



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και
Πολιτισμού
Τμήμα Γραφιστικής και Οπτικής
Επικοινωνίας

Copyright 2021 © Νικόλαος Νεκτάριος Αρβανιτέλλης με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Εικόνα εξωφύλλου: <https://formlabs.com/3d-printers/> Licence: Creative Commons, Attribution

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**"Τρισδιάστατη εκτύπωση: Υλικά, δυνατότητες και διερεύνηση μεθόδου προς
δημιουργία επιτραπέζιου παιχνιδιού"**

Συγγραφέας:

Νικόλαος Νεκτάριος Αρβανιτέλλης Α.Μ. 15079

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Δρ. Βασιλική Μπέλεση



ΑΘΗΝΑ 2020-2021

Εξεταστική Επιτροπή:

Βασιλική Μπέλεση

Ανδρέας Σιτορέγκο

Αντιγόνη Καραμάνη

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ΑΡΒΑΝΙΤΕΛΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ του ΘΩΜΑ, με αριθμό μητρώου 15079 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ του Τμήματος ΓΡΑΦΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ, 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



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η λεπτομερής μελέτη και ανάλυση της διαδικασίας της προσθετικής παραγωγής (τρισδιάστατης εκτύπωσης), των υποκατηγοριών της και των αποτελεσμάτων που μπορεί να προσφέρει, καθώς και την ταυτοποίηση των εφαρμογών της σε πληθώρα διαφορετικών βιομηχανιών, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ενός επιτραπέζιου παιχνιδιού. Για να αποφασιστεί η καταλληλότερη μέθοδος, έγινε εκτενής έρευνα για τα διάφορα υλικά που τυπώνουν οι κατηγορίες της προσθετικής παραγωγής, τα κόστη των εκτυπώσεων και τα αποτελέσματα που παράγουν. Η έρευνα αυτή καταγράφεται στο πρώτο κεφάλαιο. Στο δεύτερο κεφάλαιο, καταγράφονται τα πειράματα που επιτελέστηκαν με απώτερο σκοπό την έμπρακτη εφαρμογή των γνώσεων που αποκτήθηκαν, για την δημιουργία του παιχνιδιού. Στο τρίτο κεφάλαιο, διατυπώνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και τα αποφθέγματα που προέκυψαν από αυτά, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού του επιτραπέζιου καθώς και τα τελικά αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά:

Προσθετική Παραγωγή, Φωτοπολυμερισμός, Πολυμερή, Σύντηξη Στρωμάτων, Νήματα Υλικών, Ρητίνη, Κράματα, Μοντελοποίηση Συντηγμένων Στρωμάτων (Fused Deposition Modeling), Στερεολιθογραφία (Stereolithography), Επιλεκτική Θερμοσυσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering), Σύντηξη Κλίνης Σκόνης (Powder Bed Fusion).

ABSTRACT

The purpose of this paper is the detailed study and analysis of the process of additive manufacturing (3D Printing), its subcategories and the results it can produce, as well as the identification of its applications in various different industries, so that it can be used in the production of a tabletop board game. To decide the best method, extensive research has been made of the various materials that are used in the subcategories of additive manufacturing, the cost of those prints as well as the results that they can produce. This research has been recorded in the first chapter. In the second chapter, there have been recorded the experiments that were done with the higher purpose of the utilization and application of the knowledge acquired, for the creation of the game. In the third chapter, the results of the experiments as well as the conclusions that were reached through them have been formulated, while in the fourth chapter the design process of the board game as well as the final results have been presented.

Keywords:

Additive Manufacturing, Photopolymerization, Polymers, Layer Fusion, Material Filaments, Resin, Alloys, Fused Deposition Modeling, Stereolithography, Selective Laser Sintering, Powder Bed Fusion.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η εργασία δεν θα μπορούσε να είχε πραγματοποιηθεί στην παρούσα μορφή της χωρίς την βοήθεια και την ενθάρρυνση αρκετών ανθρώπων. Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά για την βοήθειά τους όλα τα άτομα που πίστεψαν σε εμένα, με στήριξαν και έμπρακτα συνέβαλλαν στην εκπόνηση του έργου.

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Βασιλική Μπέλεση που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα το οποίο με ενδιέφερε πραγματικά, με καθοδήγησε και προσέφερε τις γνώσεις και τις απαντήσεις της στις απορίες μου σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ηλία Νίκα-Λέπουρα και για την ενθάρρυνση και την στήριξη του, αλλά και για την βοήθεια στον σχεδιασμό του λογότυπου του παιχνιδιού “ApoKalyrse” για τους σκοπούς της εργασίας.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυριά Μαρία Κιτσιμίδου για την αμέριστη συμπαράστασή της κατά την δημιουργία αυτής της εργασίας, αλλά και για την βοήθειά της στην κατασκευή του ταμπλό του παιχνιδιού.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα υπόλοιπα αγαπημένα μου πρόσωπα, όπως την οικογένεια και τους φίλους μου που με στήριξαν να ακολουθήσω το όνειρό μου και να κάνω την αρχή μου στον κόσμο της προσθετικής παραγωγής και την κατασκευή του επιτραπέζιου παιχνιδιού.

Νίκος Αρβανιτέλλης, 27/02/2021

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

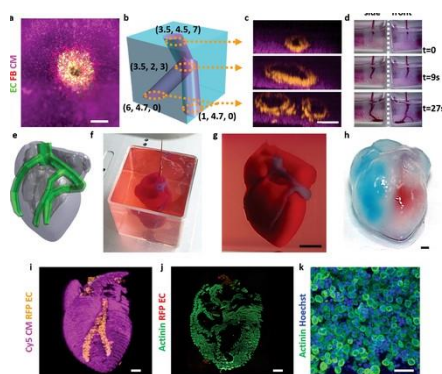
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
Λέξεις κλειδιά:	4
ABSTRACT	4
Keywords:	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ & ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Οι μέθοδοι της τρισδιάστατης εκτύπωσης.	11
FDM- FUSED DEPOSITION MODELLING, ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΤΗΓΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	11
ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ FDM	16
PLA- Polylactic Acid, Πολυγαλακτικό Οξύ	16
ABS- Acrylonitrile butadiene styrene, Συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου	18
PETG- Polyethylene terephthalate glycol ,Τροποποιημένη Τερεφθαλική Πολυαιθυλενογλυκόλη.	19
TPU- Thermoplastic Polyurethane, Θερμοπλαστική Πολυουρεθάνη.	21
Nylon- Νάιλον	22
HIPS- High Impact Polystyrene, Πολυστυρένιο Υψηλής Αντοχής.	23
PVA- Polyvinyl Alcohol, Πολυβινυλική Αλκοόλη.	24
Νήμα PLA με ίνες ξύλου.....	25
Μεταλλικά νήματα	26
ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΣ (STEREOLITHOGRAPHY AND DIGITAL LIGHT PROCESSING).	27
ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ SLA/DLP	30
Συμβατική Ρητίνη για 3D Printing (Standard Resin).	30
Διάφανη Ρητίνη (Clear Resin).	31
Ρητίνη Ταχέως Πολυμερισμού (Rapid Resin).....	32
Ενισχυμένη/Σκληρή Ρητίνη (Tough Resin/ABS-like Resin).....	32
Ρητίνη Υψηλής Ανθεκτικότητας (Durable Resin/PP-like Resin).....	32
Φυτικές Ρητίνες (Plant Based Resin).....	33
Κεραμικές Ρητίνες (Ceramic Resins).	33
Castable Resins- Ρητίνες Χύτευσης.	33
Οδοντιατρική Ρητίνη- Dental Resin.	34
POWDER BED FUSION PRINTING – ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΚΟΝΗΣ	35
ΥΛΙΚΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ POWDER BED	36
Νάιλον 12 – Nylon 12 (PA 12)	36
Αλουμινίδη - Aluminide	37
Νάιλον με ίνες γυαλιού – Glass-Filled Nylon 12	38
Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα – Carbon Fiber Reinforced Plastics.....	38
Ατσάλι/Ανοξείδωτο Ατσάλι – Steel/Stainless Steel.....	39
Τιτάνιο – Titanium	40
Αλουμίνιο – Aluminium	41
Κράμα Κοβαλτίου, Χρωμίου και Μολυβδενίου - Cobalt Chrome.....	41

Κράμα Νικελίου – Nickel Alloy	42
Πολύτιμα Μέταλλα – Precious metals	42
MATERIAL JETTING ΚΑΙ DROP ON DEMAND –ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΚΑΤ’ ΑΠΑΙΤΗΣΗ	43
ΥΛΙΚΑ MATERIAL JETTING	43
BINDER JETTING – ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	44
ΥΛΙΚΑ BINDER JETTING	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° – Πειραματικό Μέρος	45
Οργανολογία.....	46
1ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση βήμα προς βήμα ψηφιακού μοντέλου ανθρωπόμορφου γουρουνιού ως πιόνι επιτραπέζιου παιχνιδιού με την μέθοδο FDM.	49
2ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου ανθρωπόμορφου λύκου ως πιόνι επιτραπέζιου παιχνιδιού.	62
3ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου αυτοκινήτου ως διακόσμηση επιτραπέζιου παιχνιδιού.	71
4° ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου αυτοκινήτου χωρίς ρόδες ως διακόσμηση επιτραπέζιου παιχνιδιού.....	74
5° ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου βράχων ως διακόσμηση επιτραπέζιου παιχνιδιού.	76
6° ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM ψηφιακών μοντέλων βαρελιών, δέντρου και μαρκών επιτραπέζιου παιχνιδιού.	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° - Αποτελέσματα – Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις	82
Πείραμα 1° - Συμπεράσματα και Αποτελέσματα	82
Πείραμα 2° - Συμπεράσματα και Αποτελέσματα	83
Πείραμα 3° - Συμπεράσματα και Αποτελέσματα	84
Πείραμα 4° – Συμπεράσματα και Αποτελέσματα.....	84
Πείραμα 5° – Συμπεράσματα και Αποτελέσματα.....	85
Πείραμα 6° – Συμπεράσματα και Αποτελέσματα.....	85
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΥΠΩΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	87
1. Απώλεια νήματος/ Απώλεια υλικού.(Under- Extrusion)	87
2. Το στόμιο έρχεται σε επαφή με την θερμαινόμενη επιφάνεια.(Nozzle Touches Build Plate)	88
3. Μπλοκάρισμα ή «μπούκωμα» στομίου. (Nozzle Clog)	89
4. Σπασμένο/Κομμένο νήμα υλικού (Snapped Filament)	90
5. Το αντικείμενο δεν κολλάει/ Δεν παραμένει εφραπτόμενο στην πλάκα κατασκευής	91
6. Stringing, το υλικό με την μορφή νήματος, κολλάει στην εκτύπωση.	94
7. Warping, ή παραμόρφωση του αντικειμένου της εκτύπωσης.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° – ΤΟ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ & ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	98
Τελικά συμπεράσματα.....	100
Χρόνος διεκπεραίωσης:	100
Αναλυτικό κόστος υλικών και συσκευών εργασίας:.....	100
Το Παιχνίδι.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	106

ΕΙΣΑΓΩΓΗ & ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία σχετικά «νέα» μέθοδος «εκτύπωσης» και παραγωγής. Σε σχέση με την πατροπαράδοτη μέθοδο της εκτύπωσης μελάνης σε χαρτί και άλλα υποστρώματα, για την οποία πρέπει να ευχαριστήσουμε τον Γουτεμβέργιο το 1450 (Robert Lechene, Encyclopaedia Britannica, Printing-Publishing) , η πρώτη πατέντα για τρισδιάστατο στερεολιθογραφικό (Stereolithographic, SLA) εκτυπωτή κατατέθηκε το 1986 από τον Αμερικανό εφευρέτη Charles Hull, ο οποίος δημιούργησε και τον STL τύπο αρχείου (patents.justia.com patent #4575330: Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography) . Ενώ δεν ήταν η πρώτη προσπάθεια για την δημιουργία στερεολιθογραφικής τεχνολογίας (Gibson, Ian, and Jorge Bártolo, Paulo. “History of Stereolithography.”), οι προηγούμενες, οι οποίες ξεκίνησαν με την «εφεύρεση» της μεθόδου το 1980, από τον Ιαπωνικής καταγωγής καθηγητή Hideo Kodama και τις προσπάθειες των εταιρειών Alcatel-Alsthom και CILAS να καταθέσουν πατέντες ήταν ανεπιτυχείς. Ο καθηγητής H. Kodama, ενώ κατέληξε να ιδρύει την εταιρεία τρισδιάστατης εκτύπωσης Kodama Inc. δεν ήταν επιτυχής στην δημιουργία αντιδράσεων από την επιστημονική κοινότητα και λόγω έλλειψης χρηματοδότησης η έρευνά του σταμάτησε το 1981. Από την άλλη οι εταιρείες Alcatel-Alsthom και CILAS σταμάτησαν τις διαδικασίες για την κατάθεση πατέντας διότι «Δεν είδαν οικονομικό ενδιαφέρον». (Mendoza, Hannah Rose (May 15, 2015). Τι είναι όμως η τρισδιάστατη εκτύπωση και τι επιτυγχάνει; Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι, ουσιαστικά, η διαδικασία της δημιουργίας ενός στερεού αντικειμένου, μέσω της εκτύπωσης πολλαπλών ξεχωριστών στρωμάτων που αποτελούν το αντικείμενο (Definition: Cambridge Dictionary, dictionary.cambridge.org) . Η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται για την άμεση παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων που απαρτίζονται από διάφορα πολυμερή και όχι μόνο και καλύπτει διάφορες ανάγκες σε πολλούς τομείς όπως η ιατρική (άμεση δημιουργία υγειονομικού υλικού ή ακόμα και τεχνητών οργάνων), την μηχανική (δημιουργία εξαρτημάτων και υλικού για επισκευές και εφευρέσεις κατά παραγγελία) ακόμα και την τέχνη και την ψυχαγωγία (δημιουργία έργων γλυπτικής, αγαλματιδίων, ακόμα και παιχνιδιών). (The Editors of Encyclopaedia Britannica 2021). Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει χρησιμοποιηθεί για πολλούς διαφορετικούς σκοπούς σε πολλά διαφορετικά πεδία. Για παράδειγμα, στον τομέα της ιατρικής, έχει γίνει η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την δημιουργία προσθετικών μελών κατά παραγγελία, για την δημιουργία διαφόρων εμφυτευμάτων ακόμα και την εκτύπωση ειδικών χειρουργικών εργαλείων. Η μέθοδος όμως δεν φαίνεται να πλησιάζει στα όριά της όσον αφορά τις εφαρμογές της. Η εκτύπωση βιολογικού υλικού όπως ιστός και όργανα και η εκτύπωση ειδικών φαρμάκων είναι εφαρμογές που ενώ μελετώνται, δεν έχει προχωρήσει αρκετά η μέθοδος ώστε να υπάρχουν βιώσιμες εφαρμογές στον ανθρώπινο οργανισμό. (Helena Dodziuk, 2016)

Το πρώτο εκτυπωμένο όργανο που δημιουργήθηκε επιτυχώς ήταν μία καρδιά από ανθρώπινο ιστό με λειτουργικά αγγεία που μπορούσαν να συνδεθούν με φυσικά αγγεία στο μέγεθος καρδιάς λαγού. Το όργανο, ενώ δεν χτυπούσε ήταν ένα μεγάλο βήμα μπροστά για την επιστήμη και έφερε την τεχνολογία πιο κοντά στο να σώσει ζωές. Οι Ισραηλινοί επιστήμονες που κατασκεύασαν την καρδιά ελπίζουν να καταφέρουν να δημιουργήσουν την τεχνολογία που θα βάλει τέλος στις λίστες αναμονής δωρητών οργάνων και να κάνουν μεγάλη διαφορά στις ζωές των ανθρώπων που υποφέρουν από ασθένειες του μυοκαρδίου. (Nadav Noor, Assaf Shapira, Reuven Edri, Idan Gal, Lior Wertheim, Tal Dvir 2019)



Εκτύπωση παχέος αγγειοποιημένου ιστού, 3D Printing of Personalized Thick and Perfusable Cardiac Patches and Hearts, Noor, Shapira, EDri, Gal, Wertheim, Dvir 2019

Αυτές όμως δεν είναι οι μοναδικές συνεισφορές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην υγεία. Άξια αναφοράς είναι και η συνεισφορά της Ερευνητικής Μονάδας Προηγμένων, Σύνθετων, Νάνο Υλικών και Νανοτεχνολογίας (R-NanoLab) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) κατά την πανδημία του ιού SARS-CoV-2 που προκάλεσε την ασθένεια Covid-19. Το R-Nanolab συνδύασε τους ερευνητικούς του πόρους και τεχνογνωσία με τα μηχανήματα και τα υλικά του 3D Hub του ΕΜΠ για να παράγουν αναλώσιμο υγειονομικό υλικό για να συνεισφέρουν έμπρακτα στην καταπολέμηση της ασθένειας και στον αγώνα που κατέβαλε το σύστημα υγείας εναντίον του ιού. Πέρα από τον τομέα της υγείας, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει συμβάλλει και σε άλλους τομείς όπως την ηλεκτρολογία. Για παράδειγμα, γίνεται έρευνα για την εκτύπωση νανοσωλήνων άνθρακα, των οποίων η αγωγή συμπεριφορά και άλλες ιδιότητες είναι επιθυμητές για διάφορες εφαρμογές ηλεκτρονικής και ηλεκτροχημικής φύσεως. (R-Nanolab 2020).

Ένας ακόμη τρόπος που η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να βοηθήσει την κατασκευή ηλεκτρονικών είναι με την χρήση και την εκτύπωση υλικών με μεταλλικά νανοσωματίδια (MNPS). Τα υλικά αυτά έχουν γίνει όλο και πιο αναγκαία για την τρισδιάστατη εκτύπωση τυπωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (Printed Circuit Board, PCBs) λόγω της χρήσης τους στην κατασκευή των αγωγίμων τμημάτων και εξαρτημάτων τους.

Υπάρχουν διάφορα είδη αγωγίμων μελανών και κατηγοριοποιούνται σε μελάνια μεταλλικών νανοσωματιδίων ενός στοιχείου, κράματος, μεταλλικών οξειδίων και διμεταλλικά μελάνια νανοσωματιδίων πυρήνα-κελύφους. (Guo Liang Goh, Shweta Agarwala, Wai Yee Yeong, Shweta Agarwala, Wai Yee Yeong January 2019), (Pulickel M., Ajayan Otto, Z. Zhou 2001)

Αυτές είναι μόνο λίγες από τις πολλαπλές περιπτώσεις των συνεισφορών της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αλλά αφορούν κυρίως επιστημονικές εφαρμογές. Η τρισδιάστατη εκτύπωση όμως δεν περιορίζεται στον ρόλο ενός εργαλείου στον επιστημονικό κόσμο. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, την πτώση των τιμών και την επίδραση του φαινομένου της μικρογραφιοποίησης (Miniaturisation) καταναλωτικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές εισάγονται σε μικρές επιχειρήσεις και οικίες καταναλωτών ως χόμπι και εργαλεία διασκέδασης. Η πολυμορφία της τρισδιάστατης εκτύπωσης δίνει ευκαιρίες στον μέσο καταναλωτή να επιλέξει τον τρόπο και το βάθος στο οποίο θέλει να εντρυφήσει στην ασχολία.

Υπάρχουν πολλά είδη τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η πιο προσβάσιμη από τον μέσο καταναλωτή και «χομπίστα», και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, είναι η μέθοδος FDM (Fused Deposition Modelling, μοντελοποίηση συντηγμένων στρωμάτων), ή FFF (Fused Filament Fabrication, κατασκευή συντηγμένου νήματος). Είναι ο τύπος τρισδιάστατης εκτύπωσης κατά τον οποίο η εκτυπωτική μηχανή θερμαίνει και εναποθέτει σε προθερμασμένη επιφάνεια νήμα πολυμερούς (όπως το PLA, πολυγαλακτικό οξύ), ώστε να εκτυπώσει τρισδιάστατα μοντέλα σε πολλά διαφορετικά επίπεδα (“slices) αφού έχουν πρώτα επεξεργαστεί και «διαχωριστεί» από ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα “slicer” (όπως π.χ. το πρόγραμμα Cura της εταιρείας Ultimaker), για να γίνουν επεξεργάσιμα από τον εκτυπωτή. Τα μοντέλα πρώτα πρέπει να έχουν σχεδιαστεί με εξειδικευμένα προγράμματα CAD (Computer Aided Design) συγκεκριμένα για τρεις διαστάσεις. Δημοφιλές παράδειγμα CAD για σχεδίαση και ηλεκτρονική γλυπτική (sculpting) τρισδιάστατων μοντέλων αποτελεί το πρόγραμμα Blender. Σε αυτή την εργασία καταγράφεται, μεταξύ άλλων, η μελέτη από τον συγγραφέα της μεθόδου της τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω της προσπάθειας του να σχεδιάσει “from the ground up”, δηλαδή ουσιαστικά από το 0 και να εκτυπώσει το μεγαλύτερο τμήμα ενός επιτραπέζιου παιχνιδιού. (all3dp.com, Leo Gregurić 2020)

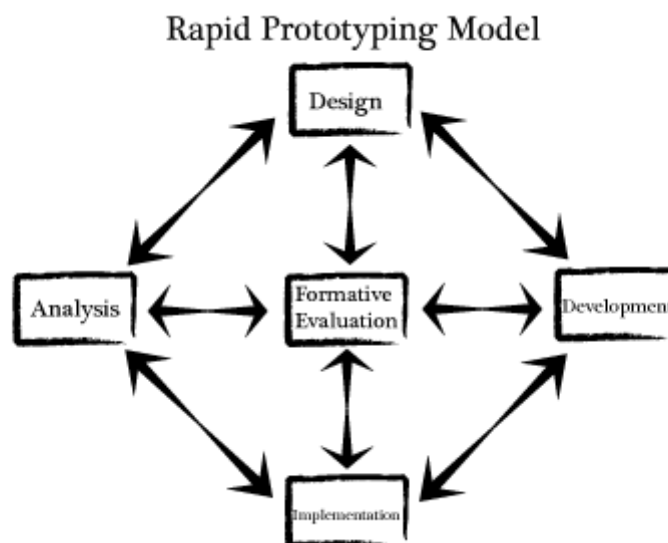
Εξαιτίας της μεγάλης διάδοσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης και ιδιαίτερα της FDM εκτύπωσης ως χόμπι και λόγω της μεγάλης συμβατότητας της με τον χώρο των επιτραπέζιων παιχνιδιών, έχουν προκύψει πολλοί ιστότοποι, εταιρείες και καλλιτέχνες αποκλειστικά αφιερωμένοι σε αυτό το τμήμα της αγοράς (myminiindustry.com, fatdragongames.com, illgottengames.net και πολλοί άλλοι). Αυτό, αποδεικνύει ήδη πως η δημιουργία ενός επιτραπέζιου παιχνιδιού και διαφόρων παρεμφερών, εξαρτημάτων, ακόμα και παραδοσιακών παιχνιδιών αποκλειστικά για μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι όχι μόνο εφικτή, αλλά και αρκετά διαδεδομένη και κερδοφόρα ασχολία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Οι μέθοδοι της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι διάφορες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης, αρχίζοντας με την μέθοδο FDM. Τα παραδείγματα και οι πληροφορίες που παρουσιάζονται βασίζονται κυρίως στην εμπειρία του συγγραφέα καθώς και πολλαπλές αναφορές από το διαδίκτυο και άρθρα της Encyclopaedia Britannica για το θέμα. (Encyclopaedia Britannica: Manufacturing, Stereolithography, Encyclopaedia Britannica: Manufacturing, 3D Printing)

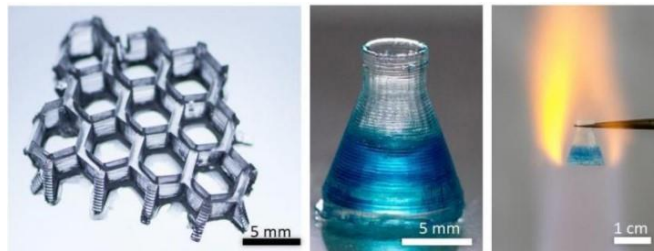
FDM- FUSED DEPOSITION MODELLING, ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΤΗΓΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Συνεχίζοντας από τον πρόλογο, πρέπει να αναφερθεί πως αρχικά, η μέθοδος FDM χρησιμοποιούταν (και ακόμα χρησιμοποιείται) για Rapid Prototyping (RP), δηλαδή την ταχεία και άμεση δημιουργία φυσικών αντικειμένων άμεσα από πρόγραμμα CAD χωρίς επιπλέον εργαλείων η παραγωγικής εργασίας. Συχνά δηλαδή, είναι ανάγκη για την δημιουργία νέων εξαρτημάτων και καινοτομιών, να κατασκευάζεται μία φυσική αναπαράστασή τους άμεσα για να επιβεβαιώνει την λειτουργία τους (proof of concept). (3-Design, ch. 14 Rapid Prototyping, Kuang-Hua Chang, 2015)



Σχεδιάγραμμα Rapid Prototyping. Πηγή:
https://en.wikiversity.org/wiki/Instructional_design/Rapid_Prototyping/Introduction#/media/File:Rapid-prototyping.png

Στον βαθμό που έχει εξελιχθεί η τεχνολογία, πολλές μηχανές για rapid prototyping έχουν σχεδιαστεί για κατασκευές σε μικροσκοπικό επίπεδο, στους τομείς της υγείας, μικροηλεκτρονικής και οπτοηλεκτρονικής. Άξια αναφοράς είναι η εκτύπωση διαφανούς πυριτικού γυαλιού σε τρομερά μικρό μέγεθος με ελεγχόμενη πυκνότητα που προέκυψε από την έρευνα του ερευνητικού γκρουπ του καθηγητή Shlomo Magdassi του Εβραϊκού Πανεπιστημίου της Ιερουσαλήμ. (Prof. Shlomo Magdassi Research Group)



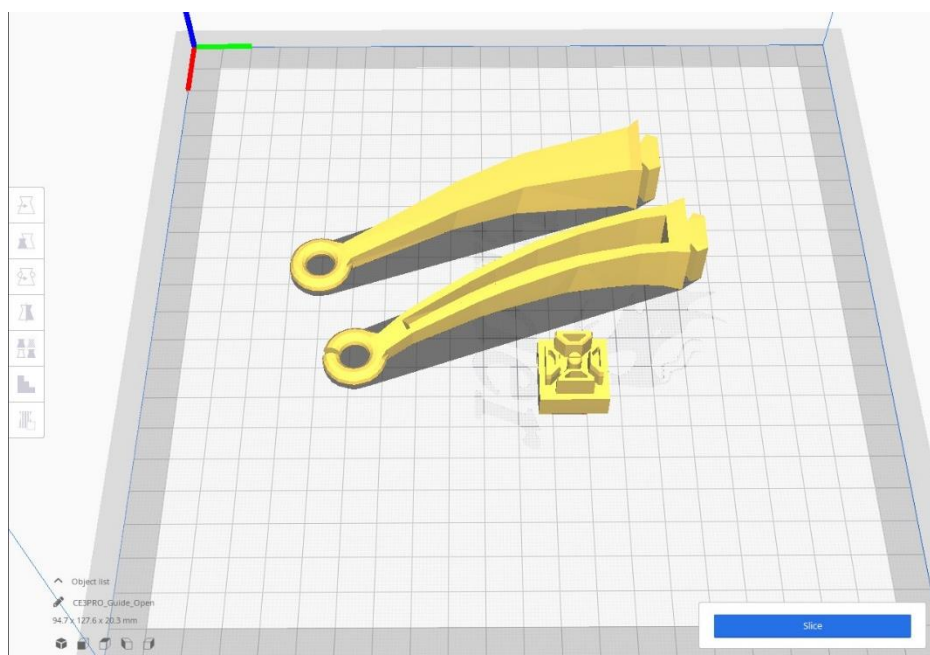
Additive Manufacturing of Transparent Silica Glass from Solution Πηγή: *The Shlomo Magdassi Research Group*

Πέρα από Rapid Prototyping, η μέθοδος FDM είναι και η πιο προσβάσιμη για τον μέσο καταναλωτή. Εταιρείες όπως η Creality πρωτοπορούν στον χώρο με προσιτά μοντέλα, όπως ο Ender-3 Pro, που παράγουν καλής ποιότητας αποτελέσματα και κάνουν χρήση μεγάλης γκάμας υλικών όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA, polylactic acid), Συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS, Acrylonitrile butadiene styrene). Τερεφθαλική Πολυαιθυνοελογλυκόλη (PETG, Polyethylene terephthalate glycol), θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU, thermoplastic polyurethane), πολυστυρένιο υψηλής αντοχής (HIPS, High Impact Polystyrene) και απλό και κοινό οξικό πολυβινύλιο (PVA, polyvinyl alcohol). Παρακάτω θα αναλυθεί βήμα προς βήμα η διαδικασία από τον σχεδιασμό έως και την εκτύπωση ενός αντικειμένου, θα αναλυθούν οι χρήσεις και οι ιδιαιτερότητες κάθε υλικού στην μέθοδο FDM και θα αναλυθούν συχνά προβλήματα που προκύπτουν κατά την εκτύπωση και την γενική παραγωγική διαδικασία. (all3dp.com Pranav Gharge 2021)

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το πόσο ευέλικτη είναι. Δηλαδή, όχι μόνο στα υλικά και το εύρος εκτυπώσεων που μπορούν να επιτευχθούν, αλλά και το πόσο είναι οι ίδιοι οι εκτυπωτές ευέλικτοι και προσαρμόσιμοι, με μεγάλη γκάμα περιφερειακών επεκτάσεων και εργαλείων που μπορούν ακόμα και να εκτυπωθούν από τους ίδιους τους εκτυπωτές για τους οποίους προορίζονται. «Επίσημες» βελτιώσεις από εταιρείες όπως η Creality περιλαμβάνουν εναλλακτικές πλάκες κατασκευής από πυρίμαχο βοριοπυριτικό γυαλί, αλουμίνιο και Carbon Silicon Glass για καλύτερη προσκόλληση του εκτυπούμενου αντικειμένου και αντοχή, επιπλέον θερμαινόμενο «κέλυφος» για την διατήρηση της θερμοκρασίας της εκτύπωσης. Πέρα από αυτά τα εξαρτήματα, υπάρχει πληθώρα επιπλέον βελτιωμένων εξαρτημάτων όπως βελτιωμένα θερμαινόμενα στόμια, συστήματα ψύξης, θύρες για κάρτες SD, μεταλλικά γρανάζια για ευθυγράμμιση της πλάκας κατασκευής, ακόμα και επιπλέον εξάρτημα χάραξης λέιζερ 12 Volt το οποίο μετατρέπει έναν κοινό τρισδιάστατο FDM εκτυπωτή σε χαρακτή ή κοπτικό laser, επιτρέποντας στον ιδιοκτήτη να δουλέψει με οποιοδήποτε υλικό, να χαράξει και να κόψει ξύλο, αλουμίνιο και πολλά άλλα υλικά. (Jackson O'Connell 2021) Υπάρχουν ακόμη και βελτιωτικές επεκτάσεις που επιτρέπουν στους καταναλωτικούς εκτυπωτές όπως τον Ender-3 Pro να λιώνουν και να εκτυπώνουν νήμα αλουμινίου. Αυτά τα παραδείγματα αποδεικνύουν πως με τα σωστά εργαλεία και εξαρτήματα ο καταναλωτής μπορεί να εκτυπώσει οποιοδήποτε υλικό. (Creality 3D 2021, 3Dhubs, Alkaios Bournias Varotsis)

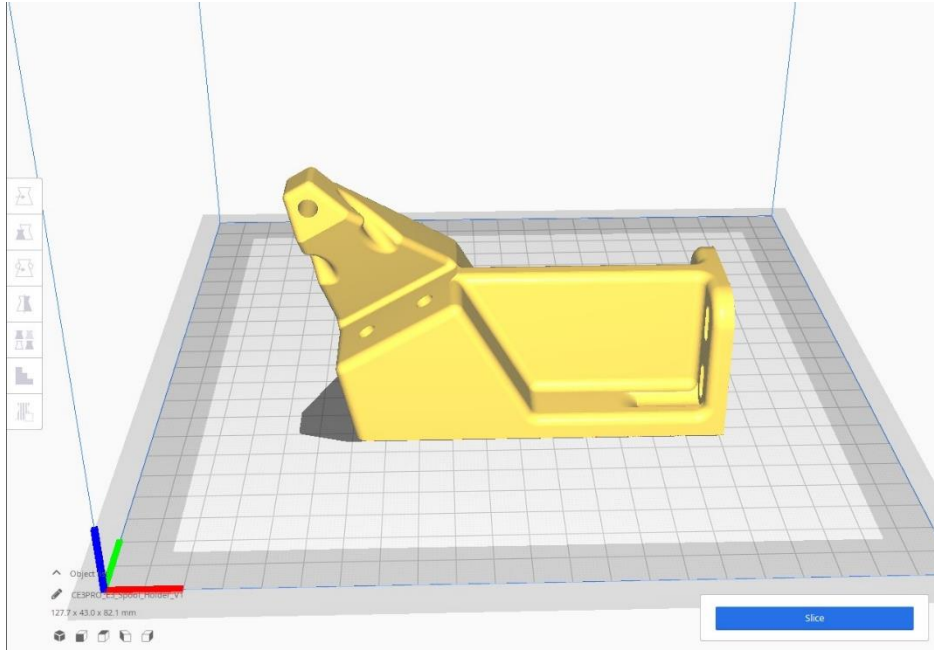
Πραγματικά είτε με την μέθοδο FDM είτε με την μέθοδο SLA (στερεολιθογραφία, η πρώτη εκδοχή της τρισδιάστατης εκτύπωσης) είναι αποδεδειγμένο πως είναι δυνατόν να εκτυπωθεί σχεδόν οποιοδήποτε υλικό. Συγκεκριμένα, χρήστες όπως ο Charlie Godfrey έχουν καταφέρει να εκτυπώσουν βιοπολυμερή όπως νάιλον ενισχυμένο με νήμα βαμβακιού, το οποίο οδήγησε σε μεγάλη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των εκτυπωμένων αντικειμένων περίπου επί δεκατέσσερις φορές του απλού νάιλον (32 έναντι 2.3 GPa, Πηγή: matweb.com, instructables.com/3D-Printing-High-Strength-Bio-composites). Το γεγονός πως ένας απλός «desktop» εκτυπωτής μπορεί να παραλλαχθεί από έναν καταναλωτή για να εκτυπώσει τόσο σύνθετα υλικά κατασκευασμένα εκτός εργοστασίου με απλά εργαλεία είναι απόδειξη από μόνο του πως η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι πραγματικά πολύ ευέλικτη σαν μέθοδος και μπορεί, με περιορισμένη τεχνογνωσία, να εξελιχθεί ακόμα περισσότερο.

Είναι άξιο σημείωσης πως η κοινότητα που ασχολείται με την 3D εκτύπωση έχει παράγει πολλαπλά εναλλακτικά εξαρτήματα και βελτιώσεις για πληθώρα εκτυπωτών οι οποίες μπορούν να εκτυπωθούν χρησιμοποιώντας το ίδιο το μηχάνημα για το οποίο προορίζονται. Παραδείγματα συμπεριλαμβάνουν εκτυπώσιμο οδηγό νήματος ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος να ξεφύγει και να μπλεχτεί το νήμα στα διάφορα κινούμενα εξαρτήματα του εκτυπωτή. Είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι όταν πραγματοποιούνται εκτυπώσεις με πολύ εύκαμπτα υλικά.

