωσιακή η αποτελεσματικότητα αυτής της τεχνολογίας για την εφαρμογή της στον τομέα Εφαρμοσμένων τεχνών / Γραφικών τεχνών. Ταυτόχρονα η διαδικασία εκμάθησης των διαφόρων προγραμμάτων και γενικά η εξειδίκευση στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης αποδείχτηκαν αρκετά απαιτητικές.

Συμπερασματικά, θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι αυτή τη στιγμή μια συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία με μεγάλες προοπτικές σε πολλούς τομείς συμπεριλαμβάνοντας τον τομέα Εφαρμοσμένων τεχνών. Τομείς που θα κάνουν την μετάβαση σε αυτή την τεχνολογία, θα βρεθούν σίγουρα σε καλύτερη ανταγωνιστική θέση στο μέλλον λόγω των γνώσεων που θα αποκτήσουν για το βιομηχανικό περιβάλλον και τις τάσεις του εμπορίου που θα τους βοηθήσει να πάρουν καλύτερες επαγγελματι-

κές αποφάσεις. Ωστόσο θα πρέπει να δώσουν μεγάλη προσοχή στον τρόπο με τον οποίο θα κάνουν την μετάβαση, ώστε να γίνει όσο το δυνατόν πιο ομαλά και με ασφάλεια.

Η δημιουργικότητα και η ευκολία εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας στον τομέα των Εφαρμοσμένων τεχνών, έχει αποδειχτεί μέσα από πολλά παραδείγματα σε αυτή την εργασία. Η ενασχόληση με την τεχνολογία αυτή θα είναι περισσότερο αποτελεσματική για όποιον διαθέτει γνώσεις σχεδιαστικών προγραμμάτων και αισθητικής. Αυτές οι γνώσεις θα διευκολύνουν την συγχώνευση αυτής της τεχνολογίας στον τομέα των Εφαρμοσμένων τεχνών, ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί με επιτυχία στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

- 3D printed dress*. (n.d.). SOPHY WONG. Retrieved March 11, 2023, from <https://sophywong.com/thedress>
- 3D printed flexible Dragon Scales – Ytec 3D*. (n.d.). Retrieved March 11, 2023, from <https://ytec3d.com/3d-printed-flexible-dragon-scales/>
- 3D printing CubeSat bodies for cheaper, faster missions*. (n.d.). Retrieved May 2, 2023, from https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/3D_printing_CubeSat_bodies_for_cheaper_faster_missions
- 3D Printing Explained*. (n.d.). Retrieved June 22, 2023, from <https://ms-kb.msd.unimelb.edu.au/the-fablab/3d-printing/general-file-set-up>
- 3D Printing in Space* (p. 18871). (2014). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18871>
- 3D Printing Jewelry – The Ultimate Guide*. (2022, October 18). All3DP Pro. <https://all3dp.com/1/3d-printing-jewelry-the-ultimate-guide/>
- 3D Printing Manufacturing Aids & Tools—YouTube*. (n.d.). Retrieved March 7, 2022, from https://www.youtube.com/watch?v=1s-6P2FKxJ4&ab_channel=JavelinTechnologiesInc.%7CATriMechCompany
- 3D Printing Nerd (Director). (2018a, May 22). *David Shorey / Shorey Designs and 3D Printing on Fabric at Bay Area Maker Faire #BAMF2018*. <https://www.youtube.com/watch?v=7jrz4YQVI3Y>
- 3D Printing Nerd (Director). (2018b, May 30). *3D Printing Clay? The Bottery from Emerging Objects at Bay Area Maker Faire #BAMF2018*. <https://www.youtube.com/watch?v=9jFZgOiQejQ>