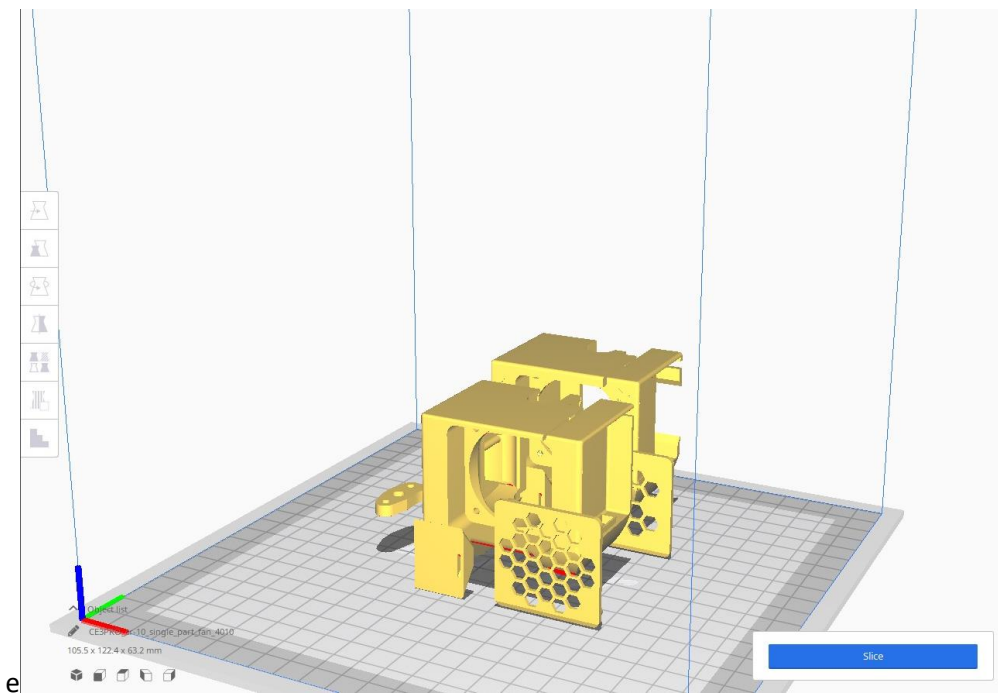


*Ender 3 filament guide στο πρόγραμμα Ultimaker Cura. Πηγή:
thingiverse.com/thing:2917932*

Ο οδηγός νήματος όμως δεν είναι το μόνο εκτυπώσιμο εξάρτημα. Για την διατήρηση και την προστασία του εκτυπωτή έχουν δημιουργηθεί καλύμματα για τα κενά που αφήνει η συναρμολόγηση στα διάφορα μεταλλικά τμήματα του, ώστε να μπορούν οι χρήστες να εισάγουν τα διάφορα βελτιωτικά εξαρτήματα. Τα κενά αυτά τείνουν να μαζεύουν σκόνη και ρινίσματα υλικού που μερικές φορές προκύπτουν από την εκτύπωση και αυτό μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα εάν εισαχθούν στα διάφορα ευαίσθητα τμήματα του εκτυπωτή. Ακόμη έχουν δημιουργηθεί εξαρτήματα όπως κάλυμμα για τον ανεμιστήρα του ψυκτικού συστήματος, εξαρτήματα που ενισχύουν τα αδύνατα σημεία του εκτυπωτή και προσφέρουν επιπλέον σταθερότητα, εξαρτήματα για την μεταφορά του «πηνίου» του υλικού στο πλάι της μηχανής για την απελευθέρωση του ανώτερου τμήματος της μηχανής από την πίεση και πολλά ακόμη. Επιπλέον, πολλά από τα τμήματα που είναι φτιαγμένα από πλαστικό έχουν αναπαραχθεί ψηφιακά ώστε να μπορούν να αντικατασταθούν στην περίπτωση που πάθουν βλάβη. Τμήματα όπως η κορδέλα που μετακινεί το μηχανικό άκρο που έχει το θερμαινόμενο στόμιο της εκτύπωσης.



Ender-3 Pro Side Mounted Spool Holder. Πηγή: thingiverse.com/thing:3757724

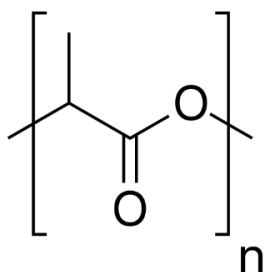


AYF single/dual part 4010 fan duct. Πηγή: thingiverse.com/thing:4693548

ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ FDM

PLA- Polylactic Acid, Πολυγαλακτικό Οξύ

Το πολυγαλακτικό οξύ είναι το πλέον προτεινόμενο, από τον μέσο καταναλωτή, υλικό διότι διαθέτει πολλές επιθυμητές ιδιότητες ως βιοπλαστικό, όπως το γεγονός ότι είναι οικονομικό, παράγεται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες (κυρίως από ζαχαρότευτλα, ρίζες ταπιόκας και καλαμπόκι), είναι βιοδιασπώμενο από συγκεκριμένα βακτήρια, διασπώμενο με υδρόλυση, θερμόλυση και φωτόλυση αλλά και ανακυκλώνεται. Στην μέθοδο FDM, λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας τήξης του (150-160 °C) και την ευκολία με την οποία χρησιμοποιείται εφαρμόζεται σε αρκετές διαφορετικές βιομηχανίες. (Karen Ditsch 2020, Zachary Hay 2020)



Συντακτικός τύπος του Πολυγαλακτικού Οξέως Πηγή: Wikimedia Commons

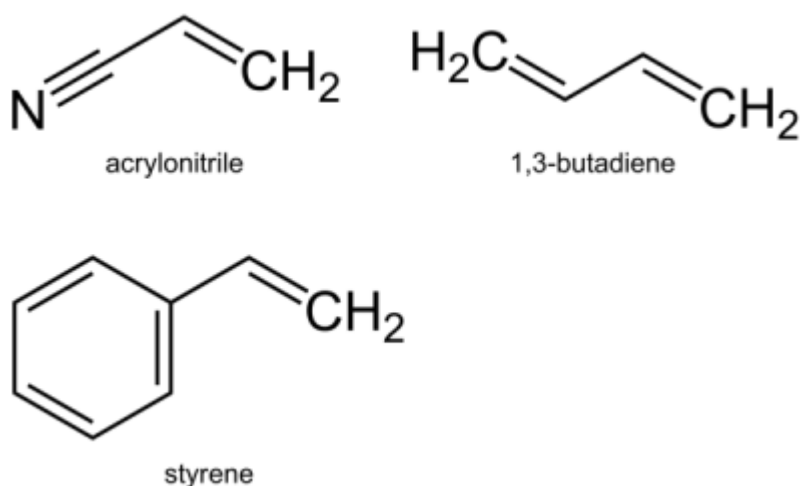
Είναι αρκετά ανθεκτικό, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές χρήσεις, από εξαρτήματα και κινούμενα κομμάτια συσκευών (όπως μοχλοί, γρανάζια κ.α.), είναι αρκετά φιλικό προς τον άνθρωπο, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ιατρική για να εκτυπωθούν βίδες για την στερεοποίηση κοκάλων και ενέσεις για την χορηγία φαρμάκων. Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα του PLA είναι πως επειδή είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, μη-τοξικό, δεν παράγει τοξικές αναθυμιάσεις όταν οξυγονώνεται και μπορεί να διασπαστεί και να απορροφηθεί από τον οργανισμό είναι πολύ πιθανό στο μέλλον να χρησιμοποιηθεί σε εγχειρήσεις και να λύσει προβλήματα όπως απώλεια ανθρώπινου ιστού. Ακόμη, επειδή έχει την πιστοποίηση GRAS (Generally Recognized as Safe) χρησιμοποιείται στην βιομηχανία τροφίμων ως μέσο αποθήκευσης. Περαιτέρω χρήσεις του στις κατασκευές είναι για παράδειγμα σε ίνες για την δημιουργία χαλιών, επίπλωση και μόνωση. Όντας θερμοπλαστικό, δηλαδή διατηρώντας τις αντοχές και ιδιότητές του αφού έχει δεχτεί αρκετή θερμότητα ακόμα και σε σημείο να λιώσει, το PLA φαίνεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί παντού και το γεγονός ότι είναι βιοδιασπώμενο και φιλικό προς το περιβάλλον το κάνει να φαίνεται πολύ ελκυστικό σε εταιρείες που επιθυμούν να έχουν πολύ χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα και βοηθηθούν στην διατήρηση του περιβάλλοντος και στην καλλιέργεια της οικολογικής συνείδησης. Δυστυχώς όμως, το PLA δεν είναι το «απόλυτο» υλικό και έχει μερικά μειονεκτήματα που παραθέτω παρακάτω.

Τα μειονεκτήματα του PLA είναι τα εξής: Κατ' αρχάς, ενώ είναι όντως βιοδιασπώμενο, καθυστερεί αρκετά να διασπαστεί εκτός από ελεγχόμενα περιβάλλοντα (δηλαδή την φύση). Ενώ είναι αρκετά οικολογικό δηλαδή, υπάρχει ανάγκη για κατάλληλες υποδομές για την διάσπαση του υλικού. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι η πρώτη ύλη από την οποία προέρχεται. Πολλοί άνθρωποι αντιτίθενται στην ιδέα της χρήσης τόσων φυτειών καλαμποκιού για την κατασκευή πλαστικού αντί για την παρασκευή φαγητού για τους ανθρώπους που έχουν ανάγκη. Ακόμη, η παρασκευή του υλικού βασίζεται σε γενετικά τροποποιημένες φυτείες που συνήθως αποφεύγονται από τους περισσότερους καταναλωτές. Επιπλέον, λόγω της φύσης του, το PLA χρειάζεται να ανακυκλώνεται ξεχωριστά από τα υπόλοιπα πλαστικά διότι μπορεί να «μολύνει» την διαδικασία. Τέλος, το PLA μόνο του, εκτός και αν αναμιχθεί με λιγότερο φιλικά προς το περιβάλλον πλαστικά είναι πιο εύθρυπτο, σπάει και τρίβεται πιο εύκολα από πλαστικά βασισμένα στο πετρέλαιο, επίσης είναι ακριβότερο από αυτά. (real-filament.com) (Rocío Jaimes Gutierrez 2020)



Νίκος Αρβανιτέλλης, πιόνι επιτραπέζιου παιχνιδιού. Τυπώθηκε σε έναν Creality Ender-3 Pro τρισδιάστατο εκτυπωτή χρησιμοποιώντας νήμα PLA.

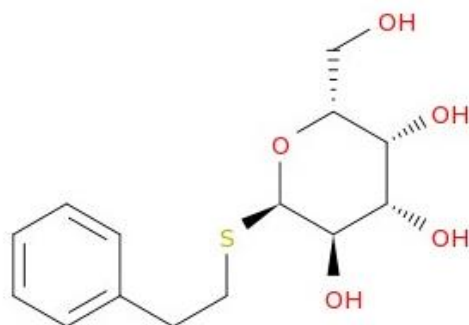
ABS- Acrylonitrile butadiene styrene, Συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου



Μονομερή που αποτελούν το Πολυμερές ABS Πηγή: Wikimedia Commons

Το ABS (συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου) είναι ένα υλικό το οποίο επίσης χρησιμοποιείται αρκετά για FDM εκτυπώσεις οι οποίες απαιτούν σκληρότητα υλικού, μεγάλες μηχανικές αντοχές ειδικά στην τριβή (π.χ. γρανάζια, ρόδες κ.α.). Έχει αρκετή αντίσταση στην τριβή και μηχανική αντοχή στην θραύση, είναι αρκετά σκληρό και αντέχει υψηλές θερμοκρασίες περίπου μέχρι 100 °C. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που έχει το ABS είναι ότι είναι συνήθως φθηνότερο από υλικά όπως το PLA, μπορεί να χρωματιστεί σε διάφορες αποχρώσεις και ότι λόγω της σκληρότητάς του είναι δυνατή η επεξεργασία του με εργαλεία χωρίς μεγάλο φόβο καταστροφής και σπατάλης του υλικού. Έχει ακόμη την δυνατότητα να λειανθεί με την χρήση ακετόνη, οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα εκτυπώσεων. Τα προβλήματα του ABS είναι πως οι εκτυπωμένες κατασκευές είναι ευάλωτες στην υπεριώδη ακτινοβολία, δεν έχει το ίδιο καλή προσκόλληση στην πλάκα όσο άλλα υλικά όπως το PLA και απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες εκτύπωσης, δυσκολεύοντας έτσι την χρήση του και απαιτώντας την προμήθεια εξαρτημάτων όπως εξωτερικά θερμαινόμενα περιβλήματα και γυάλινη πλάκα κατασκευής. Επιπλέον, ενώ είναι ανακυκλώσιμο, κατά την εκτύπωσή του παράγει αναθυμιάσεις βλαβερές για τον άνθρωπο και δεν είναι βιοδιασπώμενο. (real-filament.com, Pranav Gharge 2021, Adreco Plastics 2018)

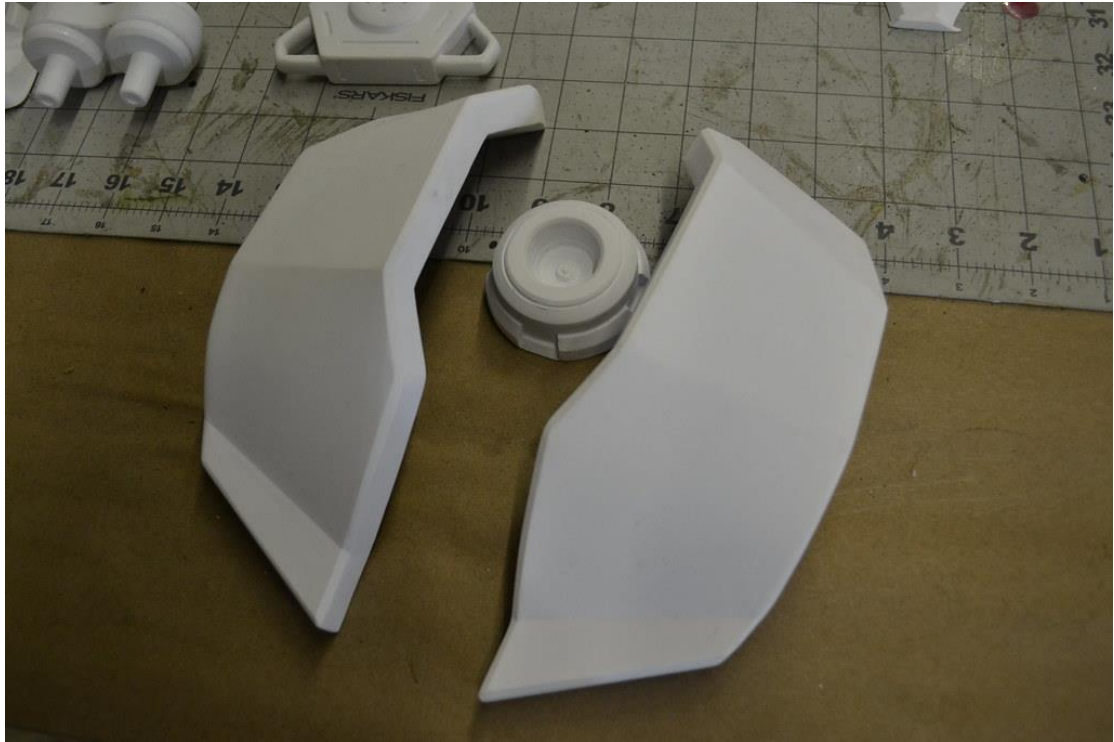
PETG- Polyethylene terephthalate glycol ,Τροποποιημένη Τερεφθαλική Πολυαιθυλενογλυκόλη.



ChemEssen.com

Αναπαράσταση πολυμερούς PETG, Πηγή: ChemEssen.com

Η τερεφθαλική πολυαιθυλενογλυκόλη, ή αλλιώς PETG είναι μία τροποποιημένη έκδοση του ευρύτατα χρησιμοποιημένου θερμοπλαστικού PET (Polyethylene Terephthalate). Ενώ το PET δεν χρησιμοποιείται συνήθως στην τρισδιάστατη εκτύπωση, το PETG, χρησιμοποιείται συχνά ως «μέση λύση» μεταξύ του PLA και ABS διότι ενώ είναι πιο ανθεκτικό και από το απλό PET και από το PLA δεν έχει τις ίδιες δυσκολίες εκτύπωσης του ABS. Επίσης έχει αρκετά υψηλή θερμοκρασία τήξης (220-250), είναι αρκετά κολλητικό όταν αρχίσει να εκτυπώνεται, το οποίο είναι αρκετά επιθυμητή ιδιότητα καθώς βοηθά στην προσκόλληση του εκτυπωμένου αντικειμένου στην πλάκα κατασκευής και απαιτεί μικρότερες θερμοκρασίες σε αυτή. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του PETG είναι πως είναι εύκαμπτο. Από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του υλικού είναι πως ενώ ανακυκλώνεται, δεν είναι βιοδιασπώμενο, πως προσροφά υγρασία από το περιβάλλον (οπότε πρέπει να φυλάγεται σε ξηρό περιβάλλον) και πως η επιφάνειά του γδέρνεται εύκολα. (Pranav Gharge 2021, Hironori Kondo 2019, Ksawery Szykiedans, Wojciech Credo, Dymitr Osiński 2017)

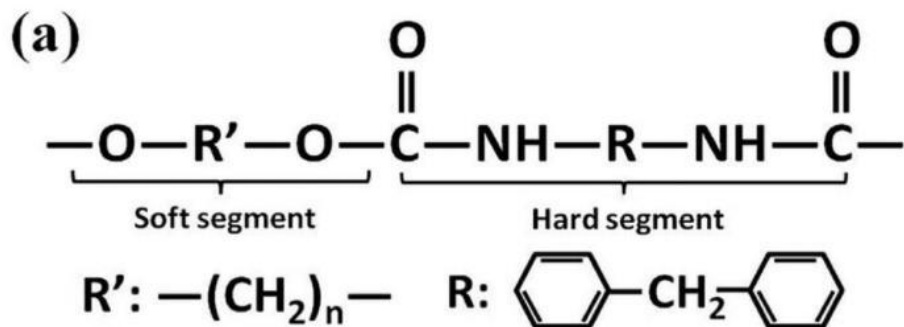


Εκτύπωση ABS με φινίρισμα ακετόνης. Πηγή: "ABS Prints!" by Volpin is licensed under CC BY-NC-ND 2.0



Εκτύπωση Εξαρτημάτων με PETG. Πηγή: "Petg print" by Robospout is licensed under CC BY 2.0

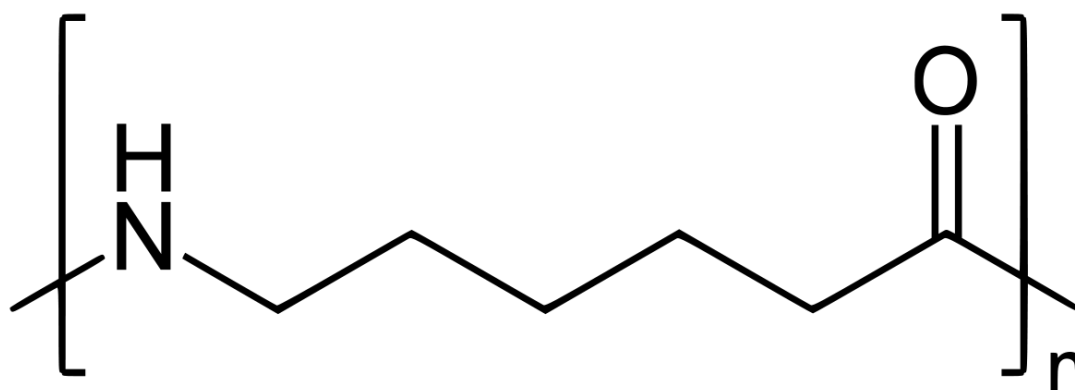
TPU- Thermoplastic Polyurethane, Θερμοπλαστική Πολυουρεθάνη.



Αναπαράσταση του TPU, Πηγή: Structural design of polyurethane/poly(butylene succinate)/polycaprolactone compounds: Via a multilayer-assembled strategy: Achieving tunable triple-shape memory performances Yu Zheng, Xiaoying Ji, Qingwen Wang, Shaoyun Guo

Το TPU ή αλλιώς θερμοπλαστική πολυουρεθάνη είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Είναι ένα αρκετά κοινό υλικό το οποίο προτιμάται συχνά για την εξαιρετική ελαστικότητά του, χωρίς όμως να είναι απόλυτα εύκαμπτο. Άλλες ιδιότητές του σχετικές με την εκτύπωση είναι η μεγάλη ανθεκτικότητά του, το γεγονός πως δεν επηρεάζεται από φαινόμενα στρέβλωσης/παραμόρφωσης αλλά και πως δεν διαλύεται στο νερό το κάνουν αρκετά κατάλληλο για διάφορες χρήσεις. Το TPU χρησιμοποιείται καταναλωτικά για διάφορους σκοπούς. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή ελαστικών για τηλεκατευθυνόμενα, για προστατευτικά τηλεφώνων και διάφορα άλλα ελαστικά αντικείμενα όπως για παράδειγμα λαβές για τιμόνια ποδηλάτων. Το TPU εκτυπώνεται εύκολα σε μηχανήματα FDM. Το σημείο τήξης του είναι στους 210 με 230 °C, το οποίο ενώ είναι υψηλότερο από το PLA, είναι σε αρκετά χαμηλότερη θέση από το ABS και το PETG. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι πως, λόγω της φύσης του, δεν είναι αναγκαία η θέρμανση της πλάκας κατασκευής, αν και προτιμάται για την αποφυγή λαθών. Ένα μειονέκτημα του TPU είναι το γεγονός πως είναι υγροσκοπικό, και σταδιακά διαλύεται, το οποίο το κάνει πολύ ακατάλληλο για τρόφιμα, επομένως δεν χρησιμοποιείται καθόλου στην βιομηχανία τροφίμων. (real-filament.com, Yu Zheng, Xiaoying Ji, Qingwen Wang, Shaoyun Guo 2019, Emmett Grames 2021)

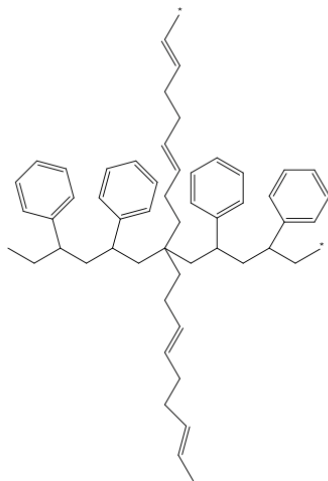
Nylon- Νάιλον



Αναπαράσταση του Νάιλον Πηγή: Wikimedia Commons

Τα νάιλον είναι κοινά συνθετικά πολυμερή θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών και διαδικασιών. Για παράδειγμα στην κατασκευή ρούχων και μαγιό, διχτυών για ψάρεμα Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, το Nylon 6 προτιμάται για την χαμηλή θερμοκρασία τήξης του, (220 °C), τις εξαιρετικές μηχανικές αντοχές του, την ευκαμψία του και την καλή αντίστασή του σε ακραίες θερμοκρασίες. Είναι ένα χρήσιμο εναλλακτικό του ABS, καθώς διαθέτει αρκετές από της ιδιότητες που έχει το ABS και μπορεί να χρωματιστεί. Δυστυχώς, όπως και το PETG, είναι υγροσκοπικό, επομένως απαιτείται μεγάλη προσοχή στην αποθήκευσή του. Ακόμη, είναι δύσκολη η χρήση του στην βιομηχανία των τροφίμων. Μερικά ακόμη μειονεκτήματα του νάιλον είναι πως η ανακύκλωσή του είναι δυσκολότερη από άλλα υλικά καθώς πρέπει να καθαριστεί πλήρως πριν λιώσει διότι πολλά μικρόβια και μύκητες επιβιώνουν στις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες στις οποίες το νάιλον λιώνει πριν μετατραπεί σε σφαιρίδια πρώτης ύλης, καθώς και το γεγονός πως παράγει αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωσή του. Επιπλέον, είναι συχνό φαινόμενο να εμφανίζει αμυχές και χαρακιές κατά την χρήση του. Από την άλλη, έχει αρκετά καλή προσκόλληση στην πλάκα κατασκευής λόγω της ελαστικής φύσης του. (real-filaments.com, Hanna Watkin 2016, Pranav Gharge 2021)

HIPS- High Impact Polystyrene, Πολυστυρένιο Υψηλής Αντοχής.

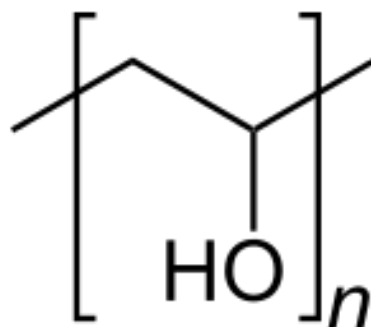


Αναπαράσταση του Πολυστυρενίου Υψηλής Αντοχής. Αποτελείται από μία κεντρική αλυσίδα πολυστυρενίου με αλυσίδες Πολυβουταδιένιου στα δεξιά και αριστερά.

Πηγή: Wikimedia Commons

Το πολυστυρένιο υψηλής αντοχής (High Impact Polystyrene, HIPS) ανακαλύφθηκε το 1961 από τον Charles F. Fryling. (<https://patents.google.com/patent/US3144420> High Impact Polystyrene). Είναι ένα πλαστικό σχετικά χαμηλού κόστους και χρησιμοποιείται συχνά σε δημιουργία και εκτύπωση θηκών και κουτιών. Για παράδειγμα μία αρκετά δημοφιλής χρήση του είναι η δημιουργία θηκών για δίσκους CD. Είναι ένα υλικό το οποίο έχει αρκετά υψηλή θερμοκρασία τήξης (230-245 °C), χρειάζεται αρκετά υψηλή θερμοκρασία και στην πλάκα κατασκευής (100-115 °C), διότι δεν προσκολλάται εύκολα και είναι επίσης αρκετά ευάλωτο στο φαινόμενο της παραμόρφωσης (warping). Το HIPS είναι αρκετά δημοφιλές στην τρισδιάστατη εκτύπωση διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στηρικτικό υλικό σε εκτυπώσεις ABS καθώς και τα δύο διαθέτουν παρόμοιες ιδιότητες. Μετά την εκτύπωση το HIPS μπορεί να διαλυθεί εύκολα με λιμονίνη. (real-filament.com, Pranav Gharge 2021)

PVA- Polyvinyl Alcohol, Πολυβινυλική Αλκοόλη.



Αναπαράσταση της Πολυβινυλικής Αλκοόλης Πηγή: Wikimedia Commons

Η πολυβινυλική αλκοόλη (PVA και όχι PVAc, οξικό πολυβινύλιο) είναι ένα αρκετά κοινό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στην βιομηχανία χάρτου στην κατασκευή του χαρτιού, στην πύκνωση κόλλας PVAc και στην εφαρμογή ως εξωτερικό φιλμ για την προστασία χαρτιού και υφάσματος. Ακόμη, λόγω της αρκετά χαμηλής τοξικότητάς του προς τον άνθρωπο, χρησιμοποιείται στην φαρμακοβιομηχανία για την δημιουργία διαλύματος φακών επαφής και στην υφασματοβιομηχανία για την δημιουργία νημάτων Vinylon. Στην τρισδιάστατη εκτύπωση κυρίως χρησιμοποιείται σαν υποστηρικτικό υλικό για εκτυπώσεις PLA, λόγω των κοινών χαρακτηριστικών εκτύπωσης που μοιράζονται, όπως θερμοκρασία πλάκας εκτύπωσης (σχεδόν αχρείαστη με 45-60 °C), ταχύτητα εκτύπωσης και απομάκρυνση στομίου. Το PVA είναι διαλυτό σε νερό, οπότε μετά την εκτύπωση και αφού ψυχθεί το PLA, μία βύθιση σε δοχείο με νερό βρύσης είναι αρκετή για την απομάκρυνση των στηριγμάτων χωρίς να επηρεάσουν την ακεραιότητα της επιφάνειας του εκτυπωμένου αντικείμενου. (real-filament.com, Pranav Gharge 2021)

Νήμα PLA με ίνες ξύλου.



Παιχνίδι από νήμα με ίνες ξύλου. Πηγή: "Among the wonders of #ces2016 was this wood 3D print of an octopus." by SusanBroman is licensed under CC BY-NC 2.0

Το νήμα ξύλου είναι ένα υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για κατασκευές τρισδιάστατης εκτύπωσης με πιο προηγμένα μηχανήματα. Τα καταναλωτικά μοντέλα τρισδιάστατων εκτυπωτικών μηχανών, συνήθως λόγω του μπρούτζινων στομίων τους δεν δύνανται να χρησιμοποιήσουν το νήμα με ίνες ξύλου διότι ο μπρούτζος φθείρεται. Το υλικό κατασκευάζεται κυρίως από PLA (ποσοστό 70% PLA με 30% ίνες ξύλου, πηγή Mafalda Theias, all3dp.com, wood 3d printing guide), με ίνες ξύλου συνδυασμένες στο υλικό. Αρχικά το νήμα κατασκευαζόταν με ρινίσματα ξύλου, αλλά μετά από έρευνες ανακαλύφθηκε πως η χρήση ινών ξύλου είναι πιο ωφέλιμη. Γενικά υπάρχουν οι εξής λόγοι για να γίνει χρήση ξύλου στην εκτύπωση. Χρησιμοποιείται κυρίως για την δημιουργία διακοσμητικών αντικειμένων όπως βάζα, κηροπήγια γλάστρες κ.α. Η χρήση ξύλου στα νήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης (είτε ως ίνες είτε ως ρινίσματα) συμβάλλει στην ανακύκλωση παλαιών κομματιών ξύλου και την διατήρηση του περιβάλλοντος καθώς προστατεύει τους φυσικούς πόρους της γης. (J. Gardan, D.C. Nguyen, R. Lionel, G. Montay 2016, <https://colorfabb.com/woodfill>).

Μεταλλικά νήματα

Η FDM μέθοδος υποστηρίζει την δημιουργία αντικειμένων από μέταλλο, αλλά ο πιο κατάλληλος τρόπος είναι με την χρήση εκτυπωτών αποκλειστικά προορισμένους για μέταλλο, οι οποίοι απαιτούν αρκετά σημαντική επένδυση κεφαλαίου. Αν και πιθανά πρόκειται για μία καλή επένδυση και δίνεται η δυνατότητα εκτύπωσης υλικών όπως ατσάλι, χαλκός και κράματα όπως "Inconel", ένα κράμα νικελίου και χρωμίου, είναι υπερβολικά ακριβό για τον μέσο καταναλωτή. Η καλύτερη λύση για τον μέσο καταναλωτή είναι η χρήση νημάτων "metal fill" τα οποία είναι παρόμοια με τα νήματα ξύλου, στο χαρακτηριστικό τους πως είναι στην πραγματικότητα κατασκευασμένα από άλλα υλικά όπως PLA και ABS με προσθήκη σκόνης και ρινισμάτων μετάλλων ώστε οι εκτυπώσεις να φαίνονται απλά πως είναι τυπωμένες από μέταλλο ενώ κατά κύριο λόγο είναι από πλαστικό. Τα περισσότερα καταναλωτικά μηχανήματα δεν είναι απόλυτα προετοιμασμένα να δουλέψουν νήματα με μέταλλο. Είναι απαιτητικό υλικό και απαιτεί εξειδικευμένο στόμιο από ατσάλι ή μπρούτζο με κάλυψη νικελίου για καλύτερη αγωγιμότητα θερμότητας και προστασία από φθορά και υψηλές θερμοκρασίες. (Arun Kumar Shrivastav 2020, Scott Hatfield 2019 gizmodorks.com)



Διακοσμητικό κατασκευασμένο από τρία "Metal Fill" νήματα: Μπούτζο, χαλκό και ορείχαλκο. Πηγή: "Pokemon Go Ball 1POKEMON BALL2" by themodelmaker is licensed under CC BY-NC-SA 2.0

ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΣ (STEREOLITHOGRAPHY AND DIGITAL LIGHT PROCESSING).

Η στερεολιθογραφία είναι η πρώτη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που δημιουργήθηκε. Έρευνα για την στερεολιθογραφία υπάρχει από το 1970, αλλά η λέξη και ο ορισμός επινοήθηκε από τον Charles Hull το 1984 όταν κατέθεσε την αίτησή του για πατέντα της μεθόδου (<https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>). Ουσιαστικά η λέξη “stereolithography” προέρχεται από τις λέξεις «στερεό» και «λιθογραφία» και περιγράφει την διαδικασία της εκτύπωσης στρωμάτων φωτοπολυμερικής ρητίνης τα οποία πολυμερίζονται και στερεοποιούνται με την χρήση δέσμης λέιζερ ώστε να κατασκευαστούν τρισδιάστατα αντικείμενα. Η ρητίνη συνήθως διατηρείται σε αδιάφανα δοχεία ώστε να μην πολυμερίζεται πρόωρα και διοχετεύεται, κατά την εκτύπωση, σε μία δεξαμενή τοποθετημένη ανάμεσα στην επιφάνεια εκτύπωσης και την ακτίνα λέιζερ. Αφού η επιφάνεια εκτύπωσης κατέβει και έρθει σε επαφή με την ρητίνη, έχοντας μία αρκετά μικρή ποσότητα επαπτόμενη πάνω της, συγκεκριμένα τμήματα της ρητίνης εκτίθενται στην ακτίνα υπεριώδους φωτός, προκαλώντας τον πολυμερισμό και την στερεοποίησή της πάνω στην πλάκα, όπως περιγράφεται στο διάγραμμα παρακάτω. Έπειτα, η πλάκα απομακρύνεται από την ρητίνη με το νέο εκτυπωμένο στρώμα υλικού πάνω της και ένα μηχανικό τμήμα που θυμίζει αρκετά κινούμενο doctor blade από παραδοσιακή λιθογραφική μηχανή, απομακρύνει την ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ώστε νέο υλικό να κατακλύσει την δεξαμενή για να εκτυπωθεί το επόμενο στρώμα του αντικειμένου. Μία μέθοδος εκτύπωσης που αρκετά συχνά συνδέεται με την στερεολιθογραφία είναι η εκτύπωση DLP (Direct Light Processing). Η μέθοδος αυτή είναι πολύ παρόμοια με την στερεολιθογραφία. Η κύρια διαφορά τους είναι πως η μέθοδος DLP χρησιμοποιεί έναν προβολέα φωτός LED για να πολυμερίσει με μία (ή περισσότερες για μεγαλύτερα εξαρτήματα) εμφάνιση το κάθε στρώμα της εκτύπωσης.

Η στερεολιθογραφία είναι μία μέθοδος που παράγει αρκετά λεπτομερή αντικείμενα χωρίς πολλές ατέλειες. Δηλαδή, η μέθοδος παράγει πιστές φυσικές αναπαραστάσεις των τρισδιάστατων μοντέλων τα οποία χρησιμοποιούνται. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της στερεολιθογραφίας σε αντίθεση με άλλες μεθόδους όπως η FDM είναι ο περιορισμός στα υλικά. Η μέθοδος της στερεολιθογραφίας μπορεί να εκτυπώσει μόνο φωτοπολυμερικά υλικά και ρητίνες, τα οποία σαν υλικά είναι αρκετά εύθρυπτα και δεν προτιμώνται για λειτουργικά πρωτότυπα. Ακόμη συχνά χρειάζονται για τον καθαρισμό των αντικειμένων και για φινίρισμα αρκετά επιπλέον υλικά όπως ορυκτέλαιο για να γυαλίσει και να φανεί η διαφάνεια των διαφανών πλαστικών. Επιπλέον, οι ρητίνες και τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αρκετά ακριβότερα από αντίστοιχα μοντέλα FDM. Αντίθετα, ένα πλεονέκτημα που έχει η μέθοδος SLA είναι πως μπορεί να χρησιμοποιήσει τον ίδιο τύπο αρχείων όπως και η FDM, επομένως δεν απαιτούνται ξεχωριστά προγράμματα “slicer” ή “CAD” για την μέθοδο. (Alkaios Bournias Varotsis 3dhubs, Emmet Grames 2020)

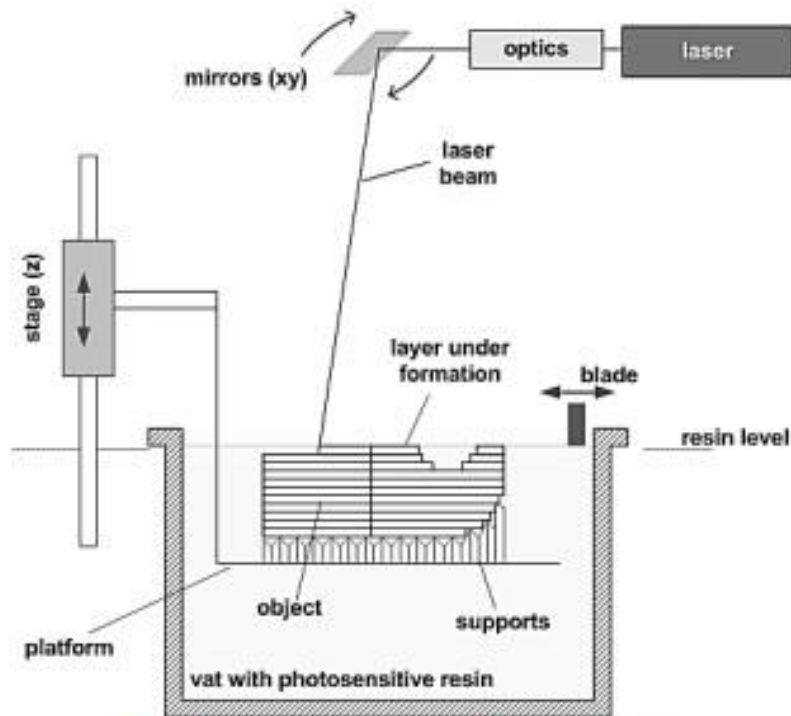


Figure 1. Sketch of the stereolithography process.

Παράδειγμα διάταξης "όρθιας" (upright) στερεολιθογραφικής μηχανής. Συνήθως τα βιομηχανικά μοντέλα χρησιμοποιούν αυτή την διάταξη, καθώς είναι πιο εύκολο να τυπωθούν μεγαλύτερα αντικείμενα. Πηγή: *The Use of Stereolithography Rapid Tools in the Manufacturing of Metal Powder Injection Molding Parts*, Valter Beal, Carlos Henrique Ahrens, Paulo Antonio Pereira Wndhausen 2004

Ανεξάρτητα από τους περιορισμούς της μεθόδου, η μέθοδος της στερεολιθογραφίας έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε διάφορα πεδία. Για παράδειγμα, στον τομέα της ιατρικής έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή δοχείων φαρμάκων που ονομάζονται “polypills” (πολυχάπια), τα οποία έχουν πολλαπλές ενεργές ουσίες (Essyrose Mathew, Giulia Pitzanti, Eneko Larrañeta και Dimitrios A. Lamprou 3D Printing of Pharmaceuticals and Drug Delivery Devices 2020).



Πολυχάπια εκτυπωμένα με την μέθοδο της στερεολιθογραφίας και τα περιεχόμενά τους.

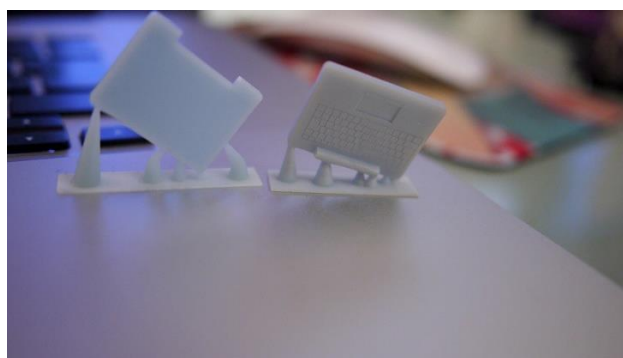
Πηγή: 3D Printing of Multi-Layered Polypill Containing Six Drugs Using a Novel Stereolithographic Method 2019. P. Roblez-Martinez, X. Xu, S.J. Trenfield, A. Awad, A. Goyanes, R. Telford, A. W. Basit, S. Gaisford.

Ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκε αυτό, είναι με την ανάμιξη των ενεργών φαρμακευτικών ουσιών με ρητίνη. Καθώς αποφεύγεται η καταστροφή της ενεργής ουσίας όπως θα συνέβαινε με την μέθοδο FDM ή με την μέθοδο SLS (Selective Laser Sintering), η μέθοδος SLA κρίθηκε η καταλληλότερη για αυτή την εφαρμογή. Το πρόβλημα με την εκτύπωση πολλαπλών επιπέδων, όπως αυτά που η ομάδα ήθελε να κατασκευάσει, είναι πως τα διαθέσιμα μηχανήματα και προγράμματα της μεθόδου δεν υποστήριζαν την εκτύπωση πολλαπλών ρητινών. Το πρόβλημα λύθηκε με την κατασκευή εκτυπωτικής μηχανής που μπορεί να τυπώσει πολλά διαφορετικά επίπεδα. Η εργασία αυτή απέδειξε πως η μέθοδος της στερεολιθογραφίας έχει μέλλον στην φαρμακοβιομηχανία, ακόμη και σε βιομηχανικό επίπεδο παραγωγής, ειδικά σε εφαρμογές που χρειάζονται εκτύπωση και παραγωγή με μικρές θερμοκρασίες για να μην αλλοιωθούν τα υλικά. Μία πιθανή μελλοντική εφαρμογή είναι η δημιουργία κατά παραγγελία φαρμάκων είτε ως διαιτολογικά συμπληρώματα είτε ως φάρμακα για ασθενείς με χρόνια νοσήματα, οι οποίοι αρκετές φορές χρειάζονται πολλαπλά φάρμακα και δραστικές ουσίες.

ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ SLA/DLP

Συμβατική Ρητίνη για 3D Printing (Standard Resin).

Η συμβατική ρητίνη είναι το πιο βασικό υλικό που χρησιμοποιούν οι στερεολιθογραφικοί εκτυπωτές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων και πρωτοτύπων. Ενώ υπάρχουν πολλά είδη συμβατικής ρητίνης και αρκετές εταιρείες έχουν διαφορετικές προσμίξεις στα προϊόντα τους, η φράση «συμβατική ρητίνη» χρησιμοποιείται για όλες τις ρητίνες που έχουν παρόμοιες μη-εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Είναι κατάλληλο περισσότερο για την κατασκευή μοντέλων απόδειξης ορθότητας αρχής (proof of concept) διότι είναι αρκετά εύθρυπτο και εύθραυστο υλικό. Επίσης είναι αρκετά κατάλληλο υλικό για την δημιουργία έργων τέχνης με ρητίνη και φιγούρων μοντελισμού λόγω της μεγάλης λεπτομέρειας που μπορούν να αποδώσουν οι στερεολιθογραφικοί εκτυπωτές. Η συμβατική ρητίνη έχει αρκετά χαμηλή τιμή σε σύγκριση με πιο εξειδικευμένες ρητίνες αλλά είναι ακριβότερη από υλικά όπως το PLA που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση FDM. Όπως και οι περισσότερες ρητίνες, η συμβατική ρητίνη κατά την εκτύπωση παράγει βλαβερές προς τον άνθρωπο αναθυμιάσεις, οπότε είναι αναγκαίος ο σωστός εξαερισμός του χώρου. Επιπλέον, για την σωστή χρήση της μεθόδου και την εκμετάλλευσή της στο έπακρο, είναι αναγκαίες διάφορες μετεκτυπωτικές διαδικασίες, όπως η βύθιση των εκτυπωμένων αντικειμένων σε καθαριστικό υγρό για την απομάκρυνση της μη-πολυμερισμένης ρητίνης. Επειδή οι ρητίνες και το καθαριστικό υγρό (ισοπροπυλική αλκοόλη/IPA ή μονομεθυλαιθέρας τριπροπυλενογλυκόλης/TPM αν δεν υπάρχει IPA) μπορεί να είναι τοξικά για τον άνθρωπο, απαιτείται μεγάλη προσοχή και εξοπλισμός όπως γάντια νιτριλίου, προστατευτικά γυαλιά και ποδιά. Τα αντικείμενα μπορούν επίσης να καθαριστούν με την χρήση λουτρού υπερήχων, ένα σχετικά δαπανηρό εργαλείο που χρησιμοποιείται στην κατασκευή κοσμημάτων (Maëli Latouche 3Dhubs) (Robert Abbel and Erwin R. Meinders 2017).



1.5.1.1 Αντικείμενα από φωτοπολυμερική ρητίνη. Πηγή: "3D Printer" by Danny Choo is licensed under CC BY-SA 2.0

Διάφανη Ρητίνη (Clear Resin).

Στην αγορά, πωλούνται διάφορες διάφανες ρητίνες πωλούνται. Οι διάφανες ρητίνες είναι αρκετά ευρεία κατηγορία και περιλαμβάνει πολλών ειδών ρητίνες με διαφορετικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, οι “standard clear” ρητίνες έχουν αρκετά παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με την συμβατική ρητίνη με το επιπλέον πλεονέκτημα πως μπορούν να επεξεργαστούν και να γυαλιστούν με διάφορες μετεκτυπωτικές διαδικασίες μέχρι να γίνουν εντελώς διαφανείς, ενώ οι ενισχυμένες “ABS-like” ρητίνες είναι ακριβότερες αλλά έχουν αυξημένες μηχανικές δυνατότητες συγκριτικά με το ABS, για χρήσεις σε εφαρμογές που απαιτούν αντοχές στην τριβή και την κρούση. Οι διαφανείς ρητίνες κυκλοφορούν σε διάφορα χρώματα και χρησιμοποιούνται σε παρόμοιες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται και οι αντίστοιχου τύπου μη-διαφανείς ρητίνες. Για παράδειγμα, σε εξαρτήματα τα οποία δεν απαιτούν πολλές μηχανικές αντοχές, γίνεται χρήση standard-clear ρητίνης, με την επιπλέον εφαρμογή πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εξαρτημάτων που χρειάζεται διαφάνεια, όπως καλύμματα λαμπτήρων, δοχεία, δοκιμαστικούς σωλήνες και εξωτερικά μηχανημάτων στα οποία πρέπει να παρατηρείται το εξωτερικό τους είτε για σκοπούς πειραματισμού είτε για επισκευές και αποτροπή σφαλμάτων. Υπάρχουν έρευνες και πειραματισμοί ακόμη και για εκτυπωμένα εξαρτήματα αυτοκινήτων, εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, που μπορούν να τυπωθούν με διάφανη ρητίνη, (προστατευτικά των λαμπτήρων αυτοκινήτων και καπάκια για δείκτες καντράν)(all3dp.com, 3dhubs.com, formlabs.com).



Η διάσημη θάρκα "benchy" που συχνά χρησιμοποιείται για την δοκιμή νέων υλικών και μηχανών από διάφανη ρητίνη. Πηγή: "15 mm long #3DBenchy printed on a formlabs form2.creativetools.se - 3D printer - 3Dprinter - SLA 3dprinting 3d printing" by Creative Tools is licensed under CC BY 2.0

Ρητίνη Ταχέως Πολυμερισμού (Rapid Resin).

Ρητίνη η οποία πολυμερίζεται και σταθεροποιείται με ταχείς ρυθμούς. Είναι χρήσιμη στην κατασκευή εργαλείων και υλικών που απαιτούν ακρίβεια και ταχύτητα. Η μεγάλη ταχύτητα πολυμερισμού της, προλαμβάνει την σμίκρυνση και την παραμόρφωση του αντικειμένου στην διαδικασία καθαρισμού του μοντέλου. Αυτό είναι ένα συχνό φαινόμενο που συμβαίνει όταν τμήματα του μοντέλου δεν έχουν μεταβεί απόλυτα στην στέρεα μορφή τους, οπότε κατά την διάρκεια του καθαρισμού τους, είτε εξαιτίας του πλυσίματος και σκουπίσμά τους από το καθαριστικό υλικό, είτε από την διάλυσή τους από το καθαριστικό, τα εκτυπωμένα αντικείμενα παραμορφώνονται και χάνουν τις λεπτομέρειές τους. (elegoo.com, 3dhubs.com, formlabs.com)

Ενισχυμένη/Σκληρή Ρητίνη (Tough Resin/ABS-like Resin).

Το αντίστοιχο υλικό του ABS για την SLA μέθοδο, οι ενισχυμένες ρητίνες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αντικειμένων με υψηλές απαιτήσεις μηχανικών αντοχών. Η ενισχυμένη ρητίνη είναι ένα υλικό που προτιμάται για λειτουργικά πρωτότυπα και εξαρτήματα τα οποία θα δέχονται συχνά τριβή, πίεση, ακόμα και κρούση, όπως καπάκια που βιδώνονται ή κλείνουν με επαφή και συνδέσμους κινούμενων εξαρτημάτων. Είναι, όπως και όλες οι υπόλοιπες εξειδικευμένες ρητίνες, ακριβότερη από την βασική ρητίνη, δεν ενδείκνυται για αντικείμενα μικρού πάχους λόγω της έλλειψης ελαστικότητάς του (δεν λυγίζει και σπάει όταν δέχεται πιέσεις) και έχει χαμηλή θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης, επομένως δεν χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες. Η ενισχυμένη ρητίνη ενδέχεται να είναι και έγχρωμη και διαφανής ανάλογα με τις ανάγκες της εκτύπωσης, με αυξημένα κόστη. Η υπερβολική παραμονή στην σκάφη με την καθαριστική ισοπροπυλική αλκοόλη μπορεί να οδηγήσει στην παραμόρφωση και την αποδυνάμωση του υλικού. Η ενισχυμένη ρητίνη είναι λιγότερο εύθραπτη από την ρητίνη υψηλής ανθεκτικότητας που ακολουθεί (elegoo.com, 3dhubs.com, formlabs.com).

Ρητίνη Υψηλής Ανθεκτικότητας (Durable Resin/PP-like Resin).

Όπως και η ενισχυμένη/σκληρή ρητίνη, η Ρητίνη υψηλής ανθεκτικότητας είναι ένα υλικό που προσπαθεί να αναπαράγει τα χαρακτηριστικά ενός υλικού που χρησιμοποιείται κυρίως στην FDM εκτύπωση. Η συγκεκριμένη ρητίνη έχει αρκετά χαρακτηριστικά του Πολυπροπυλενίου. Δηλαδή διαθέτει αρκετή αντίσταση στην φθορά, είναι αρκετά εύκαμπτη και δεν σπάει εύκολα καθώς έχει αρκετά μεγάλη αντίσταση στην κρούση, σε μεγαλύτερο ακόμα βαθμό από την σκληρή ρητίνη. Οι ιδιότητες της ρητίνης την καθιστούν ιδανική για την κατασκευή εξαρτημάτων και αντικειμένων που δεν δέχονται πολλή τριβή. Η ρητίνη υψηλής ανθεκτικότητας έχει κοινά διάφορα από τα προβλήματα της ενισχυμένης ρητίνης. Για παράδειγμα δεν συνιστάται για αντικείμενα με λεπτά τοιχώματα, έχει χαμηλή θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης και έχει ακόμα μικρότερη τάση εφελκυσμού από την ενισχυμένη. (elegoo.com, formlabs.com)

Φυτικές Ρητίνες (Plant Based Resin).

Οι φυτικές ρητίνες είναι υλικά που προκύπτουν από την επεξεργασία φυτικής ύλης όπως είναι τα φασόλια σόγιας. Η φυτική ρητίνη είναι ένα υλικό με ιδιότητες παρόμοιες με αυτές της απλής ρητίνης, με τα επιπλέον χαρακτηριστικά ότι δεν παράγει οσμές και τοξικές αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση, είναι βιοδιασπώμενη. Ενώ η ρητίνη μπορεί να χρωματιστεί ώστε να παράγει έγχρωμες εκτυπώσεις υπάρχει και σε διάφανη εκδοχή. Παρόλα αυτά, δεν είναι κατάλληλη για επαφή με το ανθρώπινο δέρμα στην μη-πολυμερισμένη μορφή της, επομένως πρέπει πάλι να υπάρχουν προφυλάξεις. Επιπλέον, δεν έχει τόσο καλή προσκόλληση στην πλάκα κατασκευής όσο άλλες ρητίνες και ενώ συχνά διαφημίζεται ως αρκετά μη-τοξική προς τον άνθρωπο ώστε να γίνεται η χρήση της ακόμα και στην οδοντιατρική, υπάρχουν και εξειδικευμένες «οδοντικές» ρητίνες που είναι καταλληλότερες για την εφαρμογή αυτή. (B. Madsen, T. Løgstrup Andersen 2013) (formlabs.com) (Maria Farsari 2017)

Κεραμικές Ρητίνες (Ceramic Resins).

Οι κεραμικές ρητίνες είναι ουσιαστικά φωτοπολυμερικές ρητίνες που έχουν αρκετή περιεκτικότητα οξειδίου του πυριτίου (silica). Δημοφιλές σαν υλικό σε αυτή την κατηγορία είναι ο πορσελίτης (porcelite). Ο πορσελίτης είναι ένα φωτοπολυμερικό υλικό το οποίο όταν πολυμερίζεται χρησιμοποιείται στην δημιουργία στερεών κεραμικών αντικειμένων, που με την σειρά τους τοποθετούνται σε θερμασμένο καμίνι και μετατρέπονται σε πορσελάνη. Το υλικό χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή οικιακών αντικειμένων όπως διακοσμητικά, βάζα και πιατικά. Σε πιο εξειδικευμένες χρήσεις, οι κεραμικές ρητίνες και συγκεκριμένα ο πορσελίτης, ο οποίος δημιουργήθηκε αποκλειστικά με σκοπό την χρήση του στην τρισδιάστατη εκτύπωση από την εταιρεία Tethon 3D (πηγή: tethon3d.com) προτιμάται για τις μονωτικές του ιδιότητες, την αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες, την του στην οξείδωση και τις καλές μηχανικές αντοχές του. (Hanna Watkin 2018, Hanna Augur 2016, formlabs.com)

Castable Resins- Ρητίνες Χύτευσης.

Οι ρητίνες χύτευσης είναι φτιαγμένες για την κατασκευή καλουπιών. Είναι φτιαγμένες ώστε να τυπώνονται με ταχύτητα και όχι για να προσφέρουν μηχανικές αντοχές, αντιθέτως είναι αρκετά επιθυμητή η ιδιότητα της εύκολης, γρήγορης και ολικής καύσης τους χωρίς κατάλοιπα. Οι ρητίνες αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλουπιών, κυρίως από τσιμέντο και πηλό, τα οποία με την σειρά τους χρησιμοποιούνται για την χύτευση μετάλλων. Τα καλούπια αυτά χρησιμοποιούνται συχνά από κοσμηματοποιούς για την κατασκευή κοσμημάτων αλλά και σε άλλες βιομηχανίες για την ταχεία κατασκευή σχετικά μικρού μεγέθους μεταλλικών εξαρτημάτων με καλούπια. Οι χυτεύσιμες ρητίνες συνήθως περιέχουν μέσα κεριά ώστε να καίγονται εύκολα σε φούρνους, χωρίς κατάλοιπα, ώστε να μην υπάρχουν ατέλειες και ασυνέχειες στα αντικείμενα που θα προκύψουν από την χρήση των καλουπιών αργότερα. (formlabs.com, phrozen3d.com)

Οδοντιατρική Ρητίνη- Dental Resin.

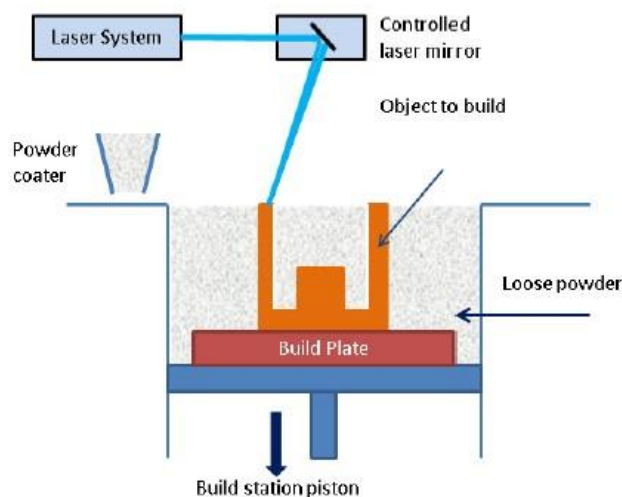
Οι ρητίνες που δημιουργήθηκαν για εφαρμογές στην οδοντιατρική ονομάζονται οδοντιατρικές ρητίνες ή και οδοντικές κονίες (dental cement). Είναι φιλικές προς τον άνθρωπο (βιοσυμβατές), παραγόμενες από υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία διαφόρων προσθετικών αντικειμένων (prosthetics) όπως νάρθηκες, βίδες για νάρθηκες που έρχονται σε επαφή με σάρκα, καθετήρες, κ.α. Κυρίως βέβαια, χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τεχνητών δοντιών, μασελών, διαγνωστικών μοντέλων, ακόμα και ορθοδοντικά στηρίγματα δοντιών (σιδεράκια). Υπάρχουν διάφορα είδη οδοντικών ρητινών. Η εταιρεία formlabs για παράδειγμα, έχει δημιουργήσει την «ρητίνη προσχεδίου» (draft resin) η οποία μπορεί να εκτυπωθεί σε πολύ υψηλές ταχύτητες και χρησιμοποιείται στην ταχύτερη κατασκευή μοντέλων για την δοκιμή πρωτότυπων προσθετικών μοντέλων είτε δοντιών είτε ολόκληρων μασελών, έτσι μπορούν να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις και να προκύψει το καλύτερο προϊόν. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα λοιπόν των οδοντικών ρητινών είναι η βιοσυμβατότητά τους. (Arun Kumar Shrivastav 2021, formlabs.com)



Μασέλα από οδοντιατρική ρητίνη. Πηγή: "Dental-SG-curing" by Creative Tools is licensed under CC BY 2.0

POWDER BED FUSION PRINTING – ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΚΟΝΗΣ

Η μέθοδος Selective Laser Sintering (Επιλεκτική Θερμοσυγκόλληση ή Θερμοσυσσωμάτωση) με λέιζερ είναι μία μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης η οποία κάνει χρήση ενός λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα το οποίο όταν προσπίπτει σε σκόνη θερμοπλαστικού υλικού όπως, για παράδειγμα, είναι το νάιλον, εκτελεί ταχεία θερμική σύντηξη του υλικού σε έναν θάλαμο κατασκευής. Αμέσως μετά, ένας μηχανικός κινούμενος άξονας ανανεώνει την σκόνη πάνω από το υλικό, από έναν δεύτερο θάλαμο υλικού όσο το κινούμενο «πατάρι» εκτύπωσης μετακινείται χαμηλότερα για να αφήσει το φρέσκο υλικό να το καλύψει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Εφευρέθηκε από τον Carl R. Deckard την δεκαετία του 80'. (Jim Lorincz, 2014).



Διάγραμμα Εκτύπωσης SLS. Πηγή: Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Using Ultrasound, Joachim Bamberg, Martin Spies, Alexander Dillhöfer, Thomas Hess 2014

Η μέθοδος SLS είναι η πλέον «βιομηχανική» από τις πιο δημοφιλής μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Δηλαδή είναι η μέθοδος η οποία είναι λιγότερο συμβατή με την καταναλωτική αγορά και περισσότερο χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές από μηχανικούς και εταιρείες. Αυτό συμβαίνει και εξαιτίας του κόστους του υλικού και των απαιτήσεων ρεύματος, καθώς το λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα χρειάζεται αρκετή ενέργεια για να λειτουργήσει αλλά και λόγω του χρόνου που χρειάζεται να εκτυπωθούν και μετά να κρυώσουν τα εκτυπωμένα αντικείμενα. Από την άλλη, η μεγάλη επιφάνεια εκτύπωσης είναι κατάλληλη για ταυτόχρονη παραγωγή πολλαπλών πρωτοτύπων ταυτόχρονα. Επιπλέον, οι FDM και SLA μέθοδοι δεν παράγουν προϊόντα με τόσο ικανοποιητικές μηχανικές και θερμικές αντοχές, σε σχέση με την μέθοδο SLS που είναι καταλληλότερη για την παραγωγή λειτουργικών πρωτοτύπων.

Η μέθοδοι DMLS και SLM (Selective Laser Melting, Επιλεκτική Τήξη με Λέιζερ) είναι παρόμοιες, και έχουν την ίδια φιλοσοφία και γενική λειτουργική μέθοδο με την SLS, με μόνη διαφορά την χρήση σκόνης μετάλλων αντί πλαστικών πολυμερών. Η διαφορά μεταξύ των μεθόδων DMLS και SLM είναι πως η μέθοδος SLM, λιώνει το μέταλλο αντί να το συντήκει, παράγοντας ένα αρκετά πυκνότερο αντικείμενο ως αποτέλεσμα. Ακόμη, παρόμοια με την μέθοδο SLM είναι η μέθοδος EBM (Electron Beam Melting, Τήξη με Ακτίνα Ηλεκτρονίων). Οι διαφορές είναι πως γίνεται σε κενό αέρος και χρησιμοποιεί ισχυρή ακτίνα δέσμης ηλεκτρονίων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά με αγώγιμα υλικά αντί για λέιζερ καθώς η όλη διαδικασία είναι βασισμένη στην μεταβίβαση ηλεκτρικού φορτίου. (Loughborough University- Powder bed fusion) (S. Rahmati 2014) (Farooq Azam, Ahmad-Majdi Abdul-Rani, Khurram Altaf, Haizum Aimi Zaharin 2018) (Robert Abbel and Erwin R. Meinders 2017)

ΥΛΙΚΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ POWDER BED

Οι εκτυπώσεις σκόνης μπορούν να τυπώσουν διάφορα υλικά ανάλογα με το μηχάνημα. Το εύρος των υλικών που μπορούν να τυπωθούν εξαρτάται κυρίως από την ισχύ της ακτίνας που χρησιμοποιείται. Η μέθοδος SLS κυρίως τυπώνει θερμοπλαστικά πολυαμίδια και κυρίως νάιλον 12. Τα πολυαμίδια αυτά προτιμώνται εξαιτίας των ιδιοτήτων τους ως ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά (Kloos, Stephanie; Dechet, Maximilian A.; Peukert, Wolfgang; Schmidt, Jochen, παραγωγή σφαιρικών ημικρυσταλλικών πολυανθρακικών μικροσωματιδίων για προσθετική παραγωγή με την μέθοδο του διαχωρισμού των υγρών φάσεων.)

Νάιλον 12 – Nylon 12 (PA 12)

Το νάιλον είναι ένα θερμοπλαστικό πολυαμίδιο το οποίο χρησιμοποιείται και στις εκτυπώσεις FDM και στις εκτυπώσεις SLS. Όπως και στην αντίστοιχη FDM εκτύπωση το νάιλον είναι ένα σχετικά ελαστικό υλικό με καλές μηχανικές αντοχές, όπως αντοχές στην κρούση και τριβή. Η σκόνη του νάιλον πρέπει όπως και το αντίστοιχο νήμα να φυλάγεται σε ξηρό μέρος χωρίς υγρασία διότι προσροφά υγρασία και αποσυντίθεται. Το νάιλον σε αυτή την μέθοδο εκτυπώνεται με καλύτερα αποτελέσματα όχι μόνο γιατί δεν πάσχει από τα προβλήματα της μεθόδου FDM, αλλά και επειδή η μέθοδος δεν χρειάζεται στηρίγματα, επομένως πέρα από την εξάπλωση της θερμότητας δεν είχε κάποιο άλλο πρόβλημα το οποίο επηρέαζε την ποιότητα της επιφάνειας των εκτυπωμένων αντικειμένων. (Amir Abdullah Muhamad Damanhuri, Azian Hariri, Mohd Rizal Alkahari, Siti Farhana, Zainal Bakri 2019, formlabs.com)



Σκόνη νάιλον έτοιμη για μετεκτυπωτικές εργασίες. Πηγή: "A block of nylon powder is removed from the Shapeways 3D Printer, ready for the 3D Printed parts to be removed, cleaned and shipped." by Shapeways: is licensed under CC BY-NC-ND 2.0



Αφαίρεση του εκτυπωμένου αντικειμένου από την σκόνη του νάιλον. Πηγή: "Removing a miniature 3D Printed model from a tray of nylon powder" by Shapeways: is licensed under CC BY-NC-ND 2.0

Αλουμινίδη - Aluminide

Το νάιλον είναι το βασικό υλικό της SLS εκτύπωσης αλλά δεν υπάρχει μόνο μία εκδοχή του. Συχνά γίνονται προσμίξεις του με άλλα υλικά όπως είναι το αλουμίνιο, το νικέλιο για να παρασκευαστούν σύνθετα υλικά όπως η αλουμινίδη. Η αλουμινίδη, τυπωμένη, έχει μεταλλική όψη και διαθέτει περίπου τις ίδιες γενικές ιδιότητες και αντοχές όπως και το βασικό νάιλον. Επομένως είναι αρκετά κατάλληλη και για την δημιουργία πρωτοτύπων αλλά και για περιορισμένη μαζική παραγωγή. Ενώ δεν είναι απολύτως αδιάβροχη έχει κάποιες αντοχές στο νερό αλλά δεν διαθέτει παραπάνω θερμικές αντοχές από το απλό νάιλον. Δεν απαιτεί περισσότερο μετεκτυπωτικές διαδικασίες και φινιρίσμα από το νάιλον και ούτε και ψύχεται με διαφορετικό ρυθμό επομένως ο ρυθμός εκτύπωσης και ο χρόνος εκπόνησης της εκάστοτε εκτυπωτικής διαδικασίας παραμένει ίδιος με αυτόν του απλού νάιλον. Ενώ στην βασική της μορφή είναι γκρι, γίνεται να αναμιχθεί με πιγμέντα για να αλλάξει χρώμα ή και να βαφεί μετά την εκτύπωση. (formlabs.com)



Σκόνη Αλουμινίδης-Νικελίου. Πηγή: "Sample of Nickel aluminide powder, used as a catalyst (sample of nickel aluminide)" by CERAM is licensed under CC BY-NC-SA 4.0

Νάιλον με Ίνες γυαλιού – Glass-Filled Nylon 12

Μία ακόμα τροποποίηση του νάιλον για εκτυπώσεις SLS, το Glass-Filled Nylon είναι ένα μίγμα πολυαμιδίου με ίνες γυαλιού το οποίο του προσδίδει πολύ μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχές στην φθορά αλλά και τις υψηλές θερμοκρασίες, όμως θυσιάζει ακρίβεια εκτύπωσης και λεπτομέρεια στην επιφάνεια της εκτύπωσης για αυξημένες αντοχές. Συνήθως λόγω αυτών των δυνατοτήτων του, προτιμάται στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπου μπορεί να τοποθετηθεί κοντά σε τμήματα οχημάτων με αρκετά αυξημένες θερμοκρασίες όπως είναι η μηχανές τους. Το νάιλον με ίνες γυαλιού σε αντίθεση με την αλουμινίδη διαθέτει τα ίδια προβλήματα με τα υγρά όπως και το απλό νάιλον. Στο υλικό αυτό δεν γίνονται εξειδικευμένες μετεκτυπωτικές διαδικασίες. Δυστυχώς δεν αναμιγνύεται με πιγμέντα για τον χρωματισμό του οπότε παραμένει λευκό. (sculpteo.com , formlabs.com)

Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα – Carbon Fiber Reinforced Plastics

Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα(όπως είναι το πολυαμίδιο Nylon 11) τα οποία διαθέτουν τις μεγαλύτερες αντοχές στην φθορά και τις υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τα κοινά πολυμερή. Διάφορα ενισχυμένα πλαστικά χρησιμοποιούνται. Είναι τόσο ανθεκτικά και ελαφριά σαν υλικά, που πέρα από τις καταναλωτικές εφαρμογές του, χρησιμοποιούνται και στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική, όντας ικανά να αντέξουν τις εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις και δυνάμεις που ανέχονται τα εξαρτήματα αεροπλάνων. Μία ακόμα χρήση των υλικών είναι στο χώρο των αθλημάτων καθώς χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κουπιών για κωπηλασία και πτερυγίων για σανίδες του σερφ. Πολλά από αυτά τα υλικά είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Ακόμη, τα περισσότερα είναι απολύτως αδιάβροχα. (rapidmade.com, sculpteo.com)

Ατσάλι/Ανοξείδωτο Ατσάλι – Steel/Stainless Steel

Στην μέθοδο DMLS μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές διαφορετικές σκόνες μετάλλων. Μία από αυτές είναι η σκόνη ανοξείδωτου ατσαλιού. Το ανοξείδωτο ατσάλι είναι κατάλληλο για πολλές εφαρμογές. Η ανθεκτικότητά του είναι πολύ καλή και οι αντοχές του σε υγρασία και οξείδωση το κάνουν ιδανικό για την κατασκευή λειτουργικών μεταλλικών πρωτοτύπων οποιουδήποτε είδους. Ενώ δεν είναι φθινό σαν υλικό, το κράμα διαφόρων μετάλλων όπως το νικέλιο, το χρώμιο και το μολυβδαίνιο (πηγή: sculpteo.com Stainless Steel 316L) με τον σίδηρο είναι το πλέον κατάλληλο σε πολλές διαφορετικές βιομηχανίες. Γίνεται να χρησιμοποιηθεί στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην παραγωγή εξαρτημάτων κάθε είδους. Ενώ απαιτεί πολύ ενέργεια για να λιώσει, εξαιτίας της μεγάλης αντοχής του σε υψηλές θερμοκρασίες, τα αποτελέσματα που παράγει το καθιστούν κατάλληλο για χρήση σε οποιοδήποτε εξάρτημα που δεν χρειάζεται να είναι εύκαμπτο ή μη-αγώγιμο. Το απλό ατσάλι είναι φθηνότερο μα έχει χαμηλότερες αντοχές στην υγρασία σε σχέση με το ανοξείδωτο, σκουριάζει σε βάθος χρόνου και ανάλογα με τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στο κράμα μπορεί να είναι και λιγότερο ανθεκτικό στην θερμότητα. (sculpteo.com)



Ανοξείδωτο Ατσάλινο Αγαλματίδιο. Πηγή: "Macro shot of Stainless Steel 3D print from 3D scan." by Shapeways: is licensed under CC BY-NC-ND 2.0

Τιτάνιο – Titanium

Ελαφρύ, εξαιρετικά ανθεκτικό τόσο στην θερμότητα όσο και στην φθορά, αρκετά ελαστικό, σχεδόν μη-τοξικό, ανοξείδωτο και με αρκετά γρήγορη ταχύτητα εκτύπωσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν το τιτάνιο πολύ χρήσιμο και περιζήτητο στην βιομηχανική DMLS εκτύπωση. Το τιτάνιο ως υλικό χρησιμοποιείται συχνά στην αυτοκινητοβιομηχανία για κάποια εξαρτήματα που χρειάζονται αντοχές και πολύ μικρό βάρος, αλλά η χρήση τους γίνεται ακόμη πιο συχνά στην αεροναυπηγική, καθώς τα αεροσκάφη χρειάζονται υλικά ελαφριά, μεγάλων θερμικών, μηχανικών αντοχών και αντοχών στην διάβρωση. Επομένως το τιτάνιο είναι βέλτιστο υλικό για την κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων στον τομέα της αεροναυπηγικής. Ακόμη, χρησιμοποιείται στην κατασκευή εξαρτημάτων στρατιωτικού εξοπλισμού, καθώς είναι αναγκαία η μεγάλη αντοχή στην φθορά και την διάβρωση, εξαιτίας των αντίξωων συνθηκών στις οποίες θα βρεθεί. Τέλος, όντας βιοσυμβατό και με πάρα πολύ χαμηλή τοξικότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ιατρική, για την κατασκευή κρανιακών πλακών, βιδών και λαμών, καθώς και χειρουργικών εργαλείων που θα έρθουν σε επαφή με τον ανθρώπινο οργανισμό. (sculpteo.com, proto300.com)



Εκτυπωμένο χερούλι ποδήλατου από τιτάνιο. Πηγή: "3D printed titanium bike part from @chargebikes, a rear dropout, amazingly light and strong" by GavinBell is licensed under CC BY-NC-ND 2.0

Αλουμίνιο – Aluminium

Το αλουμίνιο είναι ένα αρκετά εύκαμπτο και μαλακό μέταλλο το οποίο χρησιμοποιείται στην εκτύπωση DMLS για την κατασκευή πρωτοτύπων τα οποία χρειάζονται εκτενή επεξεργασία με μηχανήματα. Η μαλακή δομή του καθιστά αρκετά εύκολη την επεξεργασία του με εργαλεία και η έλλειψη ευθρυπτότητας του και η ελαστικότητά του το κρατάει ακέραιο σε περιπτώσεις που οι πιέσεις από τα εργαλεία είναι αυξημένες. Γενικά το αλουμίνιο είναι κατάλληλο μόνο για την κατασκευή εξαρτημάτων που δεν χρειάζονται αυξημένες αντοχές. Ενώ είναι ελαφρύ, οι μηχανικές του αντιστάσεις δεν είναι καλές σε σύγκριση με το ατσάλι και το τιτάνιο και δεν είναι χρήσιμο σε εκτυπώσεις με λεπτά τοιχώματα όσον αφορά την εκτύπωση DMLS. Το αλουμίνιο τυπώνεται αρκετά γρήγορα, ακόμη, παράγει αρκετά λεπτομερή αποτελέσματα και η χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης του συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του φαινομένου της εξάπλωσης της θερμότητας (Thermal Bleed). Επιπλέον είναι μη-τοξικό και αρκετά ανθεκτικό στην οξείδωση και την διάβρωση οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία αντικειμένων που προορίζονται για την βιομηχανία τροφίμων. (beamler.com)

Κράμα Κοβαλτίου, Χρωμίου και Μολυβδενίου - Cobalt Chrome

Το κράμα αυτό έχει παρόμοιες αντοχές και εφαρμογές όπως το τιτάνιο. Ενώ δεν είναι τόσο ελαφρύ και τόσο ανθεκτικό, είναι μη τοξικό και κατάλληλο για χρήση στον τομέα της ιατρικής, όπως για σιδεράκια και σφραγίσματα οδοντιατρικής. Το κράμα δεν οξειδώνεται και είναι αρκετά μαλακό για να επεξεργάζεται με ευκολία. Ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία πρωτοτύπων, ειδικά στον τομέα της αεροναυπηγικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας, σε εξαρτήματα που χρειάζονται υψηλή αντοχή στην θερμοκρασία, είναι πιο χρήσιμο για την εκτύπωση κατά παραγγελία ιατρικών εμφυτευμάτων όπως τα προαναφερόμενα σιδεράκια, βίδες και λάμες στήριξης. Με αυτό τον τρόπο δεν γίνεται σπατάλη υλικού, καθώς τα αντικείμενα αυτά κατασκευάζονται μόνο όταν υπάρχει ανάγκη και βάση των αναγκών των ασθενών, επομένως ο κάθε ασθενής λαμβάνει τα κατάλληλα εμφυτεύματα σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κατάστασής του οποιαδήποτε στιγμή προκύψει ανάγκη. (sculpteo.com)

Κράμα Νικελίου – Nickel Alloy

Τα κράματα Νικελίου είναι ένα από τα δυσκολότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Είναι υψηλής ποιότητας με πολλές επιθυμητές ιδιότητες όπως είναι η μεγάλη αντοχή στην οξείδωση, εξαιρετικές μηχανικές αντοχές και μεγάλες αντιστάσεις και στις υψηλές θερμοκρασίες. Ανάλογα με τις προσμίξεις που υπάρχουν μαζί με το Νικέλιο, τα κράματα μπορούν να αποκτήσουν ενισχυμένα χαρακτηριστικά όπως η υψηλή θερμική αντοχή του Nickel Alloy K500, που το καθιστά κατάλληλο για χρήση στην κατασκευή εξαρτημάτων πυραύλων υγρών καυσίμων. Τα διάφορα κράματα μπορεί να περιέχουν άνθρακα, σιλικόνη, χρώμιο, φώσφορο, χαλκό, σίδηρο και πολλά ακόμη στοιχεία σε συνδυασμό με ένα κύριο μέρος νικελίου. Όλες οι επιθυμητές ιδιότητες, η κατασκευή και τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτή καθιστούν τα κράματα Νικελίου αρκετά δαπανηρά και απαγορευτικά για μικρότερες επιχειρήσεις. Ακόμη, η πολύ υψηλή θερμοκρασία τήξης τους καθιστά τις περισσότερες μηχανές ανίκανες να τα συντήξουν. Είναι δύσκολο αρκετές φορές ακόμη και για τις μεγαλύτερες μηχανές DMLS να το εκτυπώσουν, ενώ η μέθοδος EBM αποδεικνύεται πιο κατάλληλη, καθώς οι περισσότερες μηχανές EBM διαθέτουν ακτίνες υπερπολλαπλάσιας ισχύος από την μέση ακτίνα λέιζερ των μηχανημάτων DMLS. Για παράδειγμα, ένα μηχάνημα Arcam EBM Spectra L έχει ακτίνα ισχύος 4.5 kW ενώ ένας μέσος εκτυπωτής DMLS όπως η σειρά DMP της εταιρείας 3d systems κυμαίνεται στα 100 με 500 watt. Προφανώς τέτοια εξειδικευμένα μηχανήματα EBM είναι αρκετά δαπανηρά τόσο στην τιμή αγοράς τους όσο και στην συντήρηση και κατανάλωση ρεύματός τους. (stratasysdirect.com)

Πολύτιμα Μέταλλα – Precious metals.