- 3D printing with continuous fiber: A landscape* | *CompositesWorld*. (2020). <https://www.compositesworld.com/articles/3d-printing-with-continuous-fiber-a-landscape>
- 3D printing with technical ceramics. (2020, June 15). *Beamlar*. <https://www.beamlar.com/3d-printing-with-technical-ceramics/>
- (7) *CNC Kitchen—YouTube*. (n.d.). Retrieved April 30, 2023, from <https://www.youtube.com/@CNCKitchen>
- A 3D Printed Film—*. (n.d.). Retrieved May 15, 2023, from <http://www.chasemefilm.com/home>
- ACN (Director). (2019, September 16). *L.A.B \ SIGGRAPH 2019—David Shorey Designs*. <https://www.youtube.com/watch?v=jVLheh9ReMM>
- Adam Savage’s Tested (Director). (2017, November 12). *The Making of Hela’s Headdress from Thor: Ragnarok*. https://www.youtube.com/watch?v=6VhU_T463sU
- Al Rashid, A., Ahmed, W., Khalid, M. Y., & Koç, M. (2021). Vat Photopolymerization of Polymer and Polymer Composites: Processes and Applications. *Additive Manufacturing*, 47, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279>
- Alexandra. (2020, July 24). *3D Rapid Prototyping: Here is Everything you Need to Know*. BCN3D Technologies. <https://www.bcn3d.com/3d-rapid-prototyping-everything-you-need-to-know/>
- APUJAN Concept Store by Architchen – 3D Clay Printing*. (2018, April 12). <https://vormvrij.nl/3dclayprinting/?p=1438>
- Autodesk Fusion 360 (Director). (2020, January 9). *Surface Modeling 101*. <https://www.youtube.com/watch?v=HmgwKewMcw8>
- Axel Staffanson & Philip Ragnartz. (n.d.). *Improving the product development process with additive manufacturing*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1238078/FULLTEXT01.pdf>

- Bad Ombres v.1 | Emerging Objects.* (n.d.). Retrieved March 27, 2023, from <http://emergingobjects.com/project/bad-ombres-v-1/>
- Ben. (2022, April 1). When Will Metal 3D Printers Be Affordable? *Printing It 3D*. <https://printingit3d.com/when-will-metal-3d-printers-be-affordable/>
- BlueCast—High performance castable resin for 3d printers.* (n.d.). Retrieved March 10, 2023, from <https://www.bluecast.info/>
- Boissonneault, T. (2018, June 18). *Architchen: Transforming Taiwan's ceramic industry with 3D printing and parametric design*. *VoxelMatters - The Heart of Additive Manufacturing*. <https://www.voxelmatters.com/architchen-taiwan-ceramic-3d-parametric-design/>
- Budinski, N., Lavicza, Z., Vukić, N., Teofilović, V., Kojić, D., Erceg, T., & Budinski-Simendic, J. (2019). INTERCONNECTION OF MATERIALS SCIENCE, 3D PRINTING AND MATHEMATIC IN INTERDISCIPLINARY EDUCATION. *STED Journal*, 1, <https://stedj-univerzitetpim.com/>. <https://doi.org/10.7251/STED1902021B>
- Camuel, B. (2015a, October 30). *3D Printing Manufacturing Aids Equal Smarter Production*. *Machine Design*. <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21834472/3d-printing-manufacturing-aids-equal-smarter-production>
- Camuel, B. (2015b, October 30). *3D Printing Manufacturing Aids Equal Smarter Production*. *Machine Design*. <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21834472/3d-printing-manufacturing-aids-equal-smarter-production>
- Casa Covida | Emerging Objects.* (n.d.). Retrieved May 14, 2023, from <http://emergingobjects.com/project/casa-covida/>
- Ceramic 3d Printing.* (n.d.). *Unfold Design Studio*. Retrieved March 22, 2023, from <http://unfold.be/pages/ceramic-3d-printing.html>