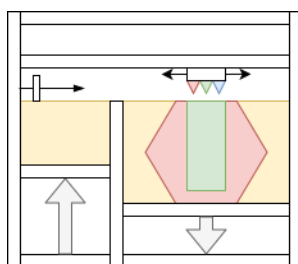
Η μέθοδος MDLS είναι αρκετά ευέλικτη στην γκάμα των υλικών που μπορεί να εκτυπώσει. Εξαιτίας των χαμηλών σημείων τήξης τους, είναι ιδανική στην εκτύπωση διάφορων πολύτιμων μετάλλων όπως το χρυσάφι, ο άργυρος και ο λευκόχρυσος. Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την δημιουργία πρωτοτύπων για να δοκιμαστούν σχέδια για κοσμήματα ή για την περιορισμένη μαζική παραγωγή τους. Πέρα από κοσμηματοπώλες, οι καλλιτέχνες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτά τα μέταλλα για να δημιουργήσουν μοναδικά κοσμήματα και να τα εκτυπώσουν αμέσως. Στην κατάσταση που βρίσκεται τώρα η τεχνολογία, είναι υπερβολικά ακριβή για να τεθεί σε μαζική παραγωγή, αλλά είναι δυνατή η παραγωγή προσωποποιημένων κοσμημάτων περιορισμένης παραγωγής. Η μέθοδος της εκτύπωσης μπορεί να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση σπατάλης υλικού, σε σχέση με άλλες μεθόδους κατασκευής όπως η έκχυση σε καλούπια. Η μέθοδος DMLS συμβάλλει στην διατήρηση του υλικού, καθώς η ακτίνα που χρησιμοποιεί είναι ακριβής και δεν λιώνει πολύ περισσότερο υλικό από ότι χρειάζεται. Επιπλέον, η έλλειψη ανάγκης για στηρίγματα καθιστά την μέθοδο πιο κατάλληλη από άλλες. (Joris Peels 2018)

MATERIAL JETTING KAI DROP ON DEMAND –ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΚΑΤ’ ΑΠΑΙΤΗΣΗ

Αυτές οι πολύ παρόμοιες μέθοδοι χαρακτηρίζονται πολύ συχνά ως οι ταχύτερες και πιο ακριβείς μέθοδοι προσθετικής παραγωγής. Λειτουργούν χρησιμοποιώντας, όπως και η μέθοδος SLA, φωτοπολυμερή σε υγρή μορφή, τα οποία ψεκάζονται, ως μικροσταγονίδια, συνεχώς ή με την μέθοδο “drop on demand” (DOD) και στην συνέχεια πολυμερίζονται με μία δέσμη φωτός. Στην συνεχή μέθοδο, υλικό ψεκάζεται συνεχώς και το περίσσιο συλλέγεται και τοποθετείται στην μηχανή, ενώ στην μέθοδο DOD υλικό ψεκάζεται μόνο στα σημεία που θα εκτυπωθεί. Επιπλέον, οι μέθοδοι αρκετά συχνά συνδέονται με την παραδοσιακή εκτυπωτική μέθοδο inkjet, η οποία λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο. Τα πολυμερή που τυπώνει η μέθοδος είναι κυρίως διάφορες ρητίνες, οι οποίες θερμαίνονται, όπως και στην SLA, περίπου στους 30 με 60 °C και έπειτα ψεκάζεται και πολυμερίζεται σχεδόν άμεσα από μία δέσμη υπεριώδους φωτός η οποία προβάλλεται από λαμπτήρες συνήθως στην εκτυπωτική κεφαλή. Η μέθοδος μπορεί να εκτυπώσει περίπου τα ίδια υλικά με την SLA, που σημαίνει ότι κυρίως μπορεί να εκτυπώσει ρητίνες που, ενώ υπάρχουν πολλοί τύποι και χρώματα, είναι σχετικά εύθρυπτα, σαν υλικά. Επομένως, ενώ θα είναι πολύ λεπτομερή, με ακριβείς διαστάσεις και ομαλή επιφάνεια, δεν θα είναι πολύ ανθεκτικά. Επιπλέον, ενώ έχει σε λιγότερο βαθμό αυτό το πρόβλημα σε σχέση με την SLA και την DLP, σπαταλιέται αρκετό υλικό κατά την εκτυπωτική διαδικασία, καθώς εκτίθεται στο φως και πολυμερίζεται μερικώς. Τα αποτελέσματα που παράγει η διαδικασία στην ταχύτητα που τα παράγει όμως προκαλούν ένα μειονέκτημα για του καταναλωτές. Το κόστος, τόσο των υλικών, όσο και των μηχανών binder jetting είναι αρκετά υψηλό, σε βαθμό που κυρίως μόνο εταιρείες μπορούν να αποκτήσουν μηχανήματα αυτού του είδους. Η μέθοδος μπορεί να βρει χρήση σε πολλούς τομείς. Για τον τομέα της ιατρικής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ακριβή εκτύπωση πολύ λεπτομερών μοντέλων οργάνων, ενώ αρχιτέκτονες και μηχανικοί μπορούν να εκτυπώσουν μακέτες και λειτουργικά μοντέλα εξαρτημάτων. (Loughborough University, Material Jetting) (Robert Abbel and Erwin R. Meinders 2017)

ΥΛΙΚΑ MATERIAL JETTING

Οι μέθοδοι SLA (στερεολιθογραφίας) και Material Jetting έχουν τα περισσότερα υλικά τους κοινά, καθώς και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν φωτοπολυμερικές ρητίνες. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιήσει συμβατική ρητίνη, ρητίνη χύτευσης, διάφορες διάφανες ρητίνες και ρητίνες υψηλής αντοχής. Εξαιτίας των στομιών που χρησιμοποιούνται στις εκτυπωτικές μηχανές της μεθόδου, πολλές ρητίνες που περιέχουν ρινίσματα μετάλλων και κεραμικές ρητίνες δεν ενδείκνυνται για χρήση.



Διάγραμμα Material Jetting. Πηγή: Wikimedia Commons

BINDER JETTING – ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην εκτόξευση κόλλας και άλλων συνδετικών χημικών για την παραγωγή τρισδιάστατων μορφών παρόμοια με την μέθοδο SLS, μόνο που αντί για λέιζερ που χτυπάει και θερμοσυσσωματώνει στρώματα σκόνης υλικού, γίνεται το ίδιο με κόλλα, η οποία εκτοξεύεται παρόμοια με την μέθοδο inkjet. Η μέθοδος μπορεί να εκτυπώσει πλαστικά και μέταλλα, είναι αρκετά οικονομική σαν μέθοδος, με αρκετά μηχανήματα διαθέσιμα στην καταναλωτική αγορά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο είναι αρκετά οικονομικά, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φθηνών μεταλλικών εξαρτημάτων και λειτουργικών πρωτοτύπων. Μπορεί να εκτυπώσει ανοξείδωτο ατσάλι, κανονικό ατσάλι, μπρούτζο, χρωματισμένη άμμο και άμμο πυριτίου, κεραμικά υλικά όπως το καρβίδιο του πυριτίου και διάφορα κράματα όπως Inconel και καρβίδιο του βολφραμίου. Γενικά είναι μία αρκετά φθηνή εναλλακτική μέθοδος της SLS και ενώ δεν παράγει τόσο λεπτομερή εξαρτήματα, το χαμηλό κόστος της την καθιστά ελκυστική για μικρότερες εταιρείες και ιδιώτες. Ενώ έχει κάποια γκάμα υλικών, δεν είναι τόσο ευέλικτη όσο άλλες μέθοδοι και ενώ δεν πάσχει από το φαινόμενο της παραμόρφωσης (warping) επειδή δεν εμπλέκεται η θερμότητα στην διαδικασία, τα εξαρτήματα που παράγει είναι αρκετά εύθρυπτα, σπάνε εύκολα και δεν είναι κατάλληλα για πολλές μετεκτυπωτικές διαδικασίες και επεξεργασία με εργαλεία. Ακόμη, τα περισσότερα εκτυπωμένα αντικείμενα απαιτούν συγκεκριμένες μετεκτυπωτικές εργασίες για να είναι λειτουργικά, όπως για παράδειγμα τα μεταλλικά αντικείμενα χρειάζονται θερμοσυσσωμάτωση. (Santosh Kumar Parupelli, Salil S Desai 2019, Loughborough University).

ΥΛΙΚΑ BINDER JETTING

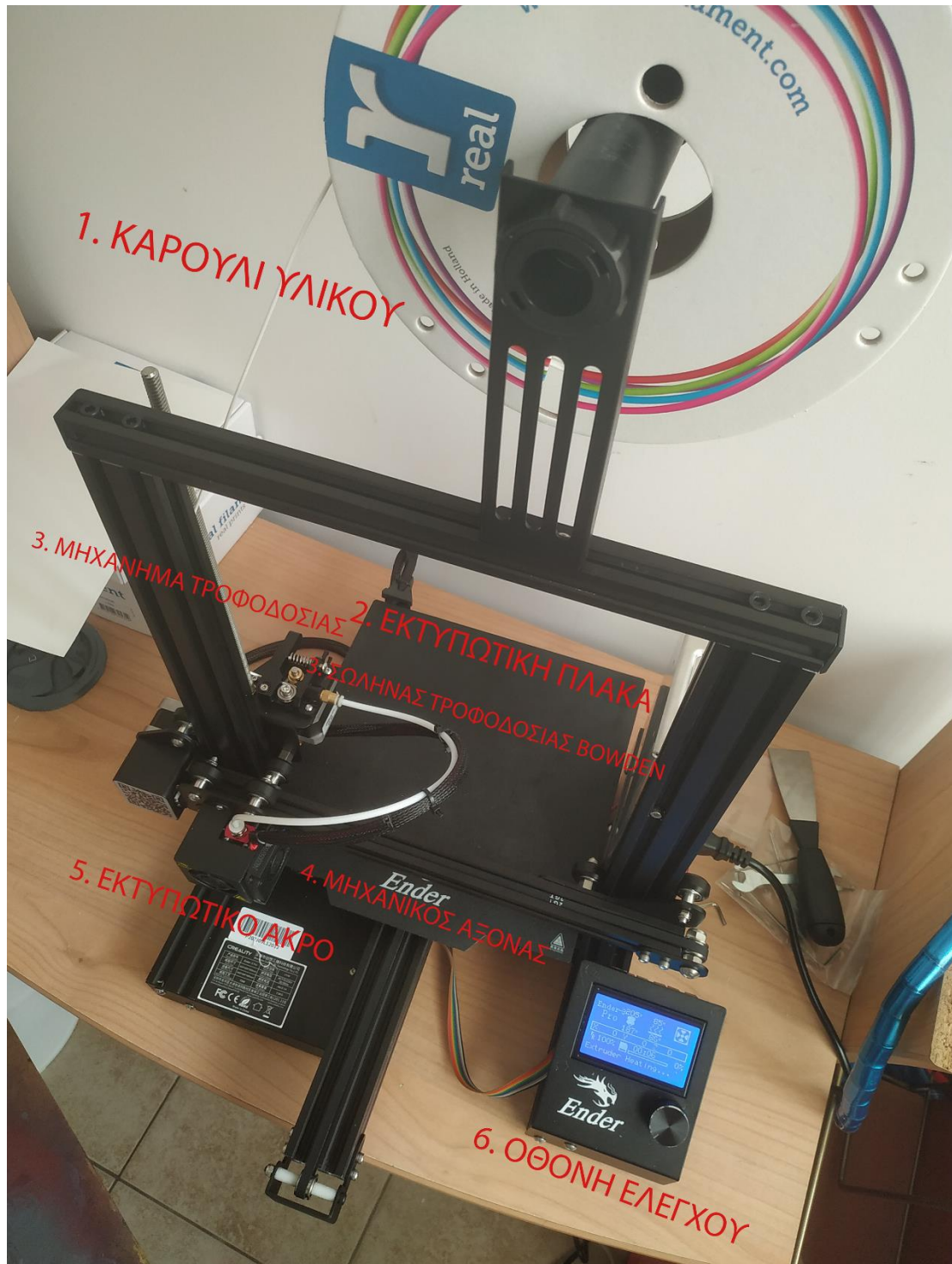
Η μέθοδος χρησιμοποιεί πολλές διαφορετικές σκόνης οι οποίες συντίθενται με συνδετικό υλικό. Αυτές οι σκόνης μπορούν να είναι απλή πυριτική άμμος ή μέταλλα όπως ο μπρούτζος, ο σίδηρος και το ατσάλι που έχουν ήδη καλυφθεί σε νωρίτερα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – Πειραματικό Μέρος

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας αναλύονται οι διαδικασίες και τα πειράματα που οδήγησαν στον σχεδιασμό και την τελική κατασκευή του επιτραπέζιου παιχνιδιού. Ο αρχικός στόχος του πειράματος ήταν η δημιουργία ενός απλού “casual” παιχνιδιού με ταμπλό, πόνια και διακοσμήσεις, απλό σύστημα, για να μαθαίνεται γρήγορα, μικρό χρόνο στησίματος και περίπου 45 λεπτά με μία ώρα διάρκεια παιχνιδιού. Η διαδικασία επιλογής των χαρακτηριστικών και του θέματος θα αναλυθεί εκτενώς στο τρίτο μέρος της εργασίας. Μέχρι τότε, απλά για να υπάρχει σημείο αναφοράς, σημειώνεται πως το θέμα και τα αισθητικά χαρακτηριστικά του επιτραπέζιου είναι συνδυασμός μετα-αποκαλυπτικών στοιχείων όπως αυτά που απαντώνται σε αρκετές δημοφιλείς ταινίες της δεκαετίας του ‘80 και του κλασσικού παραμυθιού «Τα τρία Γουρουνάκια».

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για να εκτυπωθούν τα εξαρτήματα του επιτραπέζιου, μετά από την έρευνα που έγινε είναι η FDM (Fused Deposition Modeling), κυρίως λόγω των μικρών δαπανών που απαιτεί, το υλικό που επιλέχθηκε είναι το πολυγαλακτικό οξύ, λόγω της ευκολίας της εκτύπωσής του, του μικρού κόστους του και της μη-τοξικότητάς του, ενώ το μηχάνημα που επιλέχθηκε ήταν το Ender-3 Pro, διότι συνδυάζει χαμηλή τιμή, με μικρή δαπάνη και εξαιρετικά αποτελέσματα. Ενώ, λόγω των πολύ λεπτομερών αποτελεσμάτων της, ήταν αρκετά καλή υποψήφια η μέθοδος SLA, απορρίφθηκε λόγω των διαφόρων –πιθανά επιβλαβών- χημικών που χρησιμοποιούνται σε αυτή και θα έπρεπε αναγκαστικά να εισαχθούν σε περιβάλλον σπιτιού, εξ’ αιτίας της πανδημίας της ασθένειας Covid-19 εν έτη 2020-2021.

Οργανολογία



Η Εκτυπωτική μηχανή Creality Ender- 3 Pro

1. Καρούλι Υλικού

Το καρούλι που κρατάει το υλικό ώστε να τροφοδοτείται το μηχάνημα.

2. Εκτυπωτική Πλάκα ή Πλάκα κατασκευής (άξονας y'y εκτύπωσης)

Η πλάκα στην οποία κατασκευάζεται το μοντέλο. Η βασική πλάκα εκτύπωσης που υπήρχε στην συσκευασία είχε μαγνητισμένη επιφάνεια και διατηρούταν σταθερή με αυτό τον μηχανισμό. Η πλάκα ρυθμίζεται και ισοπεδώνεται με έναν μηχανισμό ελασμάτων στις τέσσερις γωνίες της που συμπιέζονται ή ελευθερώνονται από χειροκίνητους μοχλούς για να μετακινήσουν στον άξονα y'y την εκάστοτε γωνία. Η πλάκα κατά την διάρκεια της εκτύπωσης θερμαίνεται και μπορεί να μετακινηθεί στον άξονα y'y.

3. Σωλήνας Τροφοδοσίας Bowden

Ο σωλήνας τροφοδοσίας Bowden υπάρχει για να τροφοδοτεί το άκρο της εκτύπωσης με το υλικό του καρουλιού. Είναι φτιαγμένος από PTFE (polytetrafluoroethylene, Πολυτετραφθοροαιθυλένιο), το οποίο είναι ένα αρκετά ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες και εύκαμπτο πλαστικό. Αυτές οι ιδιότητες είναι επιθυμητές διότι ο σωλήνας, κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, έρχεται σε άμεση επαφή με το υπερθερμασμένο άκρο που τυπώνει το υλικό.

4. Μηχανικός άξονας x'x εκτύπωσης

Ο μηχανικός άξονας της μηχανής είναι ο άξονας στον οποίο εφάπτεται το θερμαινόμενο άκρο της εκτύπωσης. Το άκρο κινείται στον άξονα x'x με την βοήθεια γραναζιών που τραβούν και σπρώχνουν μία οδοντωτή ταινία στην οποία είναι πιασμένο το εκτυπωτικό άκρο.

5. Εκτυπωτικό άκρο

Το θερμαινόμενο εκτυπωτικό άκρο στο οποίο τροφοδοτείται το υλικό. Ο σκοπός του είναι να λιώνει το υλικό και να το εναποθέτει στην πλάκα κατασκευής. Διαθέτει σύστημα ψύξης με ανεμιστήρα και μπορεί να κινηθεί και στον άξονα x'x και στον άξονα z'z.

6. Οθόνη Ελέγχου

Η οθόνη που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της μηχανής και της εκτυπωτικής διαδικασίας.



Τα εργαλεία

Στην εικόνα «Τα εργαλεία» απεικονίζεται πρώτα ο κόφτης που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των στηριγμάτων και των «γείσων» των εκτυπωμένων αντικειμένων (κατασκευή the Army Painter) και από κάτω η σπάτουλα που χρησιμοποιείται στην απομάκρυνση των αντικειμένων από την πλάκα κατασκευής (κατασκευής Creality).

1ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση βήμα προς βήμα ψηφιακού μοντέλου ανθρωπόμορφου γουρουνιού ως πόνι επιτραπέζιου παιχνιδιού με την μέθοδο FDM.

Όργανα: Creality Ender-3 Pro, Προσωπικός Υπολογιστής.

Προγράμματα: Ultimaker Cura

Υλικά: Λευκό Πολυγαλακτικό Οξύ (Real Filament).

Συνθήκες Λειτουργίας: Θερμοκρασία δωματίου: 17 °C, εξαερισμός – ανοιχτό παράθυρο.

Χρόνος Εκτύπωσης: 1 ώρα και 42 λεπτά το πρώτο, 2 ώρες και 21 λεπτά τα υπόλοιπα.

Διαδικασία: Το πρώτο βήμα της εκτυπωτικής διαδικασίας, εφόσον έχει γίνει η προμήθεια ενός εκτυπωτή FDM και αρκετής πρώτης ύλης, είναι η εύρεση ή δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου (3D Model ή Sculpt) που θα εκτυπωθεί. Για την συγκεκριμένη διαδικασία/παράδειγμα, χρησιμοποιείται ο εκτυπωτής Ender-3 Pro της Creality, του οποίου έγινε η προμήθεια για την εκπόνηση της εργασίας.

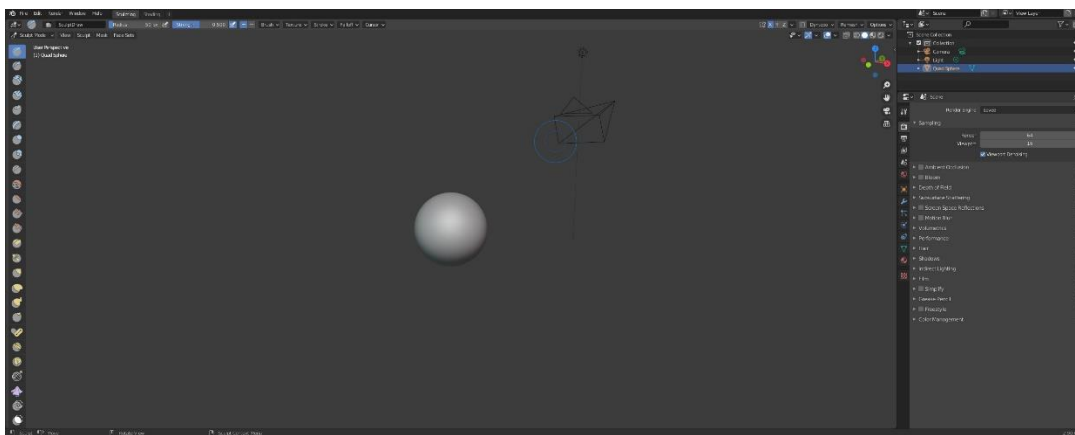
Η δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικειμένου προς εκτύπωση πολλές φορές ονομάζεται *sculpting*, δηλαδή ψηφιακή γλυπτική, αν αφορά αντικείμενα αποκλειστικά προορισμένα για εκτύπωση ή 3D Modeling, αν αφορά γενικά την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κινούμενα σχέδια, βιντεοπαιχνίδια, γραφιστική κ.ο.κ.. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων. Ένας τρόπος είναι η κατασκευή σε φυσική αναπαράσταση του μοντέλου με παραδοσιακή γλυπτική και κατασκευές και κατόπιν η ψηφιοποίηση του με την χρήση κάποιας συσκευής τρισδιάστατης σάρωσης η οποία συλλέγει τα δεδομένα του αντικειμένου και τα ψηφιοποιεί δημιουργώντας μία ακριβή ψηφιακή αναπαράστασή του στον υπολογιστή. Η τρισδιάστατη σάρωση είναι επίσης ένας καλός τρόπος να διατηρήσουμε έργα τέχνης όπως αγάλματα, γλυπτά, πίνακες ή ακόμα και κτήρια σε ψηφιακή μορφή ώστε να μπορούν να ανακατασκευαστούν, επισκευαστούν και διασωθούν και για τις επόμενες γενεές.



Σάρωση και ψηφιοποίηση αγάλματος Πηγή: "The Fuel3D handheld 3D scanner!" by Creative Tools is licensed under CC BY 2.0

Η τρισδιάστατη σάρωση όμως, δεν είναι ο μοναδικός τρόπος για την δημιουργία ψηφιακών γλυπτών και μοντέλων προς εκτύπωση. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να δημιουργηθούν και εξ ολοκλήρου στον υπολογιστή με την χρήση ειδικών προγραμμάτων CAD (Computer Aided Design) τρισδιάστατου σχεδιασμού. Δημοφιλή παραδείγματα είναι το Zbrush και το Blender.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Blender διότι δεν έχει κάποιο κόστος, παρέχεται δωρεάν στο κοινό. Για τους σκοπούς της εργασίας, γενικά, τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν εξ ολοκλήρου χωρίς προηγούμενη βάση σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας την “sculpting” λειτουργία του προγράμματος Blender καθώς και τα εργαλεία που παρείχε στην αρχική του μορφή το πρόγραμμα.



Καρτέλα "Sculpting" στο πρόγραμμα CAD "Blender" Πηγή: Blender

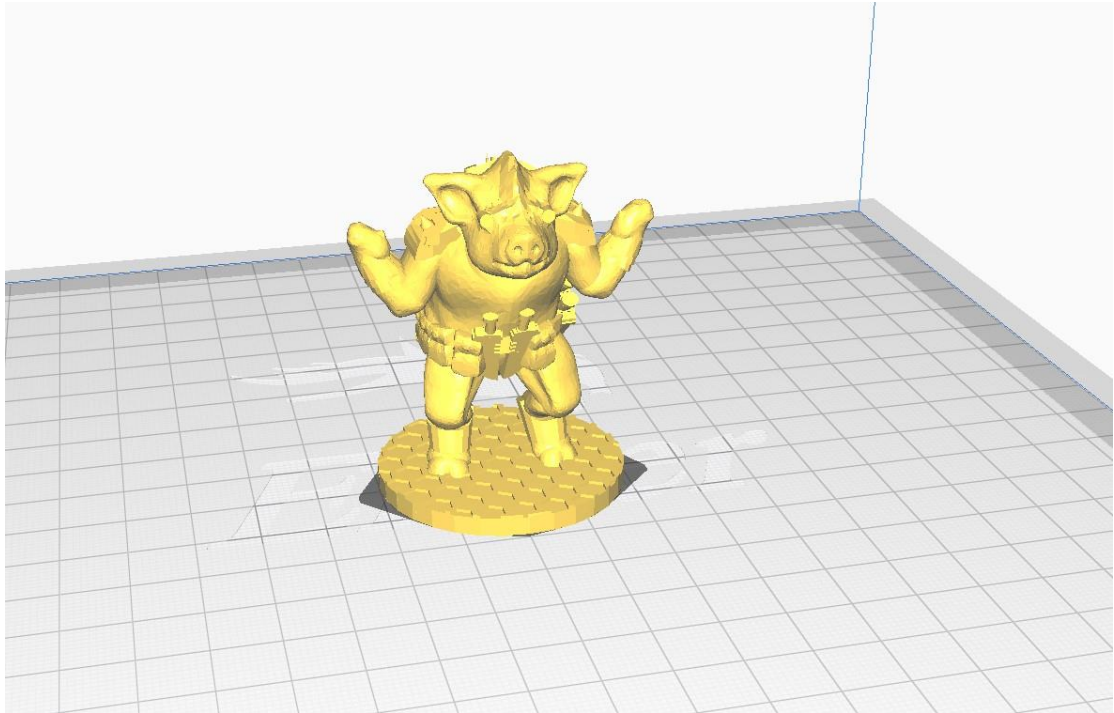
Η καρτέλα του προγράμματος Blender για ψηφιακή γλυπτική- Ενώ είναι πιο περιορισμένη σε εργαλεία από την καρτέλα για τον γενικό σχεδιασμό τρισδιάστατων μοντέλων, είναι αρκετά πιο προσηλωμένη στην δημιουργία αντικειμένων προς εκτύπωση, παραλείποντας εργαλεία άχρηστα για την εκτύπωση, όπως vectors, animations κ.α. ώστε να προσφέρει μία πιο φιλική προς τον χρήστη επιφάνεια εργασίας, η οποία καταλήγει να είναι πιο εύχρηστη και προσιτή, ειδικά για νέους χρήστες οι οποίοι πιθανά να μην έχουν επαφή με ψηφιακό σχεδιασμό τρισδιάστατων μοντέλων ή γενικά προγράμματα CAD. Στην προηγούμενη εικόνα, παρατηρούνται τα μενού των διαφόρων εργαλείων και “brushes”, που χρησιμοποιούνται για επεμβάσεις στον ψηφιακό «πηλό» στα δεξιά, καθώς και οι επεξηγήσεις τους πάνω αριστερά και το μενού “texture” στο κάτω αριστερό μέρος της οθόνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδώσει «υφή» στον ψηφιακό πηλό.

Η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων δεν είναι εύκολη διαδικασία. Χρειάζεται γνώσεις, εξειδίκευση, χρόνο και εμπειρία, αλλά υπάρχουν πολλοί ερασιτέχνες και επαγγελματίες που ασχολούνται και παρέχουν τα έργα τους στο κοινό δωρεάν και με άδειες Creative Commons. Για παράδειγμα ο δημιουργός Arian Croft, της εταιρείας "Ill Gotten Games" γνωστός στην κοινότητα του 3D Printing με το ψευδώνυμό του "dutchmogul", έδωσε την άδεια να τροποποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του "Emer Emerson, Pigman Pathfinder" για τους σκοπούς της εργασίας. Ο ίδιος έχει παρέχει πολλά από τα μοντέλα που έχει δημιουργήσει δωρεάν και ως κοινό κτήμα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη κερδοσκοπικά από οποιονδήποτε.

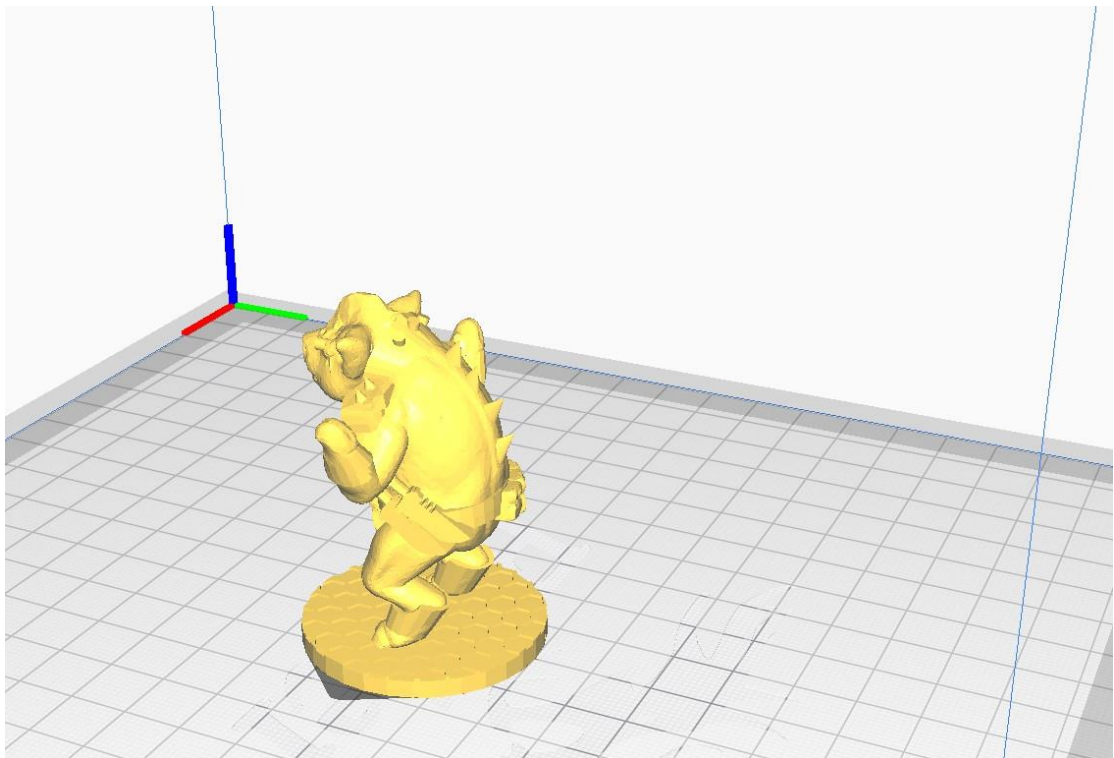


"Emer Emerson- Pigman Pathfinder" από τον καλλιτέχνη Arian Croft, Πηγή: thingiverse.com/thing:813721

Με την βοήθεια του Blender, τροποποιήθηκε το μοντέλο αυτό, προσθέτοντας και αφαιρώντας χαρακτηριστικά με τα εργαλεία clay strips, τα οποία προσθέτουν ψηφιακό πηλό στο μοντέλο με αρκετό βαθμό ρύθμισης, ώστε να δύναται οι χρήστες να προσαρμόσει τον βαθμό με τον οποίο το εργαλείο εναποθέτει «πηλό» στο μοντέλο και την διάμετρο της περιοχής την οποία επηρεάζει. Ακόμα, εισήχθησαν επιπλέον "shapes" όπως τα ονομάζει το πρόγραμμα και τροποποιήθηκαν για να αλλάξουν οπτικά την μορφή του μοντέλου προς το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Παραλλαγή του μοντέλου από την μπροστινή πλευρά στο πρόγραμμα Slicer Ultimaker Cura.



Παραλλαγή του μοντέλου από την πίσω πλευρά στο πρόγραμμα Slicer Ultimaker Cura.

Αφού εισαχθεί το μοντέλο στο πρόγραμμα slicer της Ultimaker, Cura, πρέπει να ρυθμιστούν οι επιλογές ώστε να τυπωθεί σωστά. Μετά από εκτενή έρευνα στο διαδίκτυο και συμβουλευόμενος πιο έμπειρους στην τρισδιάστατη εκτύπωση, αποφασίστηκε η ρύθμιση του ύψος του κάθε στρώματος (layer) στο 0.1 χιλιοστά κατά την διάρκεια της εκτύπωσης με πάχος γραμμών (Line Width) στα 0.4 χιλιοστά καθώς και 0.4 χιλιοστά σε όλες τις υπόλοιπες γραμμές καθώς και στους εξωτερικούς «τοιχούς» και στο «γείσο» (brim) της εκτύπωσης. Στην κατηγορία επιλογών κελύφους, (shell), επιλέχθηκε το πάχος των τοίχων κάθε κελύφους στα 1.2 χιλιοστά. Στο εσωτερικό γέμισμα (infill) επιλέχθηκε η πυκνότητα στο 35%, με σκοπό την εκτύπωση του μοντέλου με τρία διαφορετικά κέλυφη, χωρίς υπερβολική πυκνότητα ώστε να είναι αρκετά γερό και να διαθέτει αρκετή αντίσταση στην πρόσκρουση, αλλά χωρίς σπατάλη περίσσιου υλικού και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Όσον αφορά τις επιλογές υλικού (Material), αφού έγινε έρευνα και μελετήθηκαν βίντεο που χρησιμοποιούσαν τον ίδιο εκτυπωτή και πολυγαλακτικό οξύ (την σειρά στο YouTube Tomb of 3D Printed Horrors του Tom Tullis, ιδιοκτήτη της εταιρείας Fat Dragon Games και βετεράνο στην σκηνή του εκτυπωμένου επιτραπέζιου) και έγιναν πειράματα με αρκετές εκτυπώσεις δοκιμές, αποφασίστηκε η ρύθμιση στους 185 °C γενικά, στους 205 °C στο αρχικό στρώμα ώστε να διασφαλιστεί η προσκόλληση στην πλάκα κατασκευής.

Material		<
Printing Temperature	185	°C
Printing Temperature Initial Layer	205	°C
Initial Printing Temperature	185	°C
Final Printing Temperature	185	°C
Build Plate Temperature	80	°C
Build Plate Temperature Initial Layer	80	°C
Flow	92	%
Wall Flow	92	%
Outer Wall Flow	92	%
Inner Wall(s) Flow	92	%
Top/Bottom Flow	92	%
Top Surface Skin Flow	93	%
Infill Flow	93	%
Skirt/Brim Flow	100	%
Support Flow	92	%
Support Interface Flow	92	%
Support Roof Flow	92	%
Support Floor Flow	92	%
Prime Tower Flow	92	%
Initial Layer Flow	100	%

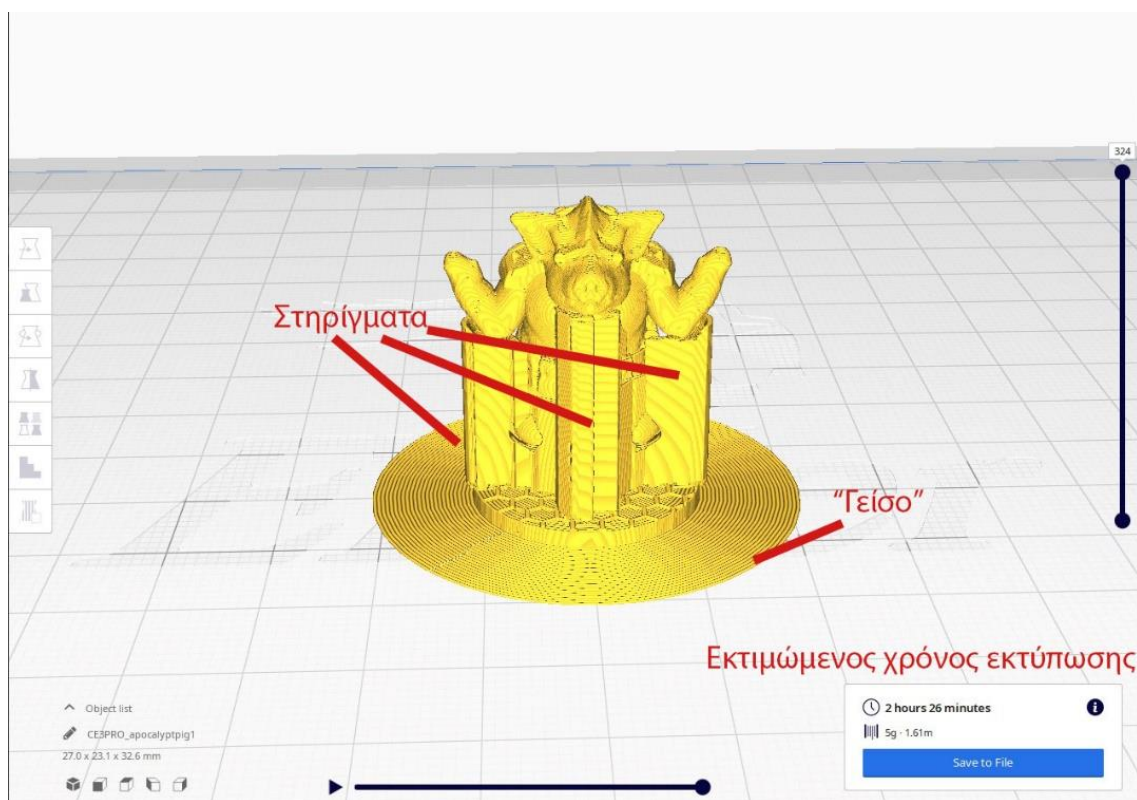
Επιλογές Υλικού στο πρόγραμμα Ultimaker Cura Πηγή: Ultimaker Cura

Επίσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.6.3, τέθηκε η θερμοκρασία της πλάκας κατασκευής στους 75 °C αλλά προέκυψε πως δεν είναι αρκετό και με ψύξη προκαλείται αλλοίωση στο αντικείμενο (warping, αναλύεται περαιτέρω σε παρακάτω κεφάλαιο). Οπότε η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 80 °C που φαίνεται να μην προκαλεί προβλήματα. Με αρκετές προηγούμενες δοκιμές και πειραματισμό επίσης, ρυθμίστηκε ο ρυθμός στον οποίο το στόμιο εκκρίνει υλικό στο 92%, έχοντας αποφασίσει πως σε αυτό το ποσοστό το υλικό που χρησιμοποιείται βγαίνει ικανοποιητικά χωρίς να δημιουργεί νήματα παραπανήσιου υλικού (stringing) και χωρίς βέβαια να αφήνει κενά. Στις ρυθμίσεις ταχύτητας, χρησιμοποιώντας τις βασικές του προγράμματος για τον εκτυπωτή που έχω προμηθευτεί και προχωρώντας με πειραματισμό, αποφασίστηκε η ταχύτητα στα 42 χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο, το οποίο είναι αρκετό, χωρίς όμως να δημιουργούνται προβλήματα και δεν είναι υπερβολικά αργό με αποτέλεσμα να θερμαίνει ξανά τα προηγούμενα στρώματα υλικού που τύπωσε δημιουργώντας το πρόβλημα της αλλοίωσης/παραμόρφωσης (warping).



Το φαινόμενο της παραμόρφωσης (Warping) σε εκτυπωμένο PLA.

Με τον ανεμιστήρα της μηχανής να δουλεύει στο 100%, ρυθμίστηκε η εκτύπωση ώστε να δημιουργήσει στηρίγματα τύπου “zig-zag” ώστε να στηριχθεί το μοντέλο στους αγκώνες του. Είναι σημαντικό, να υποστηρίζονται τμήματα των μοντέλων τα οποία κρέμονται στο κενό και έχουν μετέωρες γωνίες (Overhang Angles). Επιλέχθηκε ακόμη και να δημιουργηθεί υποστήριξη προσκόλλησης στην πλάκα κατασκευής τύπου γείσου (brim). Επιλέχθηκε η στήριξη τύπου γείσου έναντι σχεδίας (raft) διότι, μέσω πειραματισμού, ανακαλύφθηκε πως η υποστήριξη τύπου σχεδίας οδηγεί στην σπατάλη πολύ επιπλέον υλικού και μεγάλη αύξηση του χρόνου εκτύπωσης χωρίς ουσιαστική παραπάνω συνεισφορά στην προσκόλληση του αντικειμένου στην πλάκα σε σχέση με το γείσο.



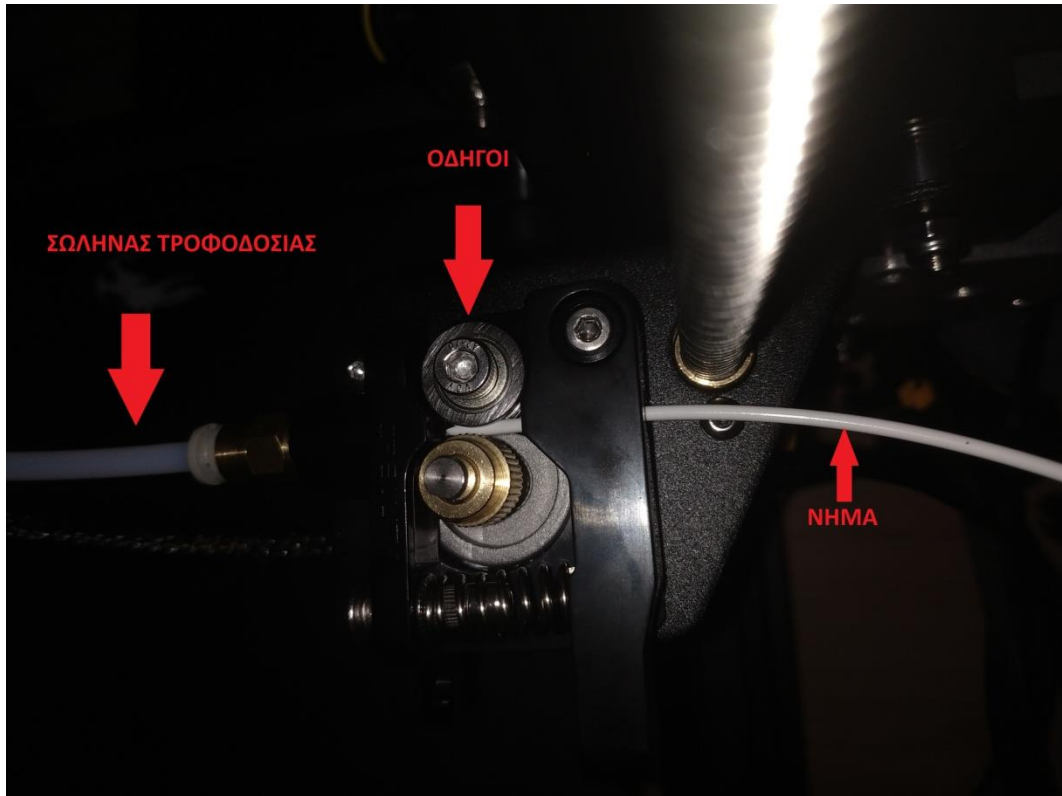
Καρτέλα "Review" στο πρόγραμμα Ultimaker Cura

Το επόμενο βήμα, είναι να εισαχθεί στην εκτυπωτική μηχανή νήμα υλικού. Για τους σκοπούς της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί πολυγαλακτικό οξύ κατασκευής Real Filaments. Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει για να εισαχθεί το καινούργιο νήμα είναι να κοπεί με αρκετά μεγάλη γωνία για να οδηγηθεί με επιτυχία στο σύστημα τροφοδοσίας. Συνήθως, μέσα στην συσκευασία του εκτυπωτή υπάρχει ειδικός πλάγιος κόφτης για αυτό τον σκοπό.



Κόψιμο του νήματος σε γωνία ώστε να διευκολυνθεί η εισαγωγή του στο σύστημα τροφοδοσίας, με τον κόφτη που συμπεριλαμβανόταν στην συσκευασία της μηχανής Creality Ender-3 Pro που χρησιμοποιείται στο πείραμα.

Αφού κοπεί το νήμα, εισάγεται στον σωλήνα τροφοδοσίας με την βοήθεια των οδηγών για να ξεκινήσει εκτύπωση. Είναι αναγκαία η προθέρμανση και ο καθαρισμός του στομίου πριν από την εισαγωγή του νέου υλικού ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα με την εκτύπωση. Μη επαρκής προθέρμανση μπορεί να οδηγήσει στο βούλωμα του στομίου, ειδικά εάν είχαν τυπωθεί προηγουμένως διαφορετικά υλικά με υψηλότερα σημεία τήξης και διαφορετικές ιδιότητες, το οποίο μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στην εκτυπωτική μηχανή. Αφού καθαριστεί το στόμιο με βελόνα και προθέρμανση, εισάγεται στο σύστημα τροφοδοσίας το νέο υλικό και ξεκινάει η διαδικασία της ευθυγράμμισης και ισοπέδωσης της πλάκας κατασκευής.



Εισαγωγή νήματος στο σύστημα τροφοδοσίας ενός Creality Ender-3 Pro.

Η ισοπέδωση της πλάκας κατασκευής σε διάφορα εκτυπωτικά συστήματα γίνεται αυτόματα, με εσωτερικά προγραμματισμένες εντολές και συστήματα αισθητήρων. Στα πιο οικονομικά καταναλωτικά μοντέλα όμως, η ισοπέδωση της πλάκας κατασκευής πρέπει να γίνει χειροκίνητα. Συγκεκριμένα, στον Ender-3 Pro γίνεται με την χρήση βαλβίδων, οι οποίες ελέγχουν την πίεση που ασκούν τέσσερα μεταλλικά ελάσματα στην πλάκα κατασκευής. Για την ρύθμιση της πλάκας, τοποθετείται απλή κόλλα A4 ανάμεσα στην πλάκα και στο στόμιο σε κάθε γωνία της πλάκας, στο σημείο που το κάθε έλασμα ασκεί πίεση. Η πίεση ρυθμίζεται μέχρι το στόμιο να ακουμπάει το φύλλο χαρτί, χωρίς όμως να ασκεί τόση πίεση ώστε να το κρατάει ακίνητο. Αφού οι βαλβίδες ρυθμίστηκαν με τον ίδιο τρόπο, η μηχανή είναι έτοιμη να ξεκινήσει η εκτύπωση.

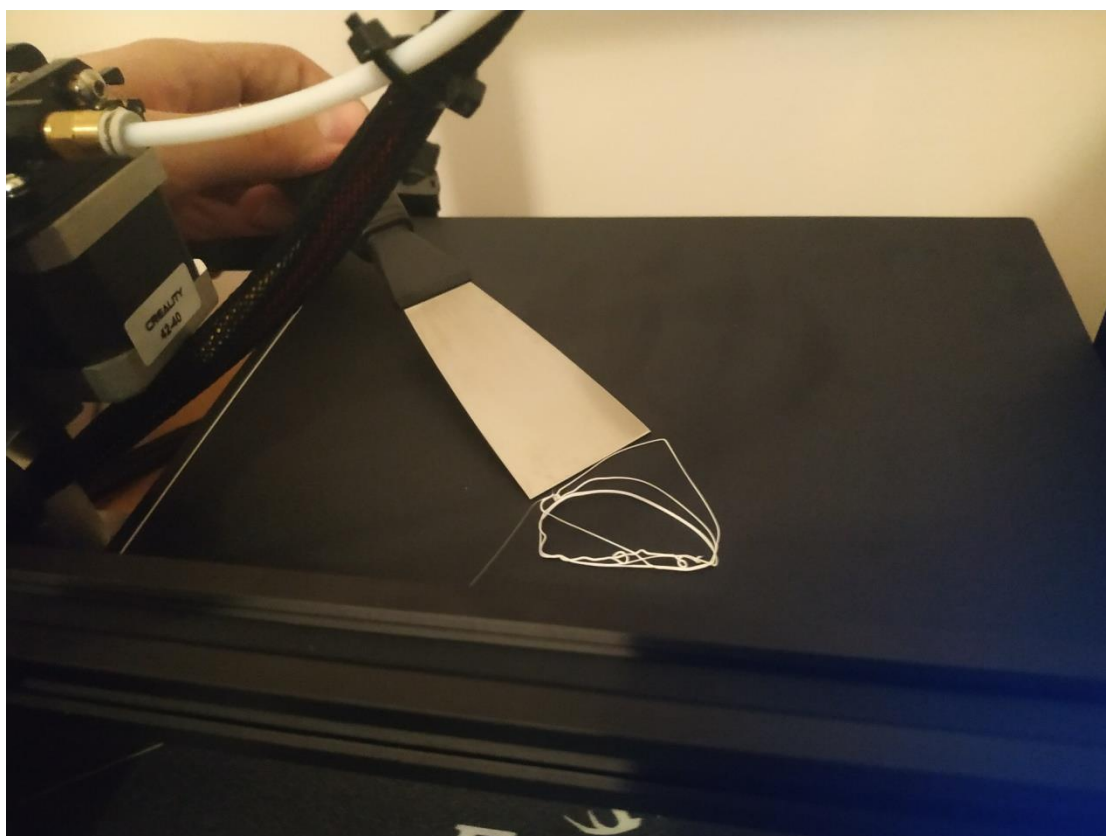


Ρύθμιση των βαλβίδων ώστε το επίπεδο χαρτί να ακουμπάει το στόμιο και την πλάκα κατασκευής χωρίς να ακινητοποιείται από την πίεση.



Ρύθμιση όλων των γωνιών της πλάκας κατασκευής.

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει για την εκκίνηση της εκτύπωσης, είναι εισαγωγή της κάρτας SD στην υποδοχή της μηχανής. Η κάρτα SD υπήρχε επίσης στην συσκευασία της μηχανής ώστε να μπορούν να μεταβιβαστούν αρχεία από οποιοδήποτε υπολογιστή στην μηχανή, οπότε, έχοντας ήδη αποθηκεύσει το, ρυθμισμένο από το Cura, μοντέλο, εισάγεται στην μηχανή προς εκτύπωση. Αφού εισαχθεί σωστά η κάρτα, από το μενού “Print from TF card”, επιλέγεται το επιθυμητό μοντέλο για να ξεκινήσει η εκτύπωση. Στην πρώτη προσπάθεια του πειράματος, δεν είχε γίνει σωστά η ισοπέδωση της πλάκας κατασκευής, επομένως η βάση και το brim του αντικειμένου ξεκόλλησαν κατά την εκτύπωση και αναγκαστικά το πείραμα διακόπηκε με την εντολή “Stop Print”.



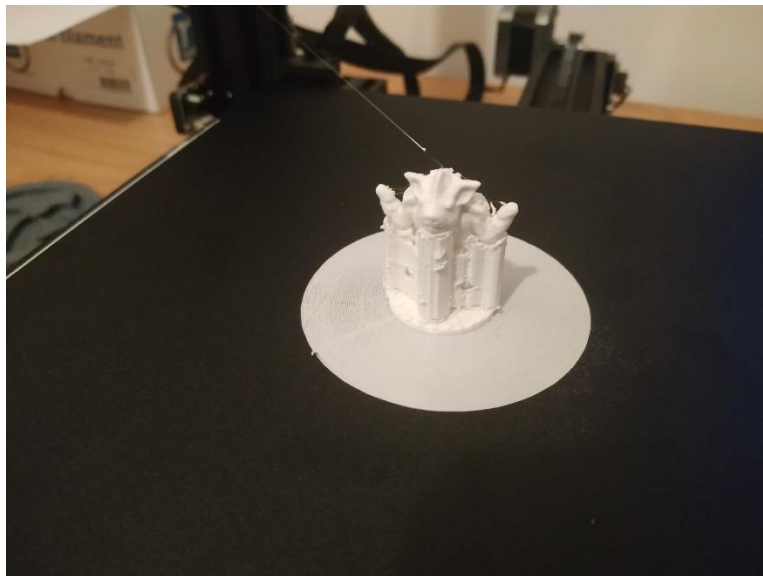
Απομάκρυνση του υλικού της εκτύπωσης με σπάτουλα.

Αφού επαναλήφθηκε η διαδικασία της ισοπέδωσης με τον σωστό τρόπο, έγινε επανεκκίνηση της εκτύπωσης, αυτή την φορά με επιτυχία. Αλληπάλληλοι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, κάθε δέκα λεπτά, με σκοπό την παρατήρηση της και την αποφυγή περεταίρω σφαλμάτων, χωρίς όμως να προκύπτει κάποιο πρόβλημα μέχρι και το τέλος της διαδικασίας.



Έλεγχος κατά την εκτύπωση για την αποφυγή σφαλμάτων.

Η εκτύπωση του αντικειμένου ολοκληρώθηκε με επιτυχία, αλλά αυτό δεν είναι το τελευταίο βήμα της διαδικασίας. Το επόμενο βήμα που ακολουθεί είναι η αφαίρεση του αντικειμένου από την πλάκα και η απομάκρυνση των στηριγμάτων και του γείσου της εκτύπωσης με κόφτη και το «καθάρισμα» του αντικειμένου, δηλαδή η απομάκρυνση επιπλέον υλικού το οποίο μπορεί να είναι προσκολλημένο στο μοντέλο. (Από stringing, στηρίγματα κτλ).



Το εκτυπωμένο μοντέλο στην πλάκα εκτύπωσης.



Η απομάκρυνση των στηριγμάτων οδήγησε στην θραύση των ποδιών του μοντέλου.

Λόγω της θέσης των στηριγμάτων αλλά και της πυκνότητας στην οποία εκτυπώθηκαν, η αφαίρεση τους ήταν δύσκολη και κατέληξε στην θραύση των ποδιών του μοντέλου. Αυτό αποδεικνύει την ευθραυστότητα του πολυγαλακτικού οξέος σε σχέση με άλλα βιομηχανικά πλαστικά και τον βαθμό στον οποίο πρέπει να εξασκείται προσοχή κατά τον χειρισμό του υλικού και της επέμβασης σε αυτό με εργαλεία. Ακολούθησε επισκευή του αντικείμενου χρησιμοποιώντας απλή κόλλα μοντελισμού (κυανοακρυλικός αιθυλεστέρας). Μετά την εφαρμογή της κόλλας, ακολούθησε απομάκρυνση περισευούμενου υλικού από το αντικείμενο και γενικός καθαρισμός. Ακολουθεί ψέκασμα με ακρυλικό σπρέι και βάψιμο.



Το εκτυπωμένο αντικείμενο, αφού απομακρύνθηκε το επιπλέον υλικό και επανακολλήθηκε.

Το επόμενο βήμα για την ολοκλήρωση των μετεκτυπωτικών εργασιών στο αντικείμενο είναι το ψέκασμα του με ακρυλικό σπρέι. Ενώ δεν είναι αναγκαία η εφαρμογή του σπρέι, με το ψέκασμα η επιφάνεια του αντικειμένου προετοιμάζεται για βάψιμο, και επιπλέον η βαφή εισέρχεται στα κενά και τις γωνίες του αντικειμένου, κρύβοντας τις γραμμές των στρωμάτων και κάνοντας το αντικείμενο να φαίνεται πιο «αυθεντικό», λειαίνοντας το. Για να μην χαθούν λεπτομέρειες, η τεχνική που εφαρμόστηκε είναι αλληπάλληλοι απότομοι ψεκασμοί μικρής διάρκειας, κυκλικά, ώστε να καλυφθεί το αντικείμενο από όλες τις πλευρές.

Μετά από τον ψεκασμό και το στέγνωμα του αντικειμένου (1-2 ώρες σε ξηρό μέρος με επαρκή εξαερισμό), ακολουθεί το βάψιμό του με ακρυλικά χρώματα κατασκευής “Vallejo” και “The Army Painter”. Με την ολοκλήρωση του βαψίματος, το αντικείμενο είναι έτοιμο για χρήση και το πείραμα ολοκληρώθηκε.

2ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου ανθρωπόμορφου λύκου ως πιόνι επιτραπέζιου παιχνιδιού.

Όργανα: Creality Ender-3 Pro, Προσωπικός Υπολογιστής.

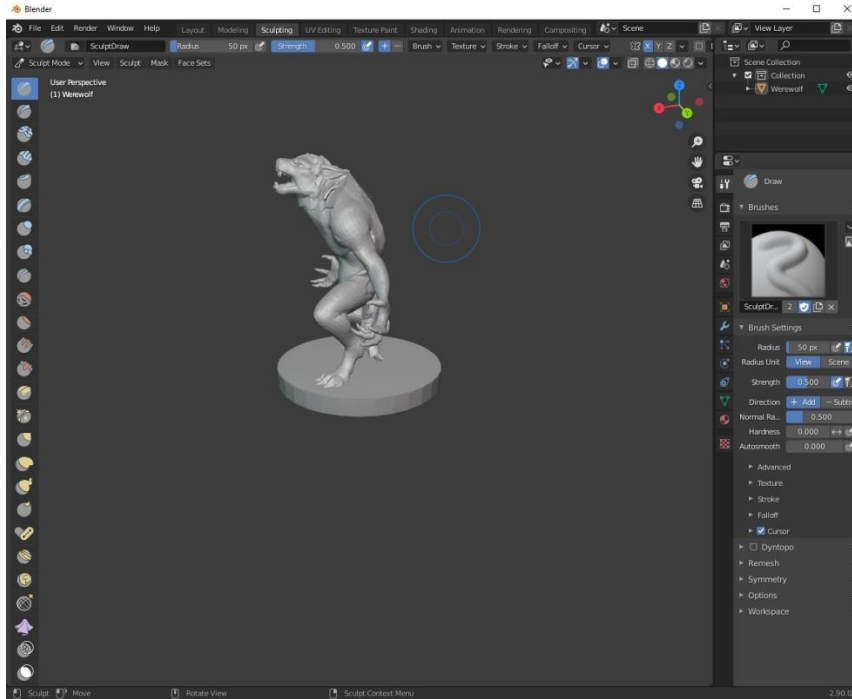
Προγράμματα: Ultimaker Cura

Υλικά: Λευκό Πολυγαλακτικό Οξύ (Real Filament).

Συνθήκες Λειτουργίας: Θερμοκρασία δωματίου: 14 °C, εξαερισμός – ανοιχτό παράθυρο.

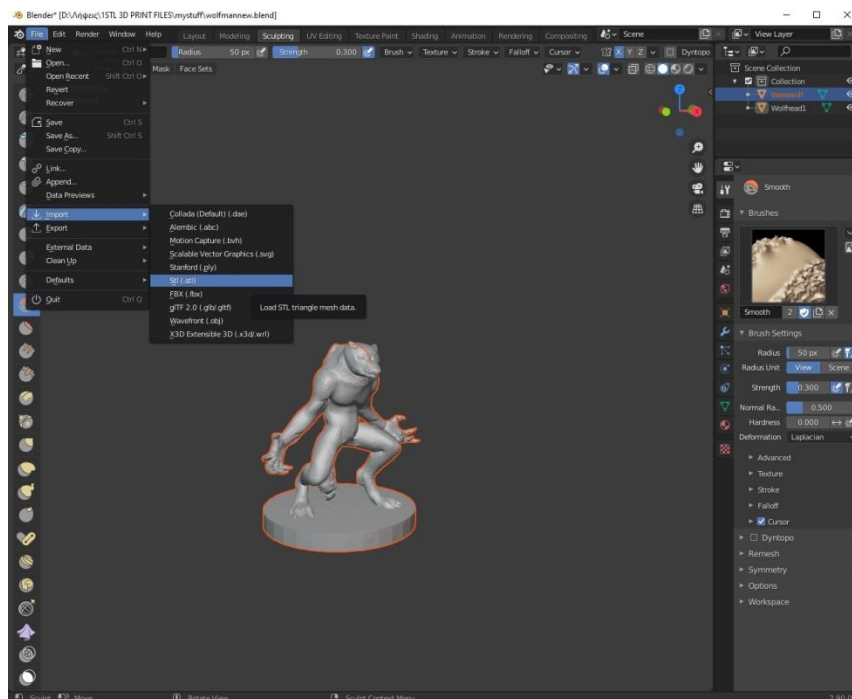
Χρόνος Εκτύπωσης: 2 ώρες και 8 λεπτά

Διαδικασία: Το πείραμα άρχισε με την προμήθεια ψηφιακού μοντέλου προς εκτύπωση από το διαδίκτυο. Για αυτό τον σκοπό έγινε εκτενής έρευνα και επιλέχθηκε να τροποποιηθεί ένα από τα μοντέλα της συλλογής “Lycanthropes” από τον δημιουργό by mz4250 ο οποίος το διέθεσε δωρεάν με άδεια Creative Commons - Attribution license. Το μοντέλο βρέθηκε στην ιστοσελίδα thingiverse στο οποίο υπάρχουν πολλά δωρεάν τρισδιάστατα μοντέλα. Στην συνέχεια, σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Blender ένα «κεφάλι λύκου» με την χρήση των εργαλείων smooth, pinch, clay strips, grab και scrape. Στην συνέχεια, εισήχθησαν και τα δύο μοντέλα στο blender και αντικαταστάθηκε το κεφάλι του μοντέλου με αυτό που δημιουργήθηκε με τον ακόλουθο τρόπο:



Το μοντέλο στο πρόγραμμα Blender

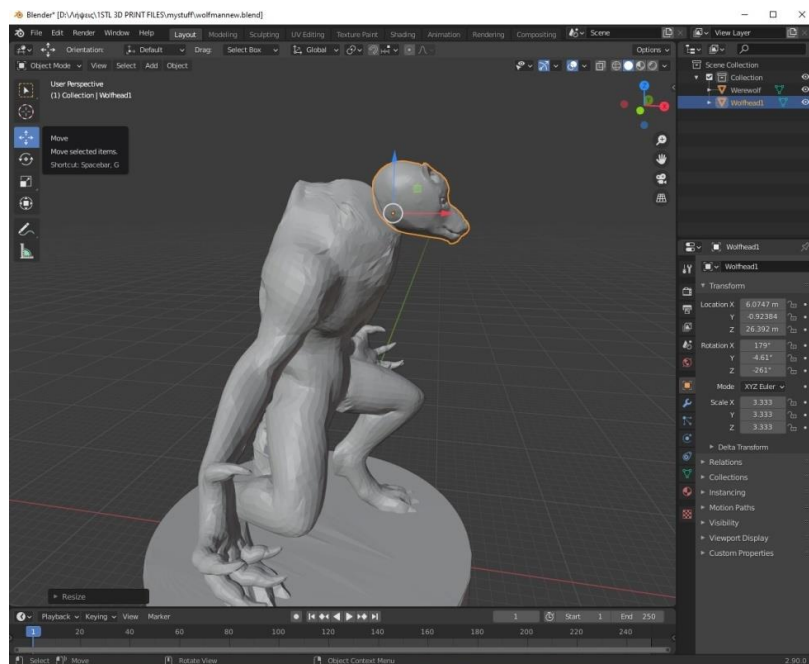
Πρώτα διαγράφηκε το παλιό κεφάλι του μοντέλου με τα εργαλεία *scrape* και *smooth* στην καρτέλα *sculpt*.



Στην συνέχεια, στο μενού *File-> Import -> Stl*, εισήχθηκε το προηγουμένως σχεδιασμένο κεφάλι στο έγγραφο.



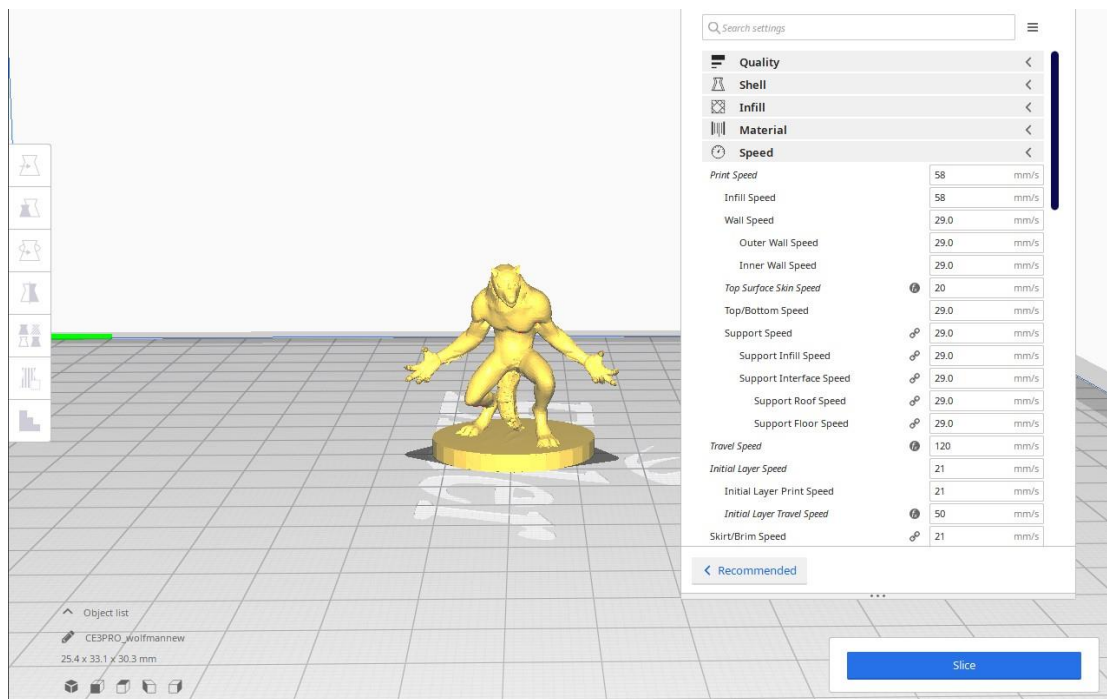
Έπειτα, μετακινήθηκε στην σωστή θέση το κεφάλι που προηγουμένως δημιουργήθηκε με το εργαλείο move στην καρτέλα Object Mode.



Ακόμη, προσαρμόστηκε το μέγεθος του νέου κεφαλιού με το εργαλείο change size στην καρτέλα object mode και με το εργαλείο move το τοποθετήθηκε στην κατάλληλη θέση.



Μετά, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα slicer Ultimaker Cura, εστάθηκε το αρχείο σε μορφή .stl από το μενού file->export-> .stl.



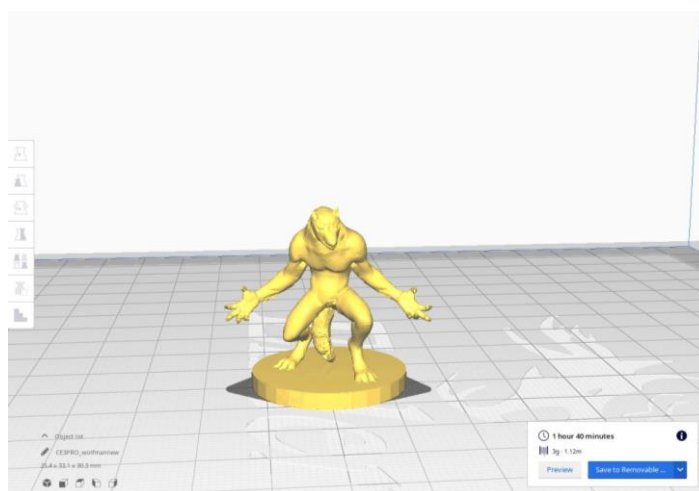
Το μοντέλο στο πρόγραμμα Ultimaker Cura

Στην συνέχεια, εισήχθηκε το αρχείο .stl στο πρόγραμμα Cura και επιλέχθηκε το προφίλ που έχει ρυθμιστεί για την εκτύπωση μινιατούρων, οι οποίες επικεντρώνονται στην λεπτομέρεια και το μικρό ύψος εκτύπωσης παρά στην ταχύτητα. Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο τύπος στηριγμάτων “tree” και να δημιουργηθούν μόνο στην επιφάνεια κατασκευής και όχι στο ίδιο το μοντέλο για να διατηρηθούν περισσότερες λεπτομέρειες και να μην προκύψουν ατέλειες στην επιφάνεια του εκτυπωμένου αντικειμένου. Επιπλέον, επιλέχθηκε το brim ως στηρικτικό προσκόλλησης στην πλάκα καθώς είναι αυτό που σπαταλά το λιγότερο υλικό ενώ προσφέρει καλό αποτέλεσμα.

Material		
Printing Temperature	185	°C
Printing Temperature Initial Layer	205	°C
Initial Printing Temperature	185	°C
Final Printing Temperature	185	°C
Build Plate Temperature	80	°C
Build Plate Temperature Initial Layer	80	°C
Flow	92	%
Wall Flow	92	%
Outer Wall Flow	92	%
Inner Wall(s) Flow	92	%
Top/Bottom Flow	92	%
Top Surface Skin Flow	93	%
Infill Flow	93	%
Skirt/Brim Flow	100	%
Support Flow	92	%
Support Interface Flow	92	%
Support Roof Flow	92	%
Support Floor Flow	92	%
Prime Tower Flow	92	%
Initial Layer Flow	100	%

Οι επιλογές υλικού στο Ultimaker Cura

Οι επιλογές «υλικού» στο πρόγραμμα Ultimaker Cura. Η γενική θερμοκρασία εκτύπωσης του PLA από τις βασικές ρυθμίσεις του προγράμματος είναι 180 °C και η θερμοκρασία πλάκας κατασκευής είναι στους 70 °C. Για να αντισταθμιστεί όμως η μικρή γενική θερμοκρασία του δωματίου και να μην υπάρξει πρόβλημα με το φαινόμενο του warping, αυξήθηκε η θερμοκρασία εκτύπωσης στους 185 και η θερμοκρασία της πλάκας κατασκευής στους 80. Αυξήθηκε ακόμη η θερμοκρασία εκτύπωσης των πρώτων στρωμάτων στους 205 βαθμούς, έτσι ώστε τα πρώτα στρώματα να έχουν πολύ καλή προσκόλληση στην πλάκα και να συντηκούν ομαλώς, προσφέροντας έτσι μία σταθερή βάση ώστε να χτιστεί πάνω τους το υπόλοιπο αντικείμενο.