- Chen, Y., Zhang, X., Parvez, M. M., & Liou, F. (2020). A Review on Metallic Alloys Fabrication Using Elemental Powder Blends by Laser Powder Directed Energy Deposition Process. *Materials*, 13(16), 3562. <https://doi.org/10.3390/ma13163562>
- CNC Kitchen. (n.d.). (1) 3D PRINTING with CARBON FIBERS - ColorFabb XT-CF20 REVIEW - YouTube. Retrieved March 30, 2023, from https://www.youtube.com/watch?v=LTmuwfyYUJQ&ab_channel=CNCKitchen
- CNC Kitchen (Director). (2021, February 5). *I tried composting “biodegradable” 3D prints!* - YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=tavrkWrazWI&ab_channel=CNCKitchen
- CNC Kitchen (Director). (2022, February 5). *I tried composting “biodegradable” 3D prints!* <https://www.youtube.com/watch?v=tavrkWrazWI>
- Cole, D., & Baghi, Y. (2022). *3D Printed Sustainable Houses for Education*. Western Sydney University. <https://doi.org/10.26183/BKKG-5Q35>
- Continuous Fiber Reinforced 3D Printing: Mind-Blowing! | All3DP Pro*. (n.d.). Retrieved April 7, 2023, from <https://all3dp.com/1/continuous-fiber-reinforcement-hands-on-markforged-mark-two/>
- Deckard, C. R. (1989). *Method and apparatus for producing parts by selective sintering* (United States Patent No. US4863538A). <https://patents.google.com/patent/US4863538/en>
- Demystifying 3D Printing On Fabric—YouTube*. (n.d.). Retrieved May 15, 2023, from https://www.youtube.com/watch?v=nLHMsdrrp1k0&ab_channel=ShoreyDesigns
- Designer, P. (n.d.). What is Material Jetting and how does material jetting work? *Engineering Product Design*. Retrieved February 7, 2023, from <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>

- Desktop Inventions (Director). (2021, December 19). *Beginner's Guide to 3D printing Lithophanes (Also tips and Tricks!)*. <https://www.youtube.com/watch?v=haZyRS0yHac>
- Digital Taxidermy (Director). (2021, October 6). *2D printing with a 3D printer: Screen print t-shirts with an FDM printer*. <https://www.youtube.com/watch?v=EK5VqZLxI90>
- ELENO Engineering Learning Center (Director). (2019, November 13). *Model & Prototype.. What's the difference?* <https://www.youtube.com/watch?v=9flhSDm8CmA>
- Fiber Reinforced 3D Printing: What You Need to Know*. (n.d.). Retrieved April 7, 2023, from <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/3d-printing-strategies-for-composites/fiber-reinforced-3d-printing-what-you-need-to-know>
- Filament Containing Real Wood Fibers! (Timberfill Printing)—YouTube*. (n.d.). Retrieved April 1, 2023, from https://www.youtube.com/watch?v=bXEM-TVVA0k&ab_channel=ModBot
- Friedrich, A., Lange, A., & Elbert, R. (2022). Make-or-buy decisions for industrial additive manufacturing. *Journal of Business Logistics*, 43(4), 623–653. <https://doi.org/10.1111/jbl.12302>
- Future Relics | Emerging Objects*. (n.d.-a). Retrieved May 14, 2023, from <http://emergingobjects.com/project/future-relics/>
- Future Relics | Emerging Objects*. (n.d.-b). Retrieved May 14, 2023, from <http://emergingobjects.com/project/future-relics/>
- Garechana, G., Rio-Belver, R., Bildosola, I., & Cilleruelo, E. (2019). A method for the detection and characterization of technology fronts: Analysis of the dynamics of technological change in 3D printing technology. *PLOS ONE*, 14, e0210441. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210441>

Gertraud Gerst. (n.d.). *TECLA: the zero-emission house made by 3D printers—Ubm magazin*.