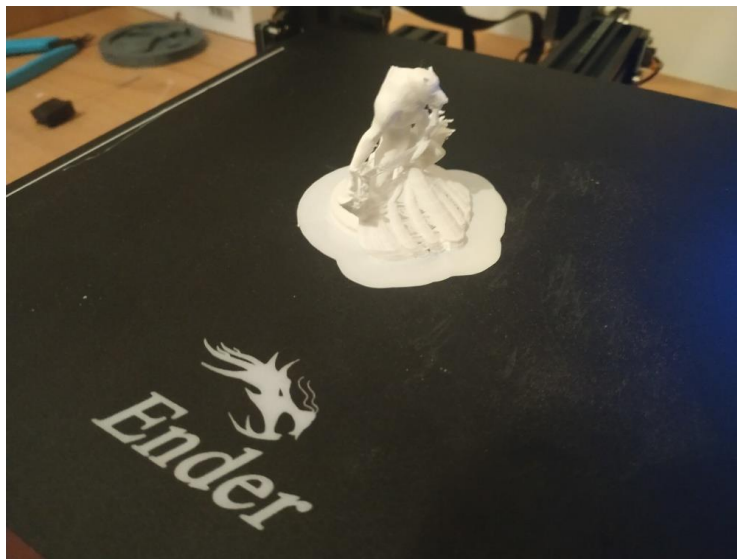


Πατώντας το κουμπί “slice”, το πρόγραμμα μετατρέπει το αρχείο .stl που εισήχθη σε μία μορφή επεξεργάσιμη για τον εκτυπωτή που χρησιμοποιείται, στην συγκεκριμένη περίπτωση τον Ender-3 Pro που προμηθεύτηκε για το πειραματικό τμήμα της εργασίας, και προσφέρει έναν υποθετικό υπολογισμό χρόνου εκτύπωσης σχετικά με τις ρυθμίσεις του προφίλ εκτύπωσης που χρησιμοποιείται. Αφού το αρχείο μετατραπεί, αποθηκεύεται σε εξωτερική κάρτα μνήμης για να εισαχθεί στην θύρα εισόδου κάρτας μνήμης της εκτυπωτικής μηχανής.



Η οθόνη ελέγχου

Αφού εισαχθεί η κάρτα μνήμης στην εκτυπωτική μηχανή, δίνονται οι εντολές: Print from TF-> και επιλέγεται το όνομα του αρχείου.



Το εκτυπωμένο μοντέλο στην πλάκα κατασκευής

Αφού το αντικείμενο εκτυπώθηκε, αφαιρέθηκε με πολλή προσοχή από την πλάκα κατασκευής με την ειδική σπάτουλα που παρέχεται στην συσκευασία της εκτυπωτικής μηχανής.



Το εκτυπωμένο μοντέλο και ο κόφτης που χρησιμοποιήθηκε στην αφαίρεση των στηριγμάτων

Στη συνέχεια, άρχισε η αφαίρεση των στηριγμάτων και του γείσου με μεγάλη προσοχή, αλλά παρατηρήθηκε πως το πιόνι είναι υπερβολικά μικρό για τους σκοπούς του παιχνιδιού σε σχέση με τα υπόλοιπα πιόνια και επιπλέον λόγω του μικρού μεγέθους του, έσπασε η «ουρά» του πιονιού κατά την διαδικασία, οπότε έπρεπε να επαναληφθεί η εκτυπωτική διαδικασία. Την δεύτερη φορά, ρυθμίστηκε το μέγεθος της εκτύπωσης στο 200% από το πρόγραμμα Ultimaker Cura.



Σύγκριση των εκτυπωμένων πιονιών μεταξύ τους.



Σύγκριση του δεύτερου εκτυπωμένου πιονιού με τα προηγουμένως εκτυπωμένα πιόνια των γουρουνιών.

Ως τελευταίο βήμα της διαδικασίας, ψεκάστηκε το πiónι με γκρι ακρυλικό σπρέι κατασκευής “The Army Painter” και στην συνέχεια το βάφτηκε με ακρυλικά χρώματα κατασκευής “Vallejo” και “The Army Painter”.

3ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου αυτοκινήτου ως διακόσμηση επιτραπέζιου παιχνιδιού.

Όργανα: Creality Ender-3 Pro, Προσωπικός Υπολογιστής.

Προγράμματα: Ultimaker Cura

Υλικά: Λευκό Πολυγαλακτικό Οξύ σε (Real Filament).

Συνθήκες Λειτουργίας: Θερμοκρασία δωματίου: 16 °C, εξαερισμός – ανοιχτό παράθυρο.

Χρόνος Εκτύπωσης: 1 ώρα και 22 λεπτά το πρώτο, 1 ώρα και 37 λεπτά το δεύτερο.

Διαδικασία: Το μοντέλο του πειράματος αποκτήθηκε στην ιστοσελίδα thingiverse όπως και όλα τα υπόλοιπα σε αυτή την εργασία. Το μοντέλο διατίθεται με άδεια Creative commons – Attribution – Non-commercial – Share-Alike από τον δημιουργό του “FLOWALISTIK” και επιλέχθηκε ως διακόσμηση χάρτη καθώς μοιράζεται θεματικά στοιχεία με το στίλ του παιχνιδιού. Επιλέχθηκε διότι φαινόταν πως θα ήταν καλή αρχή για τις δοκιμές του προφίλ διακοσμήσεων που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Ultimaker Cura, με έμφαση στην ταχύτητα εκτύπωσης και εξοικονόμηση υλικού. Οι διακοσμήσεις εκτυπώθηκαν με μεγαλύτερη ταχύτητα, λιγότερη εσωτερική γέμιση (infill), και λιγότερη έμφαση στην λεπτομέρεια διότι σε αντίθεση με τα πιόνια δεν τους δίνεται πολλή προσοχή κατά το παιχνίδι και αρκετά συχνά, επειδή αναπαριστούν μεγάλα μηχανήματα ή αντικείμενα που απαντώνται στην φύση, δεν διαθέτουν τον ίδιο βαθμό λεπτομέρειας με τους χαρακτήρες που αναπαριστούν τα πιόνια και η έλλειψη λεπτομερούς και μεθοδικής εκτύπωσης δεν είναι παρατηρήσιμη. Αφού κατέβηκε το μοντέλο, το εισήχθη στο πρόγραμμα Ultimaker Cura και επιλέχθηκε το προφίλ για τις διακοσμήσεις. Στην συνέχεια, πατήθηκε το πλήκτρο ώστε να γίνει “slice” το μοντέλο και το εξάχθηκε στην κάρτα αποθήκευσης. Μετά εισήχθηκε η κάρτα στην εκτυπωτική μηχανή και δόθηκε η εντολή “print from TF card” και έπειτα επιλέχθηκε το όνομα του αρχείου. Κατά την διάρκεια της εκτύπωσης έγιναν περιοδικοί έλεγχοι αλλά δεν εμφανίστηκε κανένα πρόβλημα. Μετά από την εκτύπωση, το μοντέλο αφαιρέθηκε προσεκτικά με την σπάτουλα από την πλάκα κατασκευής και χρησιμοποιήθηκε ο κόφτης για την απομάκρυνση των στηριγμάτων και του γέισου από το αντικείμενο.



Το αντικείμενο με το γείσο και τα στηρίγματα



Τα στηρίγματα και το γείσο αφού αφαιρέθηκαν

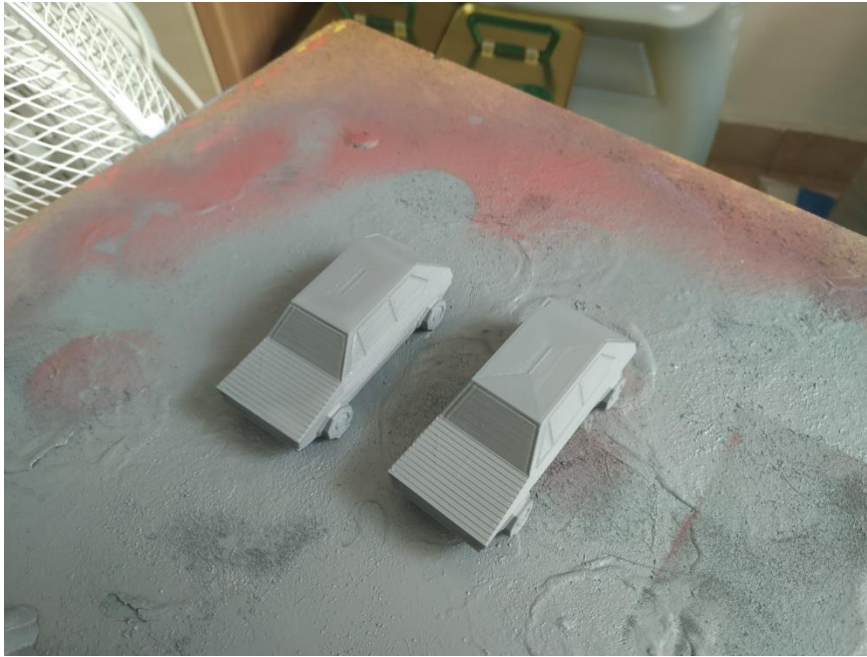


Το εκτυπωμένο αντικείμενο από την πάνω πλευρά.



Η κάτω πλευρά του αντικειμένου

Η κάτω πλευρά του αντικειμένου δυστυχώς εμφάνισε ατέλειες. Εξαιτίας αυτού. Το αντικείμενο τυπώθηκε δεύτερη φορά, αλλάζοντας τον τύπο στηριγμάτων στα κλασσικά "zig zag" αλλά το αποτέλεσμα δεν άλλαξε.



Τα δύο μοντέλα ψεκάσμένα με γκρι ακρυλικό σπρέι

Στο τέλος, τα δύο εκτυπωμένα μοντέλα ψεκάστηκαν με γκρι ακρυλικό σπρέι κατασκευής “The Army Painter” και χρωματίστηκαν με ακρυλικά χρώματα κατασκευής “The Army Painter” και “Vallejo”.

4^ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου αυτοκινήτου χωρίς ρόδες ως διακόσμηση επιτραπέζιου παιχνιδιού.

Όργανα: Creality Ender-3 Pro, Προσωπικός Υπολογιστής.

Προγράμματα: Ultimaker Cura

Υλικά: Λευκό Πολυγαλακτικό Οξύ (Real Filament).

Συνθήκες Λειτουργίας: Θερμοκρασία δωματίου: 16 °C, εξαερισμός – ανοιχτό παράθυρο.

Χρόνος Εκτύπωσης: 2 ώρες και 43 λεπτά.

Διαδικασία: Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το πείραμα, ως συνήθως, προήλθε από την ιστοσελίδα thingiverse. Το μοντέλο “Derelict Station Wagon (28mm/Heroic scale)” διατέθηκε από τον δημιουργό του, “dutchmogul” με άδεια Creative Commons Creative Commons - Attribution - Share Alike. Αφού περάστηκε το αρχείο .stl στο πρόγραμμα Cura και επιλέχθηκε το προφίλ για τις διακοσμήσεις, τα στηρίγματα ρυθμίστηκαν πάλι στον τύπο “tree” και το αρχείο εξάχθηκε στην κάρτα μνήμης ώστε να το εισαχθεί στην εκτυπωτική μηχανή και να ξεκινήσει η εκτύπωση. Έγιναν πολλοί έλεγχοι κατά την εκτυπωτική διαδικασία χωρίς να εντοπιστούν καθόλου προβλήματα.



Το αντικείμενο από την κάτω πλευρά

Το γείσο και τα στηρίγματα τα οποία στήριζαν τα κενά των ροδών αφαιρέθηκαν. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα εκτυπωμένα αμάξια το κάτω στρώμα υλικού τυπώθηκε με επιτυχία, χωρίς ατέλειες.



Το αντικείμενο από την πάνω πλευρά, ψεκάσμένο με γκρι ακρυλικό σπρέι

Αφού τελείωσε η εκτύπωση του αυτοκινήτου, το αντικείμενο ψεκάστηκε με γκρι ακρυλικό σπρέι κατασκευής “The Army Painter” και το βάφτηκε με ακρυλικά χρώματα κατασκευής “The Army Painter” και “Vallejo”.

5^ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM Ψηφιακού μοντέλου βράχων ως διακόσμηση επιτραπέζιου παιχνιδιού.

Όργανα: Creality Ender-3 Pro, Προσωπικός Υπολογιστής.

Προγράμματα: Ultimaker Cura

Υλικά: Λευκό Πολυγαλακτικό Οξύ (Real Filament).

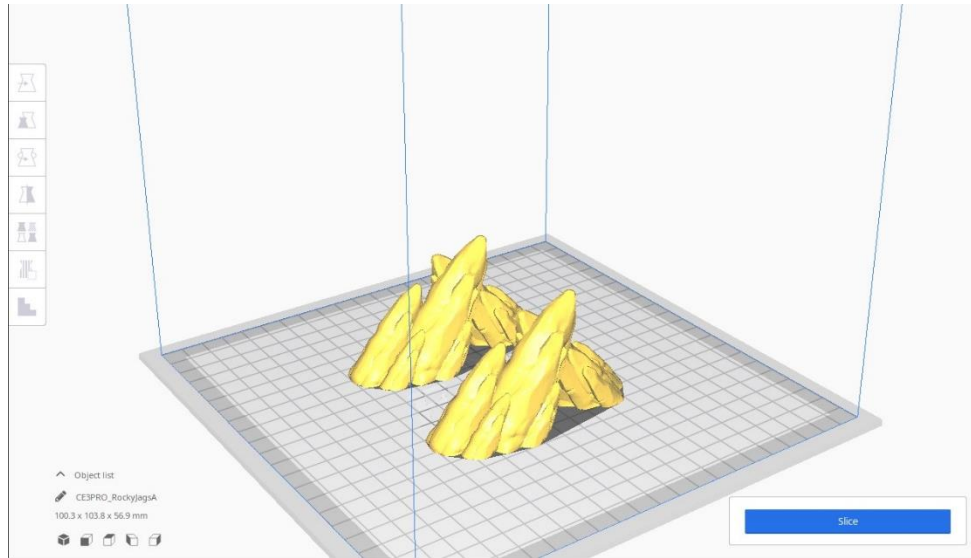
Συνθήκες Λειτουργίας: Θερμοκρασία δωματίου: 16 °C, εξαερισμός – ανοιχτό παράθυρο.

Χρόνος Εκτύπωσης: 4 ώρες και 23 λεπτά.

Διαδικασία: Ο σκοπός του πειράματος είναι να κατασκευαστούν επιπλέον διακοσμήσεις για το επιτραπέζιο, όσο συνεχίζει η δοκιμή του προφίλ που προσαρμόστηκε για τις διακοσμήσεις σε πιο ακανόνιστα και άμορφα μοντέλα όπως είναι οι βράχοι, με την επιπλέον πρόκληση να τυπωθούν παραπάνω από ένα μοντέλα ταυτόχρονα. Το πείραμα ξεκίνησε με την προμήθεια του αρχείου που θα εκτυπωθεί από την ιστοσελίδα thingiverse. Το μοντέλο, "Rock Formations (15mm/18mm/28mm scale)" διατέθηκε από τον δημιουργό του, "dutchmogul" με άδεια Creative Commons - Attribution - Non-Commercial - Share Alike. Το συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε διότι φαινόταν πως δεν θα χρειαστεί στηρίγματα, επομένως θα εκτυπωθεί χωρίς ατέλειες. Αφού κατέβηκε, εισήχθη στο πρόγραμμα Ultimaker Cura και επιλέχθηκε το προφίλ για τις διακοσμήσεις που έχει προσαρμοστεί. Ακόμη, με δεξί κλικ στο μοντέλο, επιλέχθηκε η επιλογή "multiply model" και δημιουργήθηκε ένα δεύτερο αντίγραφο. Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία, το αρχείο εξάχθηκε στην κάρτα μνήμης και μεταφέρθηκε στον εκτυπωτή όπου και άρχισε η εκτύπωση.

Print Speed	58	mm/s
Infill Speed	58	mm/s
Wall Speed	29.0	mm/s
Outer Wall Speed	29.0	mm/s
Inner Wall Speed	29.0	mm/s
Top Surface Skin Speed	20	mm/s
Top/Bottom Speed	29.0	mm/s
Support Speed	29.0	mm/s
Support Infill Speed	29.0	mm/s
Support Interface Speed	29.0	mm/s
Support Roof Speed	29.0	mm/s
Support Floor Speed	29.0	mm/s
Travel Speed	120	mm/s
Initial Layer Speed	21	mm/s
Initial Layer Print Speed	21	mm/s
Initial Layer Travel Speed	50	mm/s
Skirt/Brim Speed	21	mm/s
Number of Slower Layers	2	
Equalize Filament Flow	<input type="checkbox"/>	
Enable Acceleration Control	<input checked="" type="checkbox"/>	

Οι επιλογές "Ταχύτητας Εκτύπωσης" του προφίλ.



Τα μοντέλα στο πρόγραμμα Ultimaker Cura

6^ο ΠΕΙΡΑΜΑ: Εκτύπωση FDM ψηφιακών μοντέλων βαρελιών, δέντρου και μαρκών επιτραπέζιου παιχνιδιού.

Όργανα: Creality Ender-3 Pro, Προσωπικός Υπολογιστής.

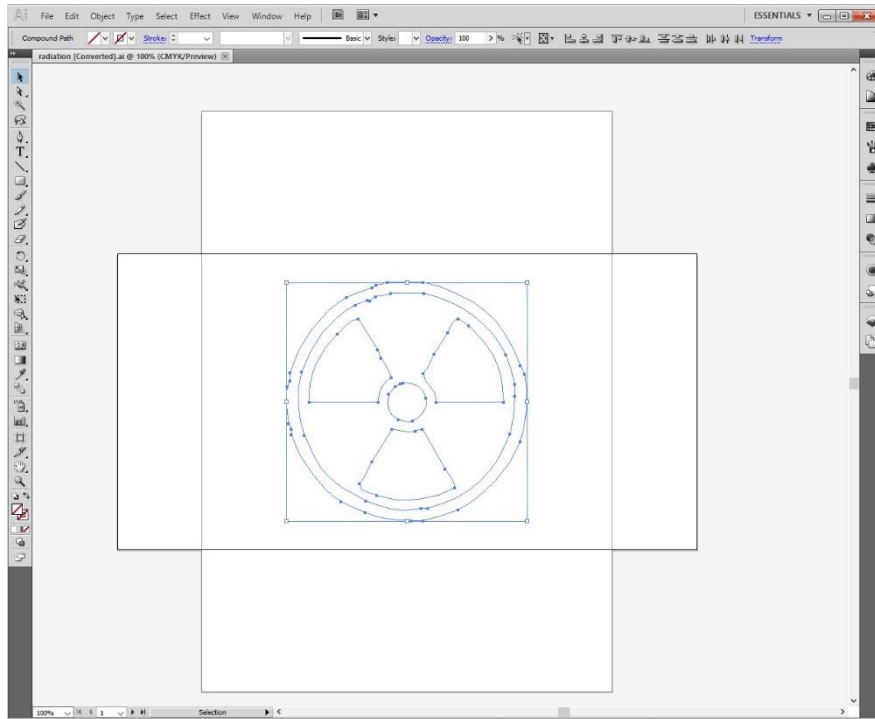
Προγράμματα: Ultimaker Cura, Blender, Adobe Illustrator

Υλικά: Λευκό Πολυγαλακτικό Οξύ (Real Filament).

Συνθήκες Λειτουργίας: Θερμοκρασία δωματίου: 16 °C, εξαερισμός – ανοιχτό παράθυρο.

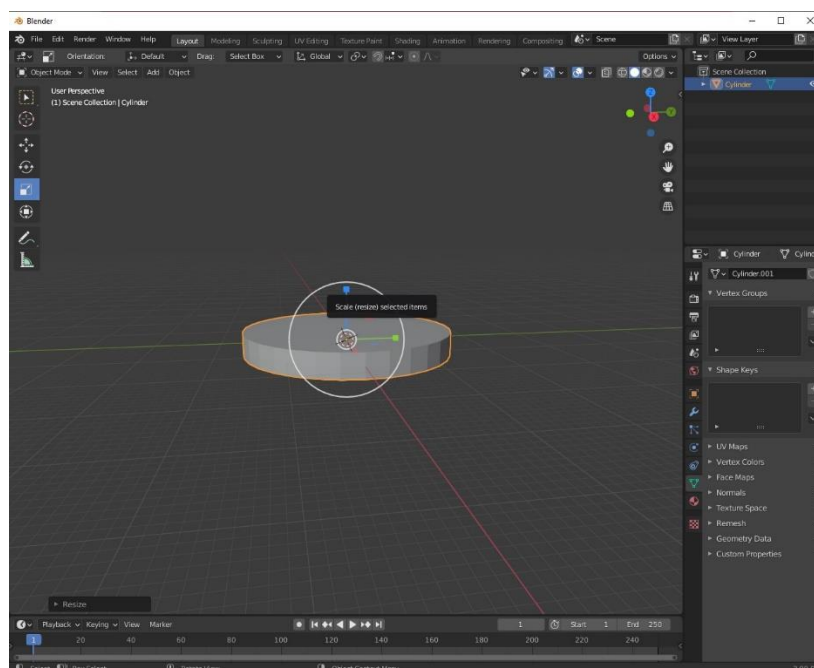
Χρόνος Εκτύπωσης: 6 ώρες και 40 λεπτά

Διαδικασία: Για τους σκοπούς της εργασίας έπρεπε να δημιουργηθούν μάρκες ώστε να μπορούν οι παίκτες του επιτραπέζιου να μετρήσουν τις «ζωές» τους. Αυτές οι μάρκες δημιουργήθηκαν ως εξής: Πρώτα, άνοιξε στο πρόγραμμα Adobe Illustrator το σήμα ραδιενεργού κινδύνου που είχε σχεδιαστεί για να διακοσμηθεί το ταμπλό του παιχνιδιού. Στο Illustrator δημιουργήθηκε work paths στο σχήμα του συμβόλου τα οποία στην συνέχεια εξάχθηκαν ως αρχεία .svg (Scalable Vector Graphics). Αυτή την διεργασία πραγματοποιήθηκε διότι με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να εισαχθούν αυτού του είδους αρχεία στο πρόγραμμα Blender.

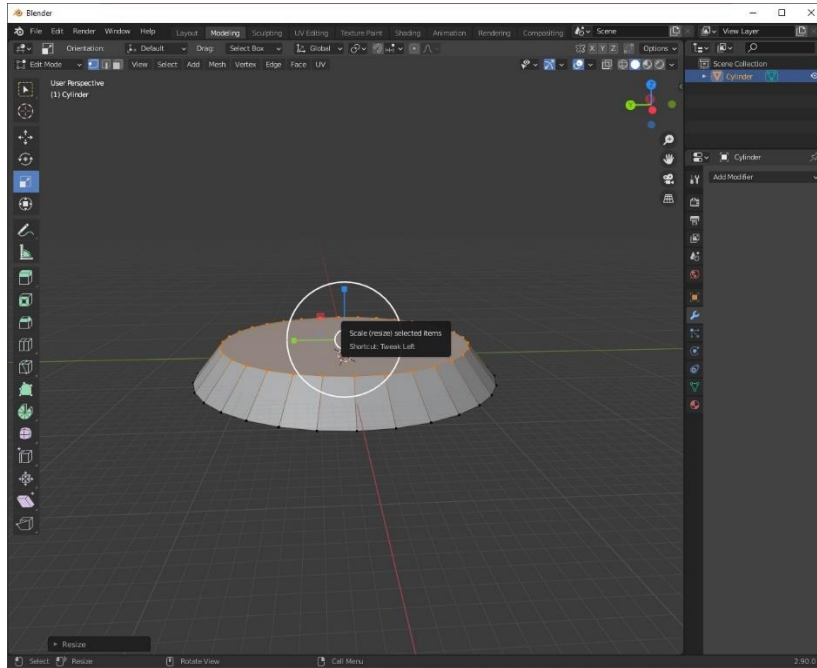


Τα work paths στο πρόγραμμα illustrator

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε έναν μικρό αντικείμενο παρόμοιο με νόμισμα, εισάγοντας με την εντολή Shift+A ένα κυλινδρικό mesh, το οποίο αυξήθηκε σε πλάτος με το εργαλείο resize. Ακόμη, το πάνω μέρος του σμικρύνθηκε απλά μικραίνοντας το μέγεθος των πάνω vectors. Στην συνέχεια, εισήχθηκε το αρχείο .svg και άλλαξε το μέγεθος του σχεδίου για να ταιριάζει με την βάση που δημιουργήθηκε. Τέλος, τα vector graphics έγιναν τρισδιάστατα με την εντολή extrude vertices.



Δημιουργία δίσκου από κύλινδρο



Αλλαγή της βάσης σε σχήμα κώνου με επίπεδη κορυφή

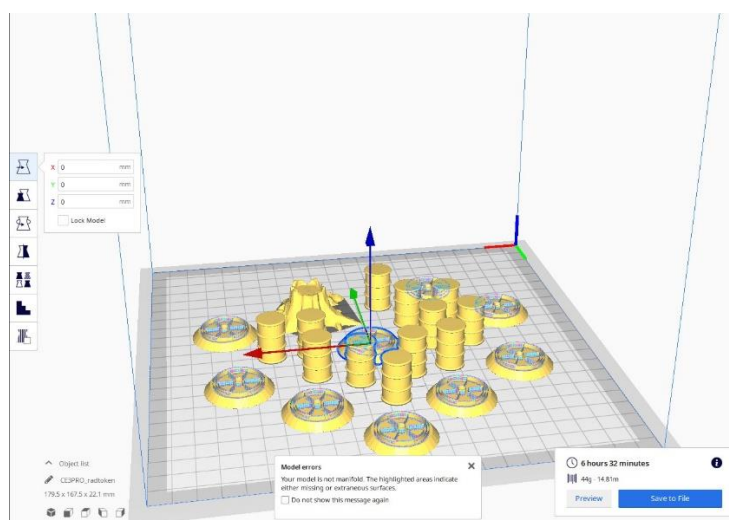


Εισαγωγή των workpath στο Blender



Δημιουργία της μάρκας

Αφού έκανα μετατρέπηκε σε .stl η μάρκα με το μενού file->export->.stl ώστε να περαστεί στο Cura, βρέθηκαν στην ιστοσελίδα thingiverse δύο ακόμα μοντέλα τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για διακοσμήσεις στο παιχνίδι. Αυτά τα μοντέλα είναι το “Tree Stump on 60mm base” του δημιουργού “onebitpixel” ο οποίος το διέθεσε με άδεια Creative Commons - Attribution - Non-Commercial το οποίο έβαλα να εκτυπωθεί μία φορά και το μοντέλο “Miniature wargaming oil barrel” από τον δημιουργό “XDr4g0nX” το οποίο διατέθηκε με άδεια Creative Commons - Attribution - Non-Commercial - Share Alike το οποίο επιλέχθηκε να εκτυπωθεί δώδεκα φορές λόγω του μικρού μεγέθους του. Ακόμη, επιλέχθηκε να εκτυπωθεί η μάρκα εννέα φορές, επίσης λόγω του μικρού της μεγέθους. Η εκτύπωση αυτή πραγματοποιήθηκε για να δοκιμάσει τα όρια της μηχανής και να αποδείξει αν όντως είναι κατάλληλη για περιορισμένη μαζική παραγωγή. Αφού τα αρχεία έγιναν slice, εισήχθησαν στην εκτυπωτική μηχανή μέσω της κάρτας μνήμης και ξεκίνησε η εκτύπωση.



Τα μοντέλα στο πρόγραμμα slicer Ultimaker Cura

Η εκτύπωση διήρκησε περισσότερο από όλες τις υπόλοιπες. Μέσα στις έξι ώρες και σαράντα λεπτά τις διαδικασίες εκτελέσθηκαν πολλοί έλεγχοι χωρίς να προκύπτει κανένα εμφανές πρόβλημα.



Ο κορμός δέντρου εκτυπωμένος



Τα βαρέλια εκτυπωμένα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - Αποτελέσματα – Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που επιτελέστηκαν, μαζί με τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν και τα προβλήματα και τις προκλήσεις που απαντήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Πείραμα 1^ο - Συμπεράσματα και Αποτελέσματα

Σε γενικές γραμμές, το πείραμα ολοκληρώθηκε με επιτυχία. Το αντικείμενο εκτυπώθηκε με μικρές καθυστερήσεις και προβλήματα τα οποία διορθώθηκαν. Πέρα από το συμβάν κατά την εκκίνηση και την αποκόλλησή του από την βάση, δεν προέκυψε άλλο πρόβλημα και το αντικείμενο κατέληξε ευπαρουσίαστο και έτοιμο για χρήση. Η σημαντικότερη πληροφορία που προέκυψε από το πείραμα είναι πως δεν πρέπει να γίνεται υπερβολική χρήση των στηριγμάτων της εκτύπωσης και πρέπει να δίνεται αρκετά μεγάλη προσοχή όταν γίνεται χρήση εργαλείων σε αντικείμενα από πολυγαλακτικό οξύ. Λόγω της επιτυχίας του πειράματος, η εκτυπωτική διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές ώστε τα πιόνια να χρησιμοποιηθούν στο επιτραπέζιο, αλλά αφού το μέγεθος των μοντέλων αυξήθηκε, ώστε να σπάνε λιγότερο εύκολα τα πιο αδύναμα τμήματά τους.



Το εκτυπωμένο αντικείμενο επιστρωμένο με ακρυλικό σπρέι.



Οι τρεις επιπλέον εκτυπώσεις.

Πείραμα 2^ο - Συμπεράσματα και Αποτελέσματα

Το πιόνι που δημιουργήθηκε είχε ένα κύριο πρόβλημα: Ήταν υπερβολικά μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα πιόνια που είχαν ήδη εκτυπωθεί. Αυτό το πρόβλημα δημιούργησε με την σειρά του ένα δεύτερο πρόβλημα, επειδή ουρά της φιγούρας ήταν υπερβολικά λεπτή και δεν συνδεόταν καλά με το υπόλοιπο σώμα της, έσπασε κατά την διάρκεια της αφαίρεσης των στηριγμάτων από πάνω της. Επομένως αναγκαστικά εκτυπώθηκε δεύτερη φορά με μεγαλύτερες διαστάσεις. Την δεύτερη φορά λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων και καλύτερης επαφής η ουρά δεν έσπασε και το αποτέλεσμα ήταν το επιθυμητό.



Το τελικό αποτέλεσμα

Πείραμα 3^ο - Συμπεράσματα και Αποτελέσματα

Ενώ δεν υπήρχαν προβλήματα κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, τα αποτελέσματα που παράχθηκαν δεν ήταν απολύτως ικανοποιητικά. Στην δεύτερη εκτύπωση, ενώ άλλαξα τον τύπο στηριγμάτων για να καλύψουν περισσότερη επιφάνεια δεν είχαν μεγάλη επίδραση. Επομένως, αποφάσισα να βρω κάποιο μοντέλο το οποίο δεν θα είχε τόσο μεγάλη επιφάνεια πάνω από κενό ώστε να παραχθεί καλύτερο αποτέλεσμα.



Το τελικό αποτέλεσμα βαμμένο με ακρυλικά χρώματα κατασκευής Vallejo και "The Army Painter"

Πείραμα 4^ο – Συμπεράσματα και Αποτελέσματα

Το αντικείμενο εκτυπώθηκε με επιτυχία χωρίς απρόοπτα και χωρίς προβλήματα. Το αποτέλεσμα ήταν ακριβώς αυτό που επιθυμούσα και περίμενα και δεν παρουσίασε κάποια ατέλεια στο σύνολό του.



Το τελικό αποτέλεσμα βαμμένο με ακρυλικά χρώματα κατασκευής Vallejo και "The Army Painter"

Πείραμα 5^ο – Συμπεράσματα και Αποτελέσματα

Το αποτέλεσμα του πειράματος ήταν επιτυχές. Έχοντας πια αυτοπεποίθηση για την αποτελεσματικότητα του προφίλ και με πολλαπλά ταυτόχρονα αντικείμενα, στο το επόμενο και τελευταίο πειραματικό τμήμα θα επιχειρήσω να τυπώσω πολλά διαφορετικά αντικείμενα ταυτόχρονα.



Τα μοντέλα ψεκασμένα με γκρι ακρυλικό σπρέι

Πείραμα 6^ο – Συμπεράσματα και Αποτελέσματα

Το τελικό πείραμα επιτελέστηκε, γενικώς, με επιτυχία. Παρά τον μεγάλο όγκο και διάρκεια της εκτύπωσης, τα αντικείμενα δεν παρουσίασαν ατέλειες στις επιφάνειές τους, δεν αποκολλήθηκαν από την πλάκα κατασκευής και δεν έσπασαν. Το μόνο πρόβλημα ήταν οι μάρκες, οι οποίες στα λεπτότερα σημεία τους ήταν όσο λεπτές όσο και το γέισο, οπότε αναγκάστηκα να κόψω με το κοπίδι περισσότερο υλικό και να τις στρογγυλοποιήσω λίγο, για να είναι ομοιόμορφες.



Οι μάρκες εκτυπωμένες, ψεκασμένες με γκρι ακρυλικό σπρέι κατασκευής the Army Painter και βαμμένες με ακρυλικά χρώματα κατασκευής Vallejo.



Ο κορμός δέντρου βαμμένος με χρώματα κατασκευής "Vallejo"



Τα εκτυπωμένα βαρέλια βαμμένα με χρώματα κατασκευής Vallejo και "The Army Painter"

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΥΠΩΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι σχετικά καινούργια μέθοδος και ενώ μπορεί να παράγει πολύ καλά αποτελέσματα, κάθε είδος τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει και τα δικά της προβλήματα και ιδιοτροπίες τις οποίες πρέπει ο παραγωγός/τεχνολόγος να προσέχει. Μέσα από την εξέταση αυτών των προβλημάτων ερευνώνται διάφορες πτυχές και όψεις της μεθόδου. Τα πιο συχνά απαντώμενα προβλήματα είναι τα εξής:

1. Απώλεια νήματος/ Απώλεια υλικού.(Under- Extrusion)

Συχνά, ενώ όλα έχουν –φαινομενικά- ρυθμιστεί σωστά, ο εκτυπωτής δεν βγάζει υλικό με αποτέλεσμα το μοντέλο που έχει εισαχθεί να μην τυπώνεται ή να τυπώνεται μερικώς. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Από τον πιο απλό- από τον τελειωμό του νήματος, ένα παράγοντα που μπορούμε να αποφύγουμε απλώς προσέχοντας το καρούλι του υλικού- μέχρι τα πιο περίπλοκα όπως ας πούμε η λάθος ρύθμιση του θερμαινόμενου στομίου, με αποτέλεσμα να μην θερμαίνεται ως το σημείο τήξης του το υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην τυπώνει καθόλου ή να τυπώνει μερικώς με άσχημα αποτελέσματα και να χαλάει το μοντέλο προς εκτύπωση. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται Under-Extrusion και ρυθμίζεται είτε από το πρόγραμμα “slicer” που χρησιμοποιούμε, ανεβάζοντας την θερμοκρασία του στομίου, είτε από το ίδιο το εκτυπωτικό μηχάνημα από τις ρυθμίσεις του. Καλό είναι να γνωρίζουμε πως ακόμα και αν είναι το ίδιο υλικό (π.χ. PLA, ABS κ.ο.κ.), οι ρυθμίσεις του μπορεί να είναι διαφορετικές από εταιρία σε εταιρία ή ακόμα και από την ίδια εταιρία σε διαφορετικά χρώματα. Οπότε δεν υπάρχουν ποτέ οι «ιδανικές ρυθμίσεις» και οι καταναλωτές ενθαρρύνονται να πειραματίζονται με τα διάφορα υλικά για να ρυθμίζουν σωστά τους τρισδιάστατους εκτυπωτές τους με τα διαφορετικά υλικά που μπορεί να χρησιμοποιούν.



Αποτέλεσμα Under-Extrusion κατά την εκτύπωση κυκλικών βάσεων.

2. Το στόμιο έρχεται σε επαφή με την θερμαινόμενη επιφάνεια.(Nozzle Touches Build Plate)

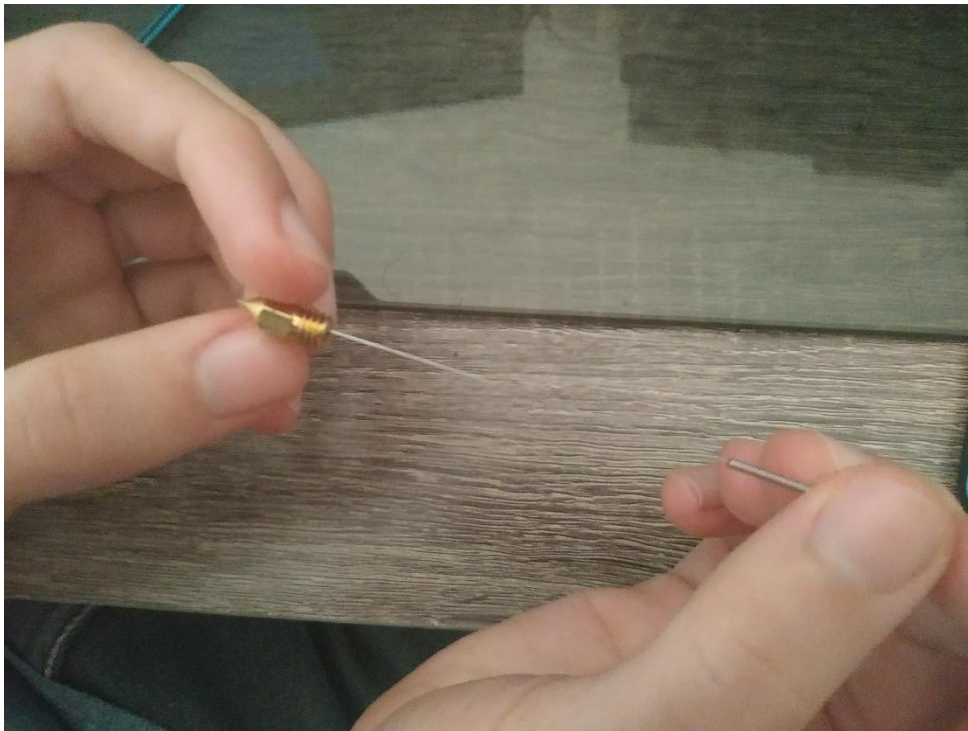
Στην περίπτωση που το στόμιο του εκτυπωτή έρχεται σε επαφή με την θερμαινόμενη επιφάνεια της εξόδου, πρέπει να σταματήσει άμεσα η εκτυπωτική διαδικασία αλλιώς, στην χειρότερη περίπτωση, μπορεί να δημιουργηθεί σοβαρό πρόβλημα στην εκτυπωτική μηχανή. Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το λιωμένο υλικό, εφόσον δεν μπορεί να εκτυπωθεί από το στόμιο, να κατακλύσει και να βουλώσει τον σωλήνα που οδηγεί το νήμα και να στερεοποιηθεί ανάμεσα στους μηχανισμούς του εκτυπωτή προκαλώντας βλάβη που δεν μπορεί να διορθωθεί χωρίς ανταλλακτικά και χρονοβόρα διαδικασία από τον χρήστη. Εναλλακτικά υπάρχει πιθανότητα να μην τυπωθούν σωστά ή καθόλου τα πρώτα «στρώματα» της εκτύπωσης, χαλώντας το σχέδιο, σπαταλώντας χρόνο και υλικό. Ο τρόπος να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό είναι σχετικά απλός. Πρέπει πρώτα να ελεγχθεί εάν η «**πλάκα κατασκευής**» (η έξοδος του εκτυπωτή, η θερμαινόμενη επιφάνεια στην οποία εκτυπώνεται το μοντέλο) είναι ρυθμισμένη σωστά, όσο πιο επίπεδη γίνεται. Αυτό, σε κάποιους -λιγότερο οικονομικούς- εκτυπωτές γίνεται μερικές φορές αυτόματα, με το πάτημα ενός κουμπιού. Σε πιο οικονομικά μοντέλα, συνήθως, πρέπει να γίνει χειροκίνητα συνήθως ρυθμίζοντας με βελβίδες την κίνηση της πλάκας και μετρώντας την απόσταση με το πάχος μίας απλής κόλλας χαρτιού A4. Μία ακόμα λύση είναι η διόρθωση του άξονα Z από τον εκτυπωτή.



Αποτέλεσμα επαφής στομίου με πλάκα κατασκευής – υλικό έχει κολλήσει στην πλάκα κατασκευή.

3. Μπλοκάρισμα ή «μπούκωμα» στομίου. (Nozzle Clog)

Στην περίπτωση που ξεκινήσει η εκτυπωτική διαδικασία, αλλά δεν εκκρίνεται καθόλου υλικό από το στόμιο, ακόμα και με την αντικατάσταση του νήματος, υπάρχει περίπτωση να έχει βουλώσει το στόμιο. Ενδεικτική του προβλήματος αυτού είναι η ύπαρξη παλαιού ξεραμένου υλικού γύρω από το στόμιο το οποίο υπάρχει πιθανότητα να μαζευτεί και να μπλοκάρει την έξοδο του στομίου. Αυτό, ως αποτέλεσμα, όπως και στο προηγούμενο πρόβλημα, μπορεί να καταλήξει στο λιωμένο υλικό να βουλώνει και να μαζεύεται γύρω από σημαντικά κομμάτια του εκτυπωτή και να προκαλεί σοβαρές βλάβες. Οι τρόποι πρόληψης και επιδιόρθωσης είναι οι εξής: Αρχικά πρέπει να θερμανθεί το στόμιο στην ανάλογη θερμοκρασία τήξης του υλικού που χρησιμοποιούταν στις πιο πρόσφατες εκτυπώσεις του μηχανήματος (π.χ. 220 °C στην περίπτωση του PLA). Έπειτα πρέπει να καθαριστεί η τρύπα στο στόμιο χρησιμοποιώντας κάποια λεπτή βελόνα που συνήθως παρέχεται από τον κατασκευαστή. Στην περίπτωση απώλειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μία απλή λεπτή βελόνα ή καρφίτσα ραπτικής. Εάν δεν διορθωθεί άμεσα, τότε πιθανά να πρέπει χειροκίνητα να εισαχθεί και να πιεστεί υλικό από την είσοδο του νήματος ώστε να σπρώξει και να ξεμπλοκάρει το παλιό υλικό που έχει βουλώσει το στόμιο. Καλό θα ήταν να συνοδευτεί η παραπάνω λύση με την χρήση βούρτσας ή πινέλου για απόλυτη σιγουριά στην καθαριότητα. Στην περίπτωση που ούτε αυτό έχει αποτέλεσμα, μπορεί να είναι αναγκαία η διάλυση, καθαρισμός και επανασυναρμολόγηση του εξαρτήματος του στομίου.



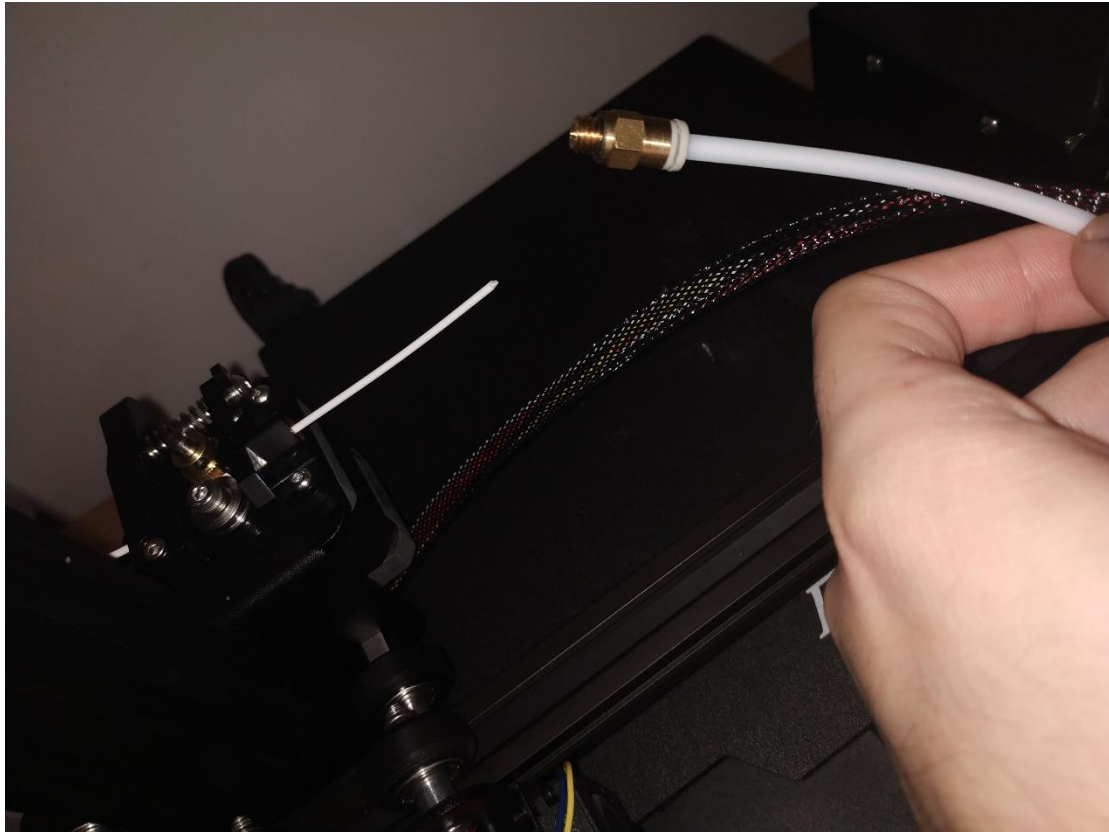
Καθάρισμα στομίου με βελόνα καθαρισμού.

4. Σπασμένο/Κομμένο νήμα υλικού (Snapped Filament)

Είναι δυνατόν μερικές φορές κατά την χρήση του εκτυπωτή, να σπάσει το νήμα του υλικού. Υπάρχουν διάφορα αίτια για το πρόβλημα καθώς και λύσεις για αυτό. Κάποιες φορές συμβαίνει λόγω της λάθος αποθήκευσης του υλικού, δηλαδή στην περίπτωση που είναι καιρό στον ήλιο ή σε υγρασία μπορεί να γίνει εύθρυπτο, ακόμα και στις περιπτώσεις του ABS και του PLA που, εκτός απροόπτου, διατηρούνται για αρκετό καιρό στα ράφια. Μερικές φορές, ακόμα και αν είναι καλή η κατάσταση του νήματος, εάν υπάρχει μεγάλη πίεση από τα γρανάζια του συστήματος τροφοδότησης (feeder) το νήμα μπορεί να σπάσει. Όταν το νήμα σπάσει, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν θα μπορεί να φτάσει στο στόμιο για να θερμανθεί οπότε η εκτύπωση θα σταματήσει, σε άλλες περιπτώσεις θα υπάρχει παύση στην τροφοδότηση του υλικού με αποτέλεσμα να μην τυπωθούν αρκετά στρώματα της εκτύπωσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται αλλάζοντας το νήμα με καλύτερης ποιότητας και πιο «φρέσκο» νήμα, μειώνοντας την πίεση που ασκεί το τροφοδοτικό σύστημα στο νήμα και αποθηκεύοντας το σε κατάλληλο σκιερό, ξηρό περιβάλλον ώστε να μην πολυμεριστεί και γίνει εύθρυπτο. Μερικές φορές το νήμα σπάει επειδή είναι το λάθος μέγεθος. Επειδή συγκεκριμένοι εκτυπωτές είναι ρυθμισμένοι για συγκεκριμένα μεγέθη νήματος η αγορά και χρήση λάθος μεγέθους μπορεί να οδηγήσει στο σπάσιμο του από την πίεση που δέχεται από το σύστημα τροφοδοσίας.



Σπασμένο νήμα. Η πίεση από τα γρανάζια είναι προφανής, καθώς, υπό κανονικές συνθήκες, το νήμα δεν θα είχε τα σημάδια.



Σπασμένο νήμα μέσα σε σωλήνα τροφοδοσίας ενός CrealityEnder-3 Pro

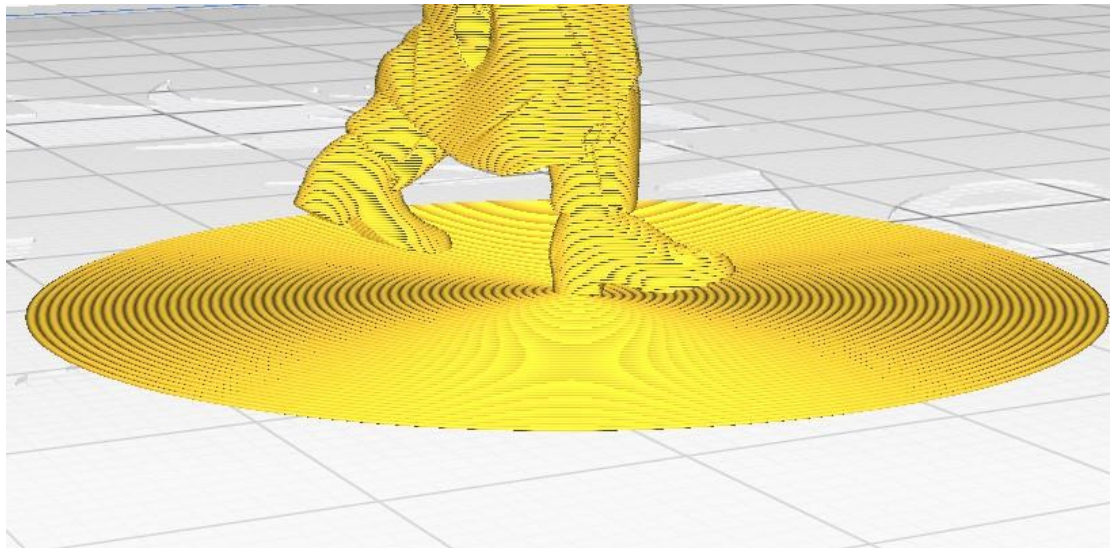
5. Το αντικείμενο δεν κολλάει/ Δεν παραμένει εφαπτόμενο στην πλάκα κατασκευής.

Σε κάποιες εκτυπώσεις υπάρχει πιθανότητα είτε να μην κολλάει καθόλου το υλικό στην πλάκα ή να ξεκολλάει εν μέσω της εκτύπωσης η κατασκευή από την πλάκα. Οι λόγοι που συμβαίνει συνήθως αυτό είναι είτε η χαμηλότερη από το ιδανικό θερμοκρασία της πλάκας κατασκευής ή η ύπαρξη απορριμμάτων και σκόνης πάνω στην επιφάνεια της εκτύπωσης. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας είναι απλή από τις ρυθμίσεις του εκτυπωτή και από το πρόγραμμα slicer που χρησιμοποιείται κατά την διαδικασία. Η καθαριότητα της επιφάνειας εκτύπωσης, μιλώντας κυρίως για πλαστικές επιφάνειες εκτύπωσης σαν αυτές που συνήθως συμπεριλαμβάνονται στην συσκευασία του εκτυπωτή, γίνεται κατά περιόδους με την χρήση συνήθως βαμβακερού υφάσματος και ισοπροπυλικής αλκοόλης. Η ισοπροπυλική αλκοόλη θα καθαρίσει την επιφάνεια, απομακρύνοντας τυχόν υπολείμματα από προηγούμενες εκτυπώσεις, χωρίς να την βλάψει και να την διαβρώσει.

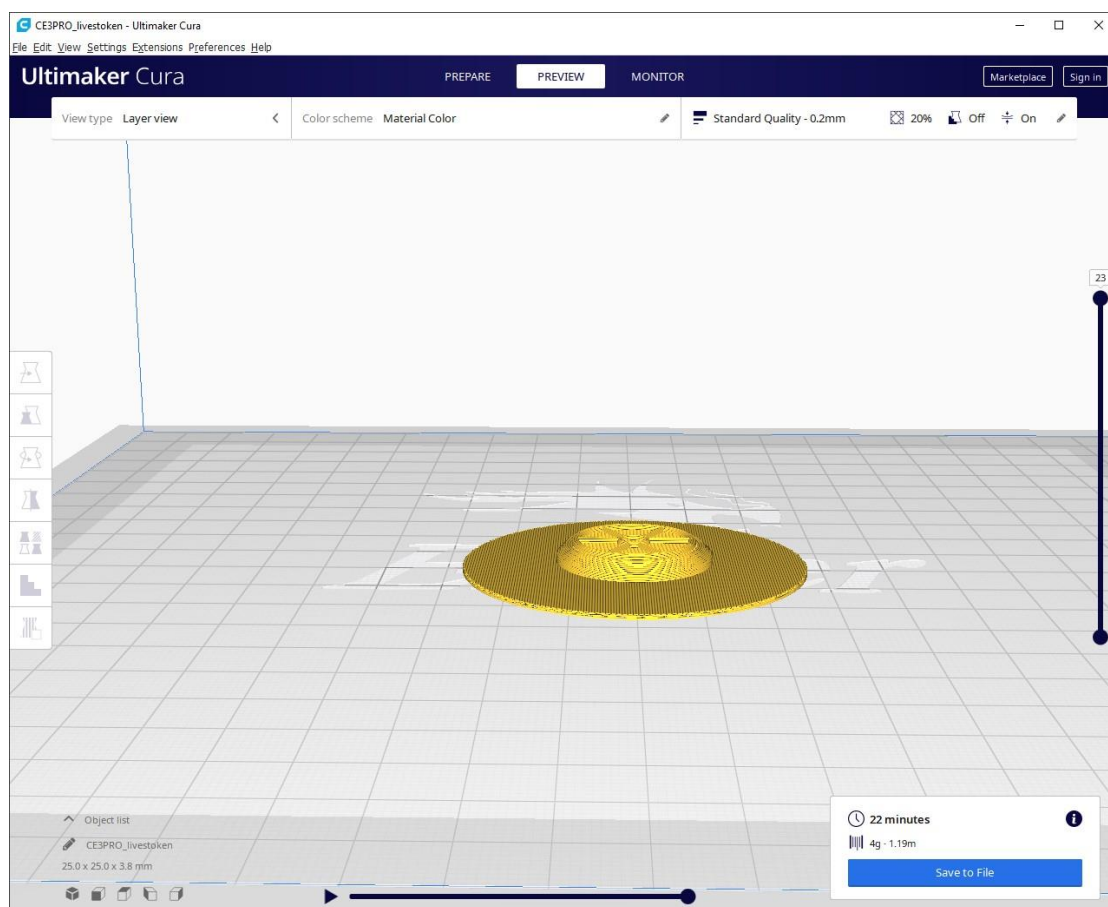


Η έλλειψη θερμοκρασίας οδηγεί σε αποκόλληση του μοντέλου και σπατάλη χρόνου και υλικού.

Υπάρχει τρόπος να βελτιωθεί το ποσοστό προσκόλλησης και σταθερότητας του αντικειμένου στην εκτυπωτική πλάκα, στην περίπτωση που είναι καθαρή και η θερμοκρασία είναι σωστή. Στις περιπτώσεις που είτε η εκτύπωση είναι μεγάλη ή απλά ακουμπάει σε πολύ λίγα σημεία στην πλάκα, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης raft ή brim από τις ρυθμίσεις του προγράμματος slicer . Το raft (λέμβος) είναι ένα μία κατασκευή που τυπώνεται στο επίπεδο της εκτυπωτικής πλάκας, γύρω από το αντικείμενο, για να το υποστηρίξει ώστε να μείνει ακίνητο και να μην ξεκολλήσει. Το μειονέκτημα του raft είναι πως σπαταλάει αρκετό υλικό και προσθέτει και αρκετό χρόνο στην εκτυπωτική διαδικασία σε σχέση με το brim (γείσο), το οποίο είναι ένα σχετικά λεπτό στρώμα επιπλέον υλικού που επιτελεί τον ίδιο σκοπό με αρκετή επιτυχία. Ένα ακόμη εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει την σταθερότητα του αντικειμένου, αλλά και να υποστηρίξει το αντικείμενο που εκτυπώνεται, είναι τα supports (στηρίγματα), τα οποία σε πολλές εκτυπώσεις είναι απολύτως αναγκαία για να εκτυπωθούν συγκεκριμένα τμήματα αντικειμένων, που αλλιώς θα ήταν μετέωρα. Υπάρχουν πολλά είδη στηριγμάτων, αλλά οι δύο πιο πολύ χρησιμοποιημένοι τύποι είναι ο τύπος tree (δέντρου) και ο τύπος lattice (πλέγματος). Τα rafts, brims και τα supports θα αναλυθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε επόμενα κεφάλαια.



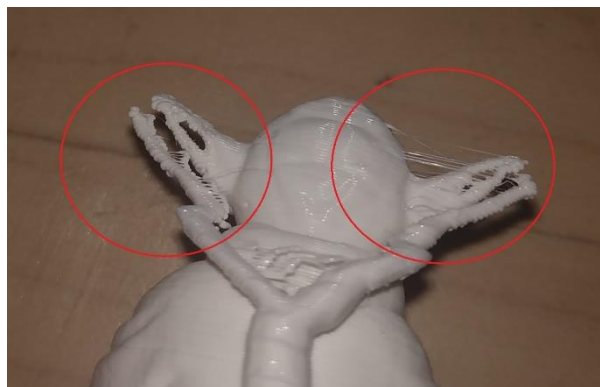
Το brim, ή γείσο, στο πρόγραμμα slicer "Ultimaker Cura", από τα πιο δημοφιλή δωρεάν slicers στο διαδίκτυο.



Raft ή σχεδία στο πρόγραμμα Ultimaker Cura

6. Stringing, το υλικό με την μορφή νήματος, κολλάει στην εκτύπωση.

Υπάρχουν περιπτώσεις, στις οποίες, κατά την εκτύπωση δημιουργούνται λεπτά νήματα πάνω στο αντικείμενο, σαν ιστοί αράχνης. Το φαινόμενο αυτό στην κοινότητα ονομάζεται “stringing” λόγω της όμοιας όψης του υλικού με σπάγκο που τυλίγει το εκτυπωμένο αντικείμενο, συχνά με τμήματα υλικού να κρέμονται, «μετέωρα», από τα νήματα. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται συνήθως είτε από την υψηλή θερμοκρασία του στομίου είτε από υπολειτουργία του ανεμιστήρα ψύξης. Το στόμιο μεταφέρει υγροποιημένο υλικό όσο εκτυπώνει το αντικείμενο με αποτέλεσμα να το καλύπτει αλλεπάλληλα με νήματα τα οποία στερεοποιούνται και μένουν πάνω στο υλικό. Υπάρχουν τρόποι επιδιόρθωσης του προβλήματος. Κατ’ αρχάς, εάν ο ανεμιστήρας λειτουργεί κανονικά, υπάρχει η πιθανότητα, εάν έγινε αλλαγή του υλικού πρόσφατα, το νέο υλικό που χρησιμοποιείται να έχει χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης, με αποτέλεσμα να θερμαίνεται υπέρ του δέοντος. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και αν χρησιμοποιούμε «το ίδιο υλικό» με πριν, (π.χ. PLA διαφορετικών εταιρειών), καθώς διαφορετικές εταιρείες κατασκευάζουν με διαφορετικές διαδικασίες, προσμίξεις και πρώτες ύλες τα υλικά τους. Μπορεί και υλικά της ίδιας εταιρείας αλλά διαφορετικού χρώματος να θέλουν λίγο διαφορετικές θερμοκρασίες λόγω τις επίδρασης που έχει το τεχνητό χρώμα στο υλικό όταν αναμιγνύονται. Μερικές φορές ακόμη, εάν είναι το ίδιο υλικό της ίδιας εταιρίας, μπορεί να είναι διαφορετικές παρτίδες του υλικού, οπότε να έχουν ελάχιστα διαφορετικές απαιτήσεις στην θερμοκρασία. Ο τρόπος επιδιόρθωσης είναι απλός. Πρέπει να γίνει μείωση της θερμοκρασίας του στομίου, και δοκιμαστικές εκτυπώσεις με σκοπό την εύρεση της ιδανικής θερμοκρασίας για το διαθέσιμο υλικό και την κατάλληλη ρύθμιση του ανεμιστήρα ψύξης ώστε να μην υπολειτουργεί. Στην περίπτωση της αλλαγής του υλικού, ενδέχεται και να έχει μείνει κατάλοιπο του παλιού υλικού με χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης, οπότε πρέπει να καθαριστεί το στόμιο. (Brian Obudho 2020)



*Stringing λευκού PLA σε εκτυπωτή Ender 3 Pro. Πηγή μοντέλου:
<https://www.thingiverse.com/thing:1092181>*

Στην περίπτωση που το σύστημα ψύξης δεν λειτουργεί υπάρχουν διάφορα ενδεχόμενα για αυτή την κατάσταση. Αρχικά υπάρχει η πιθανότητα να μην έχει συντηρηθεί σωστά και να έχει γεμίσει με σκόνη και χνούδια. Σε αυτή την περίπτωση η επιδιόρθωση είναι σχετικά απλή, στους περισσότερους FDM εκτυπωτές, με ξεβίδωμα του συστήματος με κατσαβίδι ή allen και προσεκτικό καθαρισμό. Ένας ακόμα λόγος που μπορεί να μην λειτουργεί σωστά είναι η λάθος ή μη-σύνδεση του στο τροφοδοτικό σύστημα. Με την παρατήρηση του συστήματος και την χρήση του εγχειριδίου οδηγιών είναι δυνατό να συνδεθεί σωστά στην τροφοδοσία, εάν όμως συνεχίσει να μην λειτουργεί, τότε μπορεί να υπάρχει πρόβλημα με τα εξαρτήματα του ή τα καλώδια του τροφοδοτικού συστήματος.



Ψυκτικό σύστημα εκτυπωτή Ender 3- Pro

Κάποιοι τρόποι διόρθωσης του προβλήματος ακόμα είναι η ρύθμιση της ταχύτητας της εκτύπωσης σε χαμηλότερη ταχύτητα από το πρόγραμμα slicer. Αυτό όμως ενδέχεται να δημιουργήσει περεταίρω προβλήματα, καθώς η παραμονή του υπερθερμασμένου στομίου πάνω από το εκτυπωμένο υλικό για παρατεταμένο χρονικό διάστημα μπορεί να θερμάνει το υλικό σε βαθμό που μπορεί να φτάσει στο glass transition level του, δημιουργώντας σημεία παραμόρφωσης (warping) στην εκτύπωση, ένα πρόβλημα που θα αναλυθεί παρακάτω. Ένας τρόπος αποφυγής αυτού του θέματος, είναι να ρυθμιστεί η ταχύτητα και ο βαθμός στον οποίο το στόμιο απομακρύνεται το στόμιο από την εκτύπωση κάθε φορά που χρειάζεται να μετατοπιστεί (nozzle retraction speed και nozzle retraction distance). Αυτό όμως μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της διάρκειας της εκτύπωσης χωρίς μεγάλο βαθμό βελτίωσης. Ο πιο σωστός τρόπος αποφυγής είναι λοιπόν η σωστή συντήρηση του μηχανήματος και η καθαριότητα και παρακολούθησή του.

7. Warping, ή παραμόρφωση του αντικειμένου της εκτύπωσης.

Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατόν να παρατηρηθεί αλλοίωση και παραμόρφωση του εκτυπωμένου αντικειμένου. Αυτές οι παραμορφώσεις συνήθως παίρνουν την μορφή καμπυλώματος του υλικού και συμπίεσης του ή αποκόλλησής του από την πλάκα κατασκευής. Ο λόγος που εμφανίζονται συνήθως αυτές οι παραμορφώσεις είναι ο εξής: Το υλικό επαναθερμαίνεται, είτε από το θερμασμένο στόμιο που κινείται από πάνω του κατά την διάρκεια της εκτύπωσης για να περάσει ένα νέο στρώμα υλικού είτε από την εκτυπωτική πλάκα και φτάνει στην θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσής του, δηλαδή στην θερμοκρασία που η ημικρυσταλλική μορφή του υλικού αρχίζει να γίνεται άμορφη και παχύρρευστη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να συστέλλεται όταν ψυχεται πάλι και να δημιουργεί τις προαναφερόμενες παραμορφώσεις. Το φαινόμενο συμβαίνει αρκετά συχνά στην αρχή της εκτύπωσης όταν οι πρώτες «γραμμές» υλικού θερμαίνονται ταυτόχρονα από το στόμιο και την πλάκα κατασκευής, αλλά ψύχονται όσο εναποθέτεται επιπλέον υλικό πάνω τους, με αποτέλεσμα να συστέλλεται και να αποκολλάται από την επιφάνεια. Συχνά επίσης συμβαίνει όταν το υλικό ψύχεται απότομα από το περιβάλλον του, για παράδειγμα ακόμα και η διαφορά στην εποχή μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση καθώς το ψύχος του χειμώνα μπορεί να χαμηλώνει την θερμοκρασία του δωματίου και να προκαλεί παραμορφώσεις στα σημεία που το θερμό υλικό κοντά στην πλάκα κατασκευής και το ψυχρό υλικό στα υψηλότερα στρώματα εφάπτονται.



Το φαινόμενο της παραμόρφωσης σε εκτυπωμένο πολυγαλακτικό οξύ, ο σκοπός της εκτύπωσης ήταν η δημιουργία επίπεδων βάσεων.

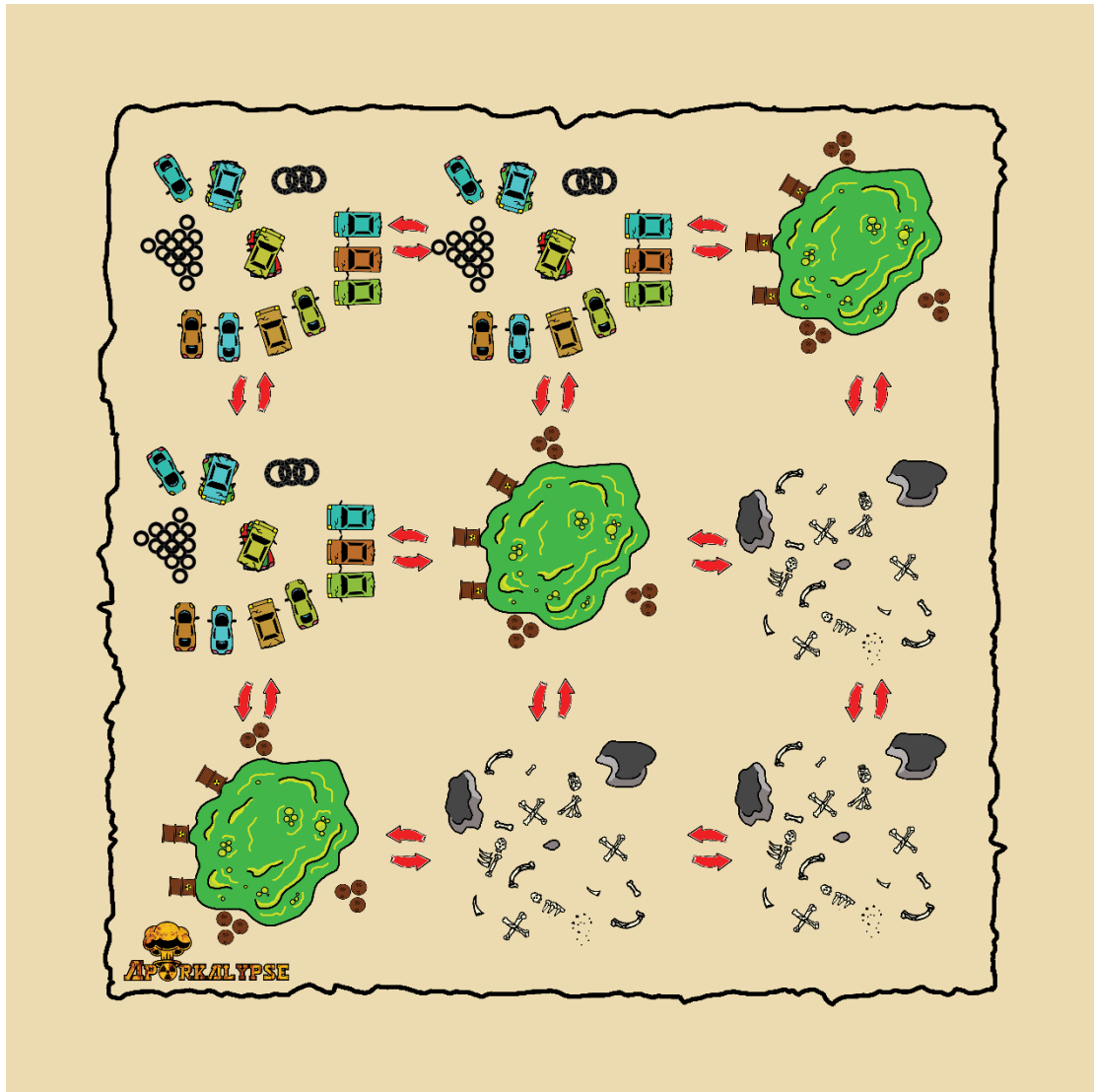
Το φαινόμενο της παραμόρφωσης μπορεί να αποφευχθεί διατηρώντας όσο περισσότερο γίνεται την θερμοκρασία της εκτύπωσης σταθερή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε διατηρώντας την θερμοκρασία του δωματίου με κάποιο σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας, ή πιο εύκολα με θερμαινόμενο περίβλημα εκτυπωτή. Το θερμαινόμενο περίβλημα διατηρεί την θερμοκρασία του άμεσου περιβάλλοντος του εκτυπωτή σταθερή συνήθως αποτρέποντας το φαινόμενο της παραμόρφωσης. Τα μειονεκτήματα είναι πως αυτό το εξάρτημα είναι μία επιπλέον δαπάνη που πρέπει να γίνει και πως γίνεται δυσκολότερος ο έλεγχος της εκτύπωσης κατά την διάρκειά της, καθώς σκεπάζει τον εκτυπωτή. Υπάρχει τρόπος ο καταναλωτής να δημιουργήσει με μονωτικά υλικά όπως ύφασμα, ξύλο ή πλαστικό μια λειτουργικότητα του πρόχειρου περιβλήματος είναι αμφίβολη. (Lamin Kivelä 2020)



Το φαινόμενο του Warping σε εκτυπωμένο αντικείμενο. Πηγή: "KamerMaker - Demo" by faberdasher is licensed under CC BY 2.0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΤΟ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ & ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

Το τελικό προϊόν της εργασίας είναι το επιτραπέζιο στο οποίο έδωσα τον τίτλο “Apokalypse”. Όπως ανέφερα και νωρίτερα, ο στόχος για το παιχνίδι ήταν να έχει εύκολους κανόνες και τρόπο επίλυσης κινήσεων, να παίζεται και να στήνεται γρήγορα και να έχει το μεγαλύτερο τμήμα του εκτυπωμένο με την μέθοδο της προσθετικής παραγωγής. Επιπλέον θεματικά, τραβάει στοιχεία από ταινίες μετα-αποκαλυπτικού περιεχομένου. Τα στοιχεία αυτά επιλέχθηκαν μετά από αρκετή έρευνα στον χώρο του επιτραπέζιου. Βλέποντας τους νικητές και τους επιλαχόντες των πιο πρόσφατων βραβείων Ennie (https://ennie-awards.com/2020-nominees_winners/) βραβεία επιτραπέζιων παιχνιδιών και παιχνιδιών ρόλων), ανακαλύφθηκε το γεγονός πως τα πιο διακεκριμένα παιχνίδια διέθεταν τα εξής στοιχεία: Σύντομος χρόνος παιχνιδιού (BFF! Best Friends Forever), απλοί και κατανοητοί κανόνες που μαθαίνονται εύκολα για να ξεκινήσει το παιχνίδι συνήθως με την χρήση παραδοσιακών μέσων όπως οι κάρτες και τα απλά ζάρια (Royal Blood, Quest, The Excellents, Jim Henson’s the Labyrinth Adventure Game, BFF! – Best Friends Forever), χρήση ταμπλό, πιονιών και λοιπών αντικειμένων αναπαράστασης (Zombie World, BFF!), μίξη παραδοσιακών παραμυθιών και γνώριμων εικόνων και καταστάσεων (Berlin, the Wicked City, Jim Henson’s The Labyrinth Adventure Game, BFF!, The Excellents) και μετα-αποκαλυπτικό θέμα (Zombie World, Ultraviolet Grasslands, MÖRK BORG). Αποφασίστηκε λοιπόν το επιτραπέζιο να έχει ταμπλό, να κάνει χρήση απλών συστημάτων αλληλεπίδρασης και επίλυσης ανταγωνιστικών ενεργειών όπως είναι τα παραδοσιακά εξάπλευρα ζάρια, το θέμα του να συνδέει κάτι παραδοσιακό και γνώριμο, το παραμύθι «Τα τρία γουρουνάκια» και μοντέρνα μετα-αποκαλυπτική σκηνογραφία όπως αυτή που παρουσιάζεται σε διάφορες δημοφιλείς ταινίες της δεκαετίας του ’80. Επιπλέον, θα περιέχει διακοσμητικές φιγούρες οι οποίες θα τοποθετούνται στον χάρτη για να το κάνει πιο ελκυστικό σε συλλέκτες. Το ταμπλό και οι κάρτες που θα χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των πόντων σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Adobe Photoshop. Το ταμπλό αποφασίστηκε να είναι 20 επί 20 ίντσες (50.8 επί 50.8 εκατοστά), όπως είναι παραδοσιακά τα ταμπλό του σκακιού (Πηγή: <https://handbook.fide.com/chapter/C02>) και οι κάρτες αποφασίστηκε να είναι 56 επί 87 χιλιοστά, το οποίο είναι το “Standard American” μέγεθος που χρησιμοποιούν πολλά δημοφιλή παιχνίδια με κάρτες όπως το Magic: The Gathering της εταιρείας Wizards of the Coast, το Munchkin της εταιρείας Steve Jackson Games και πολλά ακόμα. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ευκολία στην εύρεση προστατευτικών για τις κάρτες, κάτι το οποίο συνηθίζεται από τους καταναλωτές. Ενώ τα περισσότερα εξαρτήματα του παιχνιδιού εκτυπώθηκαν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή, το ταμπλό και οι κάρτες θα τυπωθούν με την μέθοδο της ψηφιακής εκτύπωσης, σε λαμιναρισμένο χαρτόνι, για αντοχή.