Retrieved May 7, 2022, from <https://www.ubm-development.com/magazin/en/tecla-the-house-made-by-3d-printers/>

Hatchbox Wood 3D Printer Filament Review | All3DP. (n.d.). Retrieved April 1, 2023, from <https://all3dp.com/2/hatchbox-wood-3d-printer-filament-review/>

Hellstorm Wargaming (Director). (2021, August 26). *How much do 3D Printed Miniatures Cost?* <https://www.youtube.com/watch?v=TtN3szkTo7o>

History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? (2022, April 29). All3DP. <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>

How to 3D Print Your Own Printing Press. (n.d.). Open Press Project. Retrieved July 5, 2023, from <https://openpressproject.com/blogs/news/how-to-3d-print-your-own-printing-press>

How to Create your Own T-shirt Motif with a 3D printer? - YouTube. (n.d.). Retrieved March 20, 2023, from https://www.youtube.com/watch?v=9IHftw8cmd8&ab_channel=Prusa3DbyJosefPrusa

Investment casting. (n.d.). Investment Casting. Retrieved May 10, 2023, from <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/investment-casting>

Jarett Gross (Director). (2022, August 5). *This ANCIENT Housing Technology Could Shape Our Future*. <https://www.youtube.com/watch?v=tTChT5oIDAY>

Journal of Building Engineering | Advances in 3D Concrete Printing and Digital Construction Technologies for Buildings | ScienceDirect.com by Elsevier. (n.d.). Retrieved May 7, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-building-engineering/special-issue/107HLCXT48P>

- Kabir, S. M. F., Mathur, K., & Seyam, A.-F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>
- Kalle, E. (2022). *3D-TULOSTUSLABORATORION TULOSTUSKOTELOI- DEN ILMANVAIHDON VIRTAAUSANALYYSI JA PARTIKKE- LIMITTAUS*. 41.
- Kamran, M., & Saxena, A. (2016). *A Comprehensive Study on 3D Printing Technology*. 6(2), 8.
- Kantaros, A., Diegel, O., Piromalis, D., Tsaramirsis, G., Khadidos, A. O., Khadidos, A. O., Khan, F. Q., & Jan, S. (2022). 3D printing: Making an innovative technology widely accessible through makerspaces and outsourced services. *Materials Today: Proceedings*, 49, 2712–2723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.074>
- Kočí, J. (2021, October 8). *How to Create your Own T-shirt Motif with a 3D printer?* Original Prusa 3D Printers. https://blog.prusa3d.com/how-to-print-on-t-shirts_55588/
- Kris Slyka (Director). (2021, October 18). *I made 3D Printed Letterpress Business Cards!* <https://www.youtube.com/watch?v=0ZYCK57ntCg>
- Kubáč, L., & Kodym, O. (2017). The Impact of 3D Printing Technology on Supply Chain. *MATEC Web of Conferences*, 134, 00027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713400027>
- Leon Ortiz. (2020, February 25). *The 3 Main Types of 3D Modeling – Simply Explained*. All3DP. <https://all3dp.com/2/types-of-3d-modeling/>
- Lithophanemaker.com. (n.d.). *Image to Lithophane Generator*. Retrieved March 12, 2023, from <https://lithophanemaker.com/images/Heart Mosaic.png>
- Liu, G., Xiong, Y., & Zhou, L. (2021). Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications. *Composites Communications*, 27, 100907. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100907>

- Make With Tech (MakeWithTech) (Director). (2020, August 22). *3d Printing Photographs*.
<https://www.youtube.com/watch?v=RY4OVVJJfDQ>
- Makers Mashup (Director). (2020, March 8). *PLA Dissolved in Water | Biodegradability Testing*. <https://www.youtube.com/watch?v=OcLYH6bbFLQ>
- Making a 3D Printed Squeegee For Screen Printing /// 3D Print Your Screen Printing Tools—YouTube*. (n.d.). Retrieved March 19, 2023, from https://www.youtube.com/watch?v=3DQ-2BXDcLg&ab_channel=joshisterrific
- Marshall, W. M., Stegeman, J. D., Zemba, M., MacDonald, E., Shemelya, C., Wicker, R., Kwas, A., & Kief, C. (2015, July 27). Using Additive Manufacturing to Print a CubeSat Propulsion System. *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Orlando, FL. <https://doi.org/10.2514/6.2015-4184>
- Mohd Yusoff, N. H., Irene Teo, L.-R., Phang, S. J., Wong, V.-L., Cheah, K. H., & Lim, S.-S. (2022). Recent Advances in Polymer-based 3D Printing for Wastewater Treatment Application: An Overview. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132311. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132311>
- Ning, F., Cong, W., Wei, J., Wang, S., & Zhang, M. (2015, June 8). *Additive Manufacturing of CFRP Composites Using Fused Deposition Modeling: Effects of Carbon Fiber Content and Length*. <https://doi.org/10.1115/MSEC2015-9436>
- Open Press Project – The 3D-printed printing press*. (n.d.). Open Press Project. Retrieved May 31, 2023, from <https://openpressproject.com/>
- Our story*. (n.d.). Open Press Project. Retrieved May 31, 2023, from <https://openpressproject.com/pages/about-us>
- Owsiński, R., & Niesłony, A. (2018). *Fatigue properties in additive manufacturing methods applying Ti6Al4V*. 2029, 020049. <https://doi.org/10.1063/1.5066511>

- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, *13*(4), 598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- Park, S., Shou, W., Makatura, L., Matusik, W., & Fu, K. (Kelvin). (2022). 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. *Matter*, *5*(1), 43–76. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018>
- Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, *30*, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.003>
- Prashar, G., Vasudev, H., & Bhuddhi, D. (2022). Additive manufacturing: Expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00956-4>
- Propshop (Director). (2014, January 14). *THOR'S HAMMER - Making of Mjölnir for Thor: The Dark World*. <https://www.youtube.com/watch?v=ByToQuIjpvk>
- Prusa 3D by Josef Prusa—YouTube. (n.d.). Retrieved May 1, 2023, from <https://www.youtube.com/>
- Ransom Makes (Director). (2019, January 8). *The Open Press Project—The Open Source #3DPrinted Printing Press*. https://www.youtube.com/watch?v=uFCi9vd_tmo
- RCLifeOn (Director). (2020, February 24). *How Was This Color Picture 3D Printed?* <https://www.youtube.com/watch?v=4FvtQOHzus4>
- Relativity Space. (n.d.). Retrieved May 6, 2022, from <https://www.relativityspace.com/>
- Relativity Space Looks to Take On SpaceX With 3-D Printed Rockets. (n.d.). WSJ. Retrieved May 1, 2023, from <https://www.wsj.com/video/series/in-depth-features/relativity-space-looks-to-take-on-spacex-with-3-d-printed-rockets/CD56E3AB-581C-484B-8201-8379F45ACDEC>

- Replacing Machined Jigs and Fixtures With 3D Printed Parts*. (n.d.). Formlabs. Retrieved May 2, 2023, from <https://formlabs.com/blog/replacing-machined-jigs-fixtures-3d-printed-parts/>
- Ribeiro, F. M., Pires, J. N., & Azar, A. S. (2019). Implementation of a robot control architecture for additive manufacturing applications. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 46(1), 73–82. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2018-0226>
- Sacco, E., & Moon, S. K. (2019). Additive manufacturing for space: Status and promises. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(10), 4123–4146. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03786-z>
- Salmi, M. (2021). Additive Manufacturing Processes in Medical Applications. *Materials*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ma14010191>
- Sandeep, B., Kannan, T. T. M., Chandradass, J., Ganesan, M., & John Rajan, A. (2021). Scope of 3D printing in manufacturing industries-A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6941–6945. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.394>
- Spencer, S. R., & Kay Watts, L. (2020). Three-Dimensional Printing in Medical and Allied Health Practice: A Literature Review. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 51(3), 489–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2020.06.003>
- Staff, E. (2016, July 11). Concept Modelling vs Functional Prototyping. *Creutz3D 3D Printer & Printing Solutions Provider Singapore*. <https://creutz3d.com.sg/concept-modelling-vs-functional-prototyping/>
- SYS Systems (Director). (2020, September 24). *3D printing for manufacturing with jigs, fixtures and factory tooling | Stratasys Fortus 450mc*. <https://www.youtube.com/watch?v=VRoRWcZzSBc>
- Technology*. (n.d.). Cloudfactory. Retrieved March 10, 2023, from <https://www.cloudfactory.jewelry/technology>

- Terran 1 3D Printed Rocket, United States of America.* (n.d.). Retrieved May 2, 2023, from <https://www.aerospace-technology.com/projects/terran-1-3d-printed-rocket/>
- The 3D-Printed Fashion of Sophy Wong! - YouTube.* (n.d.). Retrieved March 11, 2023, from https://www.youtube.com/watch?v=JpykcHoEYGA&t=35s&ab_channel=AdamSavage%E2%80%99sTested
- The Best Wood PLA Filaments of 2022 | All3DP.* (n.d.). Retrieved April 1, 2023, from <https://all3dp.com/2/wood-filament-for-a-3d-printer-explained-compared/>
- Thingiverse.com. (n.d.). *Dragon Scales by ShoreyDesigns.* Retrieved March 11, 2023, from <https://www.thingiverse.com/thing:2755451>
- Thomas, D. S., & Gilbert, S. W. (2014). *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing* (NIST SP 1176; p. NIST SP 1176). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1176>
- Top Challenges To Widespread 3D Printing Adoption | Strataysys Direct.* (2018, October 7). <https://www.strataysys.com/en/strataysysdirect/resources/articles/3d-printing-adoption-challenges/>
- Tsakos, D. (n.d.). *Implementation of 3D printing technology in flexographic packaging printing.*
- Tyagi, S., Yadav, A., & Deshmukh, S. (2022). Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process. *Materials Today: Proceedings*, 51, 1012–1016. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>
- Uncle Jessy (Director). (2018, February 9). *How to 3D Print on Fabric for Cosplay | How To | 3D Printing on Fabric.* <https://www.youtube.com/watch?v=CjH5KGw3Psw>
- Unfold Design Studio.* (n.d.). Unfold Design Studio. Retrieved March 22, 2023, from <http://unfold.be/pages/projects.html>
- Van Der Putten, J., Snoeck, D., De Coensel, R., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2021). Early age shrinkage phenomena of 3D printed cementitious materials with

- superabsorbent polymers. *Journal of Building Engineering*, 35, 102059. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102059>
- Varghese, R., Salvi, S., Sood, P., Karsiya, J., & Kumar, D. (2022). 3D printed medicine for the management of chronic diseases: The road less travelled. *Annals of 3D Printed Medicine*, 5, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2021.100043>
- Velásquez-García, L. F., & Kornbluth, Y. (2021). Biomedical Applications of Metal 3D Printing. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 23(1), 307–338. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-082020-032402>
- Waheed, S., Cabot, J., Macdonald, N., Lewis, T., Guijt, R., Paull, B., & Breadmore, M. (2016). 3D printed microfluidic devices: Enablers and Barriers. *Lab on a Chip*, 16. <https://doi.org/10.1039/C6LC00284F>
- Watkin, H. (2015, November 2). *Thingiverse Reaches 1 Million Uploads, 200 Million Downloads*. All3DP. <https://all3dp.com/makerbot-thingiverse-reaches-1-million-uploads-200-million-downloads/>
- Wesley Chai. (n.d.). *What is CAD (Computer-Aided Design)?* WhatIs.Com. Retrieved July 5, 2023, from <https://www.techtarget.com/whatis/definition/CAD-computer-aided-design>
- Zhang, F., Saleh, E., Vaithilingam, J., Li, Y., Tuck, C. J., Hague, R. J. M., Wildman, R. D., & He, Y. (2019). Reactive material jetting of polyimide insulators for complex circuit board design. *Additive Manufacturing*, 25, 477–484. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.017>
- Κατασκευή Ξυλοτύπου – SPN Constructions. (n.d.). Retrieved May 7, 2022, from <https://spn-constructions.gr/%CE%BA%CF%84%CE%B9%CF%81%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%B1-%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B1/kataskevi-ksilotypou/>

Σύνταξης, Ο. (2015, September 1). *Ό,τι πρέπει να γνωρίζεις για τα ανθρακονήματα—Autoblog.gr*. <https://www.autoblog.gr/2015/09/01/everything-you-need-to-know-about-carbon-fiber/>