Πρωτότυπο ταμπλό παιχνιδιού, σχεδιάστηκε από τον Νικόλαο Νεκτάριο Αρβανιτέλλη το 2020. Περιέχει και bleed για εκτύπωση. Περιέχει εννέα διαφορετικές «περιοχές» στις οποίες μπορούν να κινηθούν οι παίκτες.



Το λογότυπο του παιχνιδιού, σχεδιασμένο με την βοήθεια του κυρίου Ηλία Νικά-Λέπουρα το 2021.

Τελικά συμπεράσματα



Το επιτραπέζιο παιχνίδι τελειοποιημένο

Για την κατασκευή της τελικής μορφής του επιτραπέζιου παιχνιδιού σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Photoshop, πέρα από το προαναφερόμενο ταμπλό του παιχνιδιού, αρκετές κάρτες, των οποίων η χρήση εξηγείται στο τμήμα «Στήσιμο και κανόνες» παρακάτω. Στην συνέχεια, το ταμπλό και οι κάρτες εκτυπώθηκαν σε επιχρισμένο χαρτί 200 gsm για τους σκοπούς της παρουσίασης.

Βλέποντας την τελική κατασκευή του επιτραπέζιου μπορώ πλέον να πω πως η μέθοδος της προσθετικής παραγωγής και ειδικά η μέθοδος FDM είναι αρκετά κατάλληλη για την κατασκευή επιτραπέζιων παιχνιδιών. Το κόστος του μηχανήματος και του υλικού σε συνδυασμό με το κόστος του ταμπλό και των καρτών είναι αρκετά χαμηλό με καλά αποτελέσματα. Ίσως εάν επαναλάμβανα την διαδικασία από την αρχή να επέλεγα την χρήση εκτυπωτή στερεολιθογραφίας ώστε να επιτύχω καλύτερες λεπτομέρειες στα εκτυπωμένα μοντέλα αλλά αυτό θα σήμαινε και την αύξηση του κόστους παραγωγής. Κατά την διάρκεια της εργασίας, απέκτησα αρκετές γνώσεις και για τις διάφορες μεθόδους της προσθετικής παραγωγής αλλά και για τα υλικά που χρησιμοποιούν, τον σχεδιασμό επιτραπέζιων παιχνιδιών και τις τάσεις της αγοράς σε αυτό τον τομέα.

Χρόνος διεκπεραίωσης:

Ο χρόνος διεκπεραίωσης των εκτυπωμένων αντικειμένων με την μέθοδο της προσθετικής παραγωγής ήταν σύνολο περίπου 26 ώρες. Το βάψιμο των αντικειμένων ήταν επιπλέον 6 ώρες. Η εκτύπωση και κοπή όλων των καρτών και του ταμπλό διήρκεσε επιπλέον 2 ώρες. Συνολικά 34 ώρες για την ολοκλήρωση του επιτραπέζιου.

Αναλυτικό κόστος υλικών και συσκευών εργασίας:

- Creality Ender-3 Pro: 279 Ευρώ
- Real PLA Filament 1.75mm Spool of 0.5 kg: 15 Ευρώ
- Ακρυλικό Σπρέι (αστάρι): 15 Ευρώ
- 10 ακρυλικές μπογιές: 30 Ευρώ
- Κόστος εκτύπωσης καρτών και ταμπλό: 20 Ευρώ
- **Συνολικό κόστος εκπόνησης εργασίας: 359 Ευρώ**

Το Παιχνίδι

Στο παιχνίδι Apokalypse οι παίκτες (δύο ως τέσσερις) λαμβάνουν τους ρόλους των ηρώων του κλασικού παραμυθιού «Τα τρία γουρουνάκια», με μία ανατροπή, αντί για σπίτια από τούβλα, άχυρα και ξύλο, τα γουρουνάκια μένουν σε ένα μεγάλο όχημα το οποίο έχει επειγόντως ανάγκη για επισκευές. Για να κερδίσουν, τα γουρουνάκια πρέπει να μαζέψουν τα εξαρτήματα που χρειάζονται από την μάντρα του κακού λύκου και να ξεφύγουν. Το παιχνίδι είναι ανταγωνιστικό, με έναν παίκτη να λαμβάνει τον ρόλο του λύκου (ο οποίος αποφασίζεται με το ρίξιμο ζαριών από όλους τους παίκτες, με τον παίκτη που έριξε την μεγαλύτερη ζαριά να αναλαμβάνει τον ρόλο του λύκου) και τους υπόλοιπους να αναλαμβάνουν τον ρόλο των γουρουνιών.

Στήσιμο και κανόνες παιχνιδιού: Το ταμπλό ανοίγεται και τα διακοσμητικά τοποθετούνται πάνω του. Οι παίκτες ρίχνουν ζάρια για να αποφασιστεί ποιος θα ελέγχει τον κακό λύκο για αυτό τον γύρο και έπειτα ο λύκος λαμβάνει την κάρτα χαρακτηριστικών του. Η κάρτα χαρακτηριστικών δείχνει μερικά σημαντικά στατιστικά για τους χαρακτήρες. Το χαρακτηριστικό **“attack”** δείχνει ποιόν αριθμό και πάνω πρέπει να φέρουν οι παίκτες σε μία ζαριά επίθεσης για να αφαιρέσουν έναν πόντο **“health”** ή «υγείας», από τον αντίπαλό τους. Το χαρακτηριστικό **“defend”** δείχνει ποιόν αριθμό πρέπει να φέρουν για να μην χάσουν ένα πόντο «υγείας» από μία ζαριά επίθεσης. Το χαρακτηριστικό **“health”** αναπαριστά τους συνολικούς πόντους υγείας με τους οποίους ξεκινούν οι παίκτες το παιχνίδι. Σε περίπτωση που αυτό φτάσει στο μηδέν, τότε το αντίστοιχο πιόνι αφαιρείται από το ταμπλό, οι πόντοι υγείας του επιστρέφουν στο μέγιστο και στην περίπτωση που ήταν γουρουνάκι, χάνει μία από τις τρεις «ζωές» του. Αν δεν έχει άλλη ζωή τότε δεν μπορεί να επανέλθει στο ταμπλό καθώς ο χαρακτήρας είναι υπερβολικά κουρασμένος. Ο λύκος, δεν διαθέτει ζωές και μπορεί να επανέλθει όσες φορές θέλει στο ταμπλό. Αν όλα τα γουρουνάκια ξεμείνουν από ζωές, τότε ο λύκος κερδίζει. Τέλος, το χαρακτηριστικό **“moves”** δείχνει πόσες κινήσεις μπορεί να κάνει ο κάθε χαρακτήρας στον γύρο του. Όσον αφορά τις κάρτες χαρακτηριστικών, ενώ τα «τρία γουρουνάκια» έχουν σταθερές αξίες στα χαρακτηριστικά τους, ο λύκος, που λειτουργεί ως ο κύριος ανταγωνιστής του παιχνιδιού, γίνεται δυνατότερος ανάλογα με τον αριθμό των παικτών που συμμετέχουν στο παιχνίδι ως γουρουνάκια. Αυτό συμβολίζεται στην κάρτα του με το σύμβολο «P» στα χαρακτηριστικά του. Το P είναι ο αριθμός των παικτών (players) που συμμετέχουν στο παιχνίδι και ελέγχουν τα τρία γουρουνάκια, οπότε για παράδειγμα, σε ένα παιχνίδι με τον λύκο και ένα γουρουνάκι ο λύκος θα έχει attack 4+, defend 4+, health 2 και moves 2.

	
Blue Pig	Green Pig
Attack: 4+	Attack: 3+
Defend: 3+	Defend: 4+
Health: 3	Health: 3
Moves: 3	Moves: 3

Οι κάρτες χαρακτηριστικών για το μπλε και το πράσινο γουρουνάκι

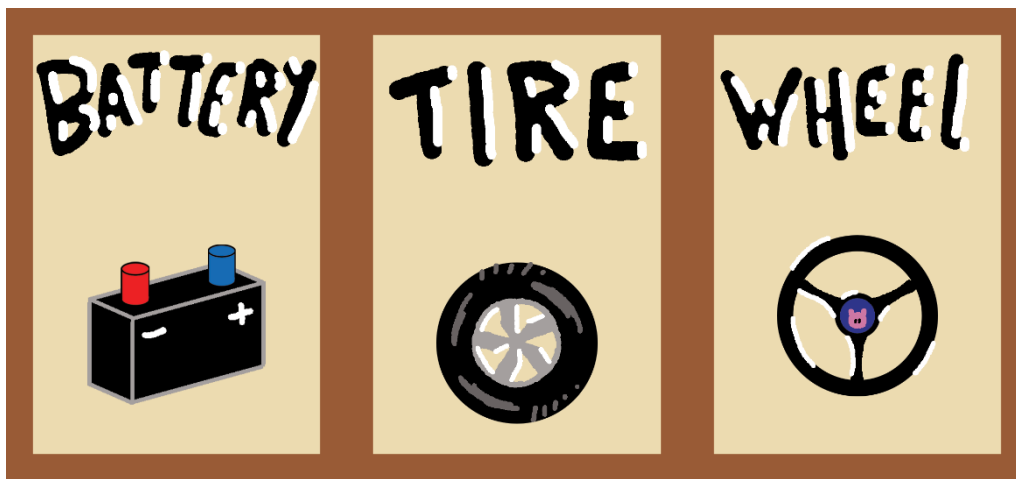
	
Red Pig	Wolf
Attack: 4+	Attack: 5-P+
Defend: 4+	Defend: 5-P+
Health: 4	Health: 1+P
Moves: 3	Moves: 1+P

Οι κάρτες χαρακτηριστικών για το κόκκινο γουρουνάκι και τον λύκο

Αφού ο λύκος λάβει την κάρτα χαρακτηριστικών του, οι υπόλοιποι παίκτες ανακατεύουν τις εναπομείναντες κάρτες χαρακτηριστικών και λαμβάνουν μία στην τύχη. Αφού όλοι οι παίκτες έχουν λάβει κάρτες χαρακτηριστικών, οι παίκτες που ελέγχουν τα γουρουνάκια πρέπει να ρίξουν ζάρια για να αποφασιστούν τα εξαρτήματα που πρέπει να μαζέψουν για να κερδίσουν το παιχνίδι. Τα εξαρτήματα, όπως και τα διάφορα τμήματα του ταμπλό χωρίζονται σε τρία επίπεδα, με τα εξαρτήματα που βρίσκονται στα επίπεδα 2 και 3 να βρίσκονται πιο «μακριά» από το τμήμα του ταμπλό που ξεκινούν τα τρία γουρουνάκια, το οποίο τα κάνει δυσκολότερα στην εύρεση. Οι παίκτες ρίχνουν τρεις ζαριές (μία για κάθε επίπεδο) στον παρακάτω πίνακα, διαιρώντας το αποτέλεσμα στα δύο και στρογγυλοποιώντας προς τα πάνω, για να αποφασίσουν ποιο εξάρτημα από κάθε επίπεδο ψάχνουν.

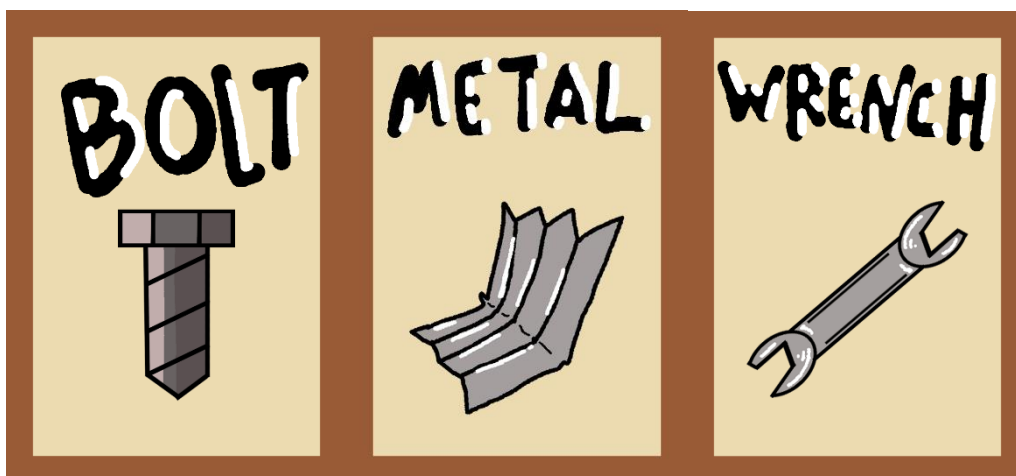
	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
Αποτέλεσμα ζαριάς 1	Tire	Bolt	Light bulb
Αποτέλεσμα ζαριάς 2	Wheel	Wrench	Mirror
Αποτέλεσμα ζαριάς 3	Battery	Metal	Gas

Αφού αποφασιστούν και τα εξαρτήματα για κάθε γουρουνάκι ξεχωριστά, ο παίκτης που ελέγχει τον λύκο πρέπει να ανακατέψει τις στοίβες καρτών της κάθε περιοχής. Οι στοίβες στις αριστερά περιοχές, που αναπαρίστανται ως μάντρες αυτοκινήτων πρέπει να περιέχει η κάθε μία τρεις τυχαίες κάρτες εξαρτημάτων πρώτου επιπέδου και επτά κάρτες "junk".



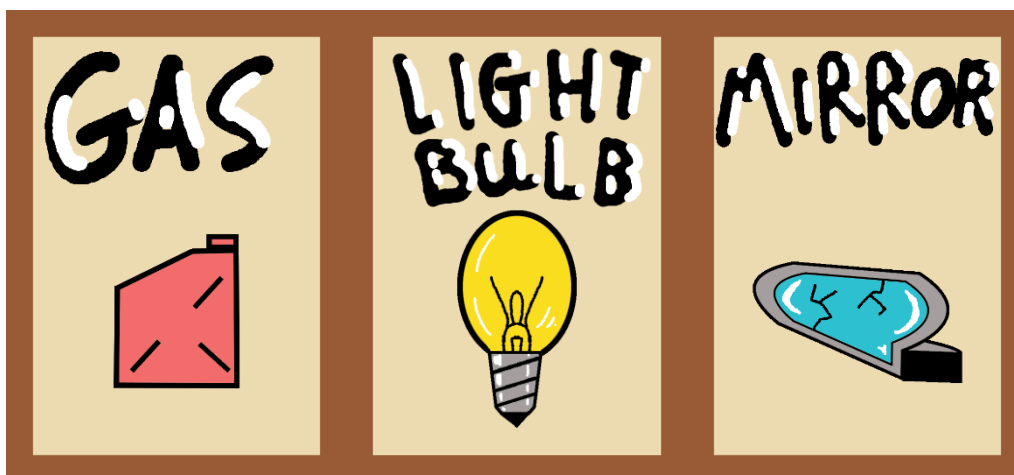
Κάρτες εξαρτημάτων πρώτου επιπέδου

Οι στοίβες στις μεσαίες περιοχές που αναπαρίστανται ως ραδιενεργές λίμνες πρέπει να περιέχουν τέσσερις τυχαίες κάρτες εξαρτημάτων δεύτερου επιπέδου και έξι κάρτες "junk".



Κάρτες εξαρτημάτων δεύτερου επιπέδου

Οι στοίβες στις δεξιές περιοχές που αναπαρίστανται ως βραχώδεις φωλιές λύκων πρέπει να περιέχουν πέντε κάρτες εξαρτημάτων τρίτου επιπέδου και πέντε κάρτες "junk". Αφού ο λύκος τοποθετήσει κρυφά τις στοίβες με τις κάρτες, το παιχνίδι είναι έτοιμο να ξεκινήσει.



Κάρτες εξαρτημάτων τρίτου επιπέδου

Τα γουρουνάκια ξεκινάνε πάντα πρώτα με τις κινήσεις τους και αφού τελειώσουν όλα, με την σειρά που αποφασίζουν μεταξύ τους από την αρχή του παιχνιδιού, τότε παίζει ο λύκος. Στους γύρους των παικτών, μπορούν να κάνουν όσες κινήσεις τους επιτρέπει η κάρτα χαρακτηριστικών τους. Στην περίπτωση των γουρουνιών, μπορούν να κάνουν τρεις, ενώ στην περίπτωση του λύκου, αλλάζουν ανάλογα με το πόσα γουρουνάκια παίζουν. Οι κινήσεις που μπορούν να κάνουν τα γουρουνάκια είναι οι εξής:

- Να εισάγουν το πιόνι τους στο ταμπλό στην πάνω αριστερά περιοχή.
- Να μετακινηθούν μεταξύ δύο περιοχών που συνδέονται με κόκκινα βέλη.
- Να «ψάξουν» στην περιοχή που βρίσκονται, σηκώνοντας και βλέποντας την πάνω κάρτα της στοίβας καρτών στην περιοχή που βρίσκονται και αποφασίζοντας αν θέλουν να την κρατήσουν ή να την βάλουν στον πάτο της στοίβας.
- Να επιτεθούν στον λύκο ρίχνοντας μία ζαριά επίθεσης.
- Να αμυνθούν σε μία επίθεση του λύκου. Αυτή η κίνηση γίνεται μόνο στον γύρο του λύκου και καταναλώνει μία κίνηση από τον επόμενο γύρο του γουρουνιού.
- Να αφήσουν την κάρτα εξαρτήματος που κρατάνε στο όχημά τους.

Ο λύκος παίζει αφού τα γουρουνάκια τελειώσουν τους γύρους τους και μπορεί να κάνει τις ακόλουθες κινήσεις:

- Να εισάγει το πιόνι του στην κάτω δεξιά περιοχή.
- Να μετακινηθεί μεταξύ δύο περιοχών που συνδέονται με κόκκινα βέλη.
- Να δει τις πρώτες δύο κάρτες στην στοίβα της περιοχής στην οποία βρίσκεται και να τοποθετήσει όποιες θέλει στον πάτο της στοίβας.
- Να επιτεθεί σε ένα γουρουνάκι με μία ζαριά επίθεσης.
- Να αμυνθεί σε μία επίθεση των γουρουνιών. Αυτή η κίνηση γίνεται μόνο στον γύρο του λύκου και καταναλώνει μία κίνηση από τον επόμενο γύρο του γουρουνιού.

Ο σκοπός των γουρουνιών στο παιχνίδι είναι να φέρουν πίσω στο «όχημά» τους τα εξαρτήματα που έριξαν στην αρχή του παιχνιδιού. Τα γουρουνάκια μπορούν να «κουβαλούν» μόνο ένα εξάρτημα την φορά και το αφήνουν στο όχημά τους πηγαίνοντας στην πάνω αριστερή περιοχή και «ξοδεύοντας» μία κίνηση. Στην περίπτωση που ένα γουρουνάκι ξεμείνει από πόντους υγείας ενώ κουβαλάει ένα εξάρτημα, το εξάρτημα τοποθετείται πάνω στην στοίβα της περιοχής που βρέθηκε πιο πρόσφατα. Εάν κάποιο γουρουνάκι ξεμείνει από ζωές και έχει ακόμα συμπαίκτες, οι συμπαίκτες του, αφού τελειώσουν τις δικές τους λίστες εξαρτημάτων μπορούν να μεταφέρουν και τις εναπομείναντες κάρτες του γουρουνιού που βγήκε από το παιχνίδι και να κερδίσουν έτσι. Εάν κάποιο γουρουνάκι τελειώσει την λίστα του και δεν εκκρεμεί λίστα από κάποιο άλλο γουρουνάκι που βγήκε από το παιχνίδι, το πιόνι του αφαιρείται από το ταμπλό για να «επισκευάσει το όχημα», αλλά μπορεί να επανέλθει ξοδεύοντας μία κίνηση στην περίπτωση που κάποιο άλλο γουρουνάκι βγει από το παιχνίδι χωρίς να τελειώσει την λίστα του. Εάν όλα τα γουρουνάκια βγουν από το παιχνίδι πριν τελειώσουν τις λίστες τους, κερδίζει ο λύκος. Αλλιώς, κερδίζουν τα γουρουνάκια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- "12 - 3D-printed EUR pallet (scale model)" by Creative Tools is licensed under CC BY 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/22991c80-b33c-4fa0-97e5-844812cf20b8>
- "15 mm long #3DBenchy printed on a formlabs form2.creativetools.se - 3D printer - 3Dprinter - SLA 3dprinting 3d printing" by Creative Tools is licensed under CC BY 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/2b24d23c-18bf-44ce-b739-f4430ac4bda4>
- "3D printed titanium bike part from @chargebikes, a rear dropout, amazingly light and strong" by GavinBell is licensed under CC BY-NC-ND 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/5856437e-6d89-4ab5-b1e6-84fbe47d6d3a>
- "3D Printer" by Danny Choo is licensed under CC BY-SA 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/ab88dd4f-c80c-4240-8137-d8d1e934f9df>
- "A block of nylon powder is removed from the Shapeways 3D Printer, ready for the 3D Printed parts to be removed, cleaned and shipped." by Shapeways: is licensed under CC BY-NC-ND 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/55cbc744-3cb7-4352-97a5-7195842e0b5b>
- "ABS Prints!" by Volpin is licensed under CC BY-NC-ND 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/29a78c91-2361-404d-bc47-e9d20919f1d5>
- "Additive Manufacturing Resin Tray Formlabs" by Formlabs Inc. is licensed under CC BY 2.0. <https://formlabs.com/3d-printers/>
- "Among the wonders of #ces2016 was this wood 3D print of an octopus." by SusanBroman is licensed under CC BY-NC 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/8a9b6952-dc3d-424b-ba31-15f63db347ca>
- "Dental-SG-curing" by Creative Tools is licensed under CC BY 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/dc61a671-978a-49f4-8936-8f5a06881650>
- "Examples of SLS printed items by D2W" by Rain Rabbit is licensed under CC BY-NC 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/20d08ab9-3234-4882-935a-6f5c5a7650f0>
- "Examples of SLS printed items by D2W" by Rain Rabbit is licensed under CC BY-NC 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/c37b3c1c-24b7-41b1-b441-0f99356134b0>
- "Gold plated brass 3d printed sun sprocket grip rings" by Euphy is licensed under CC BY 2.0

- <https://search.creativecommons.org/photos/3bc43cda-7fac-426a-a3ee-8be2f2e3298a>
- "KamerMaker - Demo" by faberdasher is licensed under CC BY 2.0
<https://search.creativecommons.org/photos/78b49924-6785-4007-9ab8-2cee7f0de72e>
 - "Macro shot of Stainless Steel 3D print from 3D scan." by Shapeways: is licensed under CC BY-NC-ND 2.0
<https://search.creativecommons.org/photos/18b15547-664f-404f-ab86-a08dfbd0cea2>
 - "Petg print" by Robosprouit is licensed under CC BY 2.0
<https://search.creativecommons.org/photos/0c067a9a-c58e-4446-aa51-7b0bf6ad4e2d>
 - "Petg print" by Robosprouit is licensed under CC BY 2.0
<https://search.creativecommons.org/photos/b558a81e-e8a9-4e74-8da0-3b7e1e8e05d0>
 - "Pokemon Go Ball 1POKEMON BALL2" by themodelmaker is licensed under CC BY-NC-SA 2.0
<https://search.creativecommons.org/photos/b558a81e-e8a9-4e74-8da0-3b7e1e8e05d0>
 - "Removing a miniature 3D Printed model from a tray of nylon powder" by Shapeways: is licensed under CC BY-NC-ND 2.0
<https://search.creativecommons.org/photos/fe4e1d9f-541a-47fb-8c92-38370987516d>
 - "The Fuel3D handheld 3D scanner!" by Creative Tools is licensed under CC BY 2.0 <https://search.creativecommons.org/photos/f2cb6858-8cbc-4918-afea-a24a2151ef05>
 - "Volkswagen Golf GTI - Low Poly Miniature" by FLOWALISTIK is licensed under the Creative Commons - Attribution - Non-Commercial - Share Alike license. <https://www.thingiverse.com/thing:2133815>
 - 3D Experience Material jetting - MJ, NPJ, DOD
<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-jetting>
 - 3d hubs, Binder Jetting, an introduction,
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
 - 3D systems, DMP Flex 350 <https://www.3dsystems.com/3d-printers/dmp-flex-350>
 - 3dHubs, 3D printing in Resin <https://www.3dhubs.com/3d-printing/plastic/resin/>
 - 3ERP 2019, A Beginner's Guide to Jewellery 3D Printing Methods
<https://www.3erp.com/blog/a-beginners-guide-to-jewellery-3d-printing-methods/>

- Adam Ellis, 2017, High Speed Sintering: The Next Generation of Additive Manufacturing Shlomo Magdassi, Alexander Kamyshny – “Nanomaterials for 2D and 3D Printing”
- Alastair Jennings 2021, Troubleshooting Guide to Common 3D Printing Problems, <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>
- Alkaios Bournias Varotsis, Introduction to FDM 3D printing, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#what>
- Alkaios Bournias Varotsis, Introduction to SLA 3D printing <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
- All3DP 2020, 3D Printer Filament Buyer’s Guide <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>
- all3dp 2021 types of 3d printing technology <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- Amir Abdullah Muhamad Damanhuri, Azian Hariri, Mohd Rizal Alkahari, Siti Farhana, Zainal Bakri, Indoor Air Concentration from Selective Laser Sintering 3D Printer using Virgin Polyamide Nylon (PA12) Powder: A Pilot Study https://www.researchgate.net/figure/Typical-SLS-chamber14_fig1_335789906
- ammaryasir 2020, AYF single/dual part 4010 fan duct <https://www.thingiverse.com/thing:4693548>
- Anatol Locker, 2016, ABS Filament for 3D Printing – All You Need to Know <https://all3dp.com/abs-3d-printer-filament-explained/>
- Arun Kumar Shrivastav 2020, Metal Fill filaments <https://all3dp.com/2/3d-printer-metal-filament-basics-best-brands/>
- Arun Kumar Shrivastav 2021, 2021 Dental 3D Printing Guide: All You Need to Know <https://all3dp.com/2/dental-3d-printing-guide/>
- Arun Kumar Shrivastav, 2020, 3D Printer Metal Filament: The Basics & Best Brands <https://all3dp.com/2/3d-printer-metal-filament-basics-best-brands/>
- Axel Barrett, 2020, Advantages and Disadvantages of PLA <https://bioplasticsnews.com/2020/06/09/polylactic-acid-pla-disadvantages/>
- Beamler, 3D printing in Aluminum, <https://www.beamler.com/3d-printing-capabilities/materials/aluminum/>
- Brian Obudho 2020, 3D Print Stringing: 5 Easy Ways to <https://all3dp.com/2/3d-print-stringing-easy-ways-to-prevent-it/>
- Cambridge Dictionary, Ορισμός της έκφρασης 3D Printing <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/3-d-printing>

- Ceresana 2020, Bioplastics Market Report
<http://www.ceresana.com/en/market-studies/plastics/bioplastics>
- Charlie Godfrey 2017, 3D Printing Bio-composites,
<https://www.instructables.com/3D-Printing-High-Strength-Bio-composites/>
- Colorfabb Wood fill filament <https://colorfabb.com/woodfill>
- creality 3d store <https://www.creality3dshop.eu/>
- Derelict Station Wagon (28mm/Heroic scale) by dutchmogul is licensed under the Creative Commons - Attribution - Share Alike license.
<https://www.thingiverse.com/thing:2481684>
- dutchmogul 2013, Emer Emerson: Pigman Pathfinder
<https://www.thingiverse.com/thing:81372>
- Emmett Grames 2020, SLA Ultimate Guide <https://all3dp.com/1/sla-3d-printing-guide/>
- Emmett Grames 2021, TPU Filament: The Basics & Best Brands 2021
<https://all3dp.com/2/tpu-filament-explained-and-compared/>
- Ennies 2020 Nominees and Winners https://ennie-awards.com/2020-nominees_winners/
- Essyrose Mathew, Giulia Pitzanti, EnekoLarrañeta, Dimitrios A. Lamprou, 3D Printing of Pharmaceuticals and Drug Delivery Devices,Open AccessEditorial3D Printing of Pharmaceuticals and Drug Delivery Devices
<https://www.mdpi.com/1999-4923/12/3/266/htm>
- Farooq Azam, Ahmad-Majdi Abdul-Rani, Khurram Altaf, Haizum Aimi Zaharin, An In-Depth Review on Direct Additive Manufacturing of Metals
https://www.researchgate.net/figure/Electron-Beam-Melting-EBM-mechanism-Source-arcamcom_fig1_323791292
- Filboyt 2018, Ender 3 Filament Guide,
<https://www.thingiverse.com/thing:2917932>
- Formlabs, Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing
<https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- Formlabs, Using High Temp Resin
https://support.formlabs.com/s/article/Using-High-Temp-Resin?language=en_US
- Gizmodorks, Metal fill filament <https://gizmodorks.com/3d-printing-metal-filled-filament/>
- Guo Liang Goh, Shweta Agarwala, Wai Yee Yeong, Shweta Agarwala, Wai Yee Yeong January 2019, Directed and On-Demand Alignment of Carbon Nanotube: A Review toward 3D Printing of Electronics
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admi.201801318>
- Hanna Watkin 2016, Fiber-Reinforced Nylon as Strong as Aluminium
<https://all3dp.com/fiber-reinforced-nylon/>

- Hanna Watkin 2018, Ackuretta Launches New 3D Printing Ceramic Resin <https://all3dp.com/4/ackuretta-launches-new-3d-printing-ceramic-resin/>
- Hannah Augur 2016, Nervous System 3D Prints Cups With Porcelite Ceramic Resin <https://all3dp.com/nervous-system-3d-prints-porcelain-cups-porcelite-ceramic-resin/>
- Helena Dodziuk, 2016, Applications of 3D printing in healthcare <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5071603/>
- Hironori Kondo 2019, 3D Printing with PETG: Print Settings & Tips <https://all3dp.com/2/3d-printing-with-petg-how-to-succeed/>
- Hong Wei Tan, Jia An, Chee Kai Chua, Tuan Tran 2019, Metallic Nanoparticle Inks for 3D Printing of Electronics <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aelm.201800831>
- Karen Ditsch, Ender 3 (Pro/V2) Print Speed: The Perfect Settings <https://all3dp.com/2/ender-3-print-speed-all-you-need-to-know/>
- Ingo Reinhold, 2017 Thermal Sintering, “Nanomaterials for 2D and 3D Printing” Shlomo Magdassi, Alexander Kamyshny
- International Chess Federation, C. General Rules and Technical Recommendations for Tournaments / 02. Standards of Chess Equipment, venue for FIDE Tournaments, rate of play and tie-break regulations <https://handbook.fide.com/chapter/C02>
- Jackson O'Connell 2021, Ender 3 (Pro/V2) Laser Engraver Upgrade: How to Install It, <https://all3dp.com/2/ender-3-laser-engraver-upgrade-all-you-need-to-know/>
- Joris Peels 2018, 3D Printing Cookson Gold: We Interview David Fletcher Gold and Other Precious Metals with <https://3dprint.com/223015/3d-printing-gold-and-other-precious-metals-with-cookson-gold-we-interview-david-fletcher/>
- Joseph Flynt A Detailed History of 3D Printing <https://3dinsider.com/3d-printing-history/>
- Julien Gardan, DuyCuong Nguyen, Roucoules Lionel, Guillaume Montay, Characterization of Wood Filament in Additive Deposition to Study the Mechanical Behavior of Reconstituted Wood Products [https://www.researchgate.net/publication/311259840 Characterization of Wood Filament in Additive Deposition to Study the Mechanical Behavior of Reconstituted Wood Products](https://www.researchgate.net/publication/311259840_Characterization_of_Wood_Filament_in_Additive_Deposition_to_Study_the_Mechanical_Behavior_of_Reconstituted_Wood_Products)
- Ksawery Szykiedans, Wojciech Credo, Dymitr Osiński, Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817307531>
- Kuang-Hua Chang, 2015, Rapid Prototyping <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/rapid-prototyping>

- Lamin Kivelä 2020, 3D Print Warping: 10 Easy Fixes for PLA, PETG & ABS <https://all3dp.com/2/3d-print-warping-what-it-is-how-to-fix-it/>
- Leo Gregurić 2020 <https://all3dp.com/2/3d-printing-for-beginners-all-you-need-to-know-to-get-started/>
- Leo Gregurić, 2019, SLS 3D Printing: Selective Laser Sintering Simply Explained <https://all3dp.com/2/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-simply-explained/>
- Leo Gregurić, 2019, Wood Filament: The Basics & Best Wood PLA Brands <https://all3dp.com/2/wood-filament-for-a-3d-printer-explained-compared/>
- Leo Gregurić, 2020, 10 Best 3D Printers for Jewelry <https://all3dp.com/2/3d-printer-for-jewelry-how-they-work-which-to-choose>
- Loughborough University, About Additive Manufacturing, Binder Jetting <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- Loughborough University, Binder Jetting <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- Loughborough University, Material Jetting <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
- Loughborough University, Powder Bed Fusion <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- Lycanthropes by mz4250 is licensed under the Creative Commons - Attribution license. <https://www.thingiverse.com/thing:2842373>
- Maeli Latouche, sla 3d printing materials compared <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/>
- Maria Farsari, 2017 3D Printing via Multiphoton Polymerisation, Shlomo Magdassi, Alexander Kamyshny – “Nanomaterials for 2D and 3D Printing”
- Maria Farsari, 2017 Organic Photopolymers, Shlomo Magdassi, Alexander Kamyshny – “Nanomaterials for 2D and 3D Printing”
- Mendoza, Hannah Rose (May 15, 2015). "Alain Le Méhauté, The Man Who Submitted Patent For SLA 3D Printing Before Chuck Hull". *3dprint.com*. 3DR Holdings, LLC.
- Miniature wargaming oil barrel by XDr4g0nX is licensed under the Creative Commons - Attribution - Non-Commercial - Share Alike license. <https://www.thingiverse.com/thing:2900666>
- Nadav Noor, Assaf Shapira, Reuven Edri, Idan Gal, Lior Wertheim, Tal Dvir 2019, 3D Printing of Personalized Thick and Perfusable Cardiac Patches and Hearts <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adv.201900344>

- Phrozen wax resin <https://phrozen3d.com/products/wax-like-castable-resin-phrozen>
- Pop Buddha by tamrazis licensed under the reative Commons - Attribution license. <https://www.thingiverse.com/thing:1092181>
- Pranav Gharge 2021, Ender 3 (Pro/V2) Filament Guide: Materials You Can 3D Print <https://all3dp.com/2/ender-3-filament-guide-materials-you-can-3d-print/>
- Prof. ShlomoMagdassi Research Group, Science, technology and applications of nanomaterials, <https://scholars.huji.ac.il/magdassi/home>
- Proto3000, Titanium (Ti64) <https://proto3000.com/materials/dmls-titanium-ti64/>
- Pulickel M. AjayanOtto Z. Zhou 2001, Applications of Carbon Nanotubes https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-39947-X_14
- Rapidmade, Selective Laser Sintering (SLS) Carbon-Filled Nylon PA Data Sheet <https://www.rapidmade.com/carbonmide-carbon-filled-nylon-sls-3d-printing-material-data-sheet>
- Real Filaments Products <https://real-filament.com/pages/products>
- R-Nanolab 2020, ΕΜΠ: Ερευνητικές δραστηριότητες του R-NanoLab και η συνεισφορά αυτού κατά τη διάρκεια της πανδημίας <https://www.youtube.com/watch?v=5RJTCm4RPuw>
- Robert Abbel and Erwin R. Meinders, 2017 Inkjet Printing, Shlomo Magdassi, Alexander Kamyshny – “Nanomaterials for 2D and 3D Printing”
- Robert Abbel and Erwin R. Meinders, 2017 Photopolymerisation, Shlomo Magdassi, Alexander Kamyshny – “Nanomaterials for 2D and 3D Printing”
- Robert Abbel and Erwin R. Meinders, 2017 Powder Bed Technology Shlomo Magdassi, Alexander Kamyshny – “Nanomaterials for 2D and 3D Printing”
- Rocío Jaimes Gutierrez 2020, PLA Plastic/Material: All You Need to Know <https://all3dp.com/1/pla-plastic-material-poly-lactic-acid/>
- Rock Formations (15mm/18mm/28mm scale) by dutchmogul is licensed under the Creative Commons - Attribution - Non-Commercial - Share Alike license. <https://www.thingiverse.com/thing:1691424>
- S. Rahmati 2014, Advances in Additive Manufacturing and Tooling, Comprehensive Materials Processing <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-metal-laser-sintering>
- Santosh Kumar Parupelli, Salil S Desai, a Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential https://www.researchgate.net/figure/Binder-Jetting-Overview-over-3D-printing-technologies-Binder-Jetting-nd_fig2_338031041

- Scott Hatfield 2019, 3D Printing With Metal Composite Filaments
<https://maker.pro/custom/tutorial/metal-composite-filaments-3d-print-parts-that-look-like-metal>
- Sculpteo, Alumide 3D printing material
<https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/alumide-material/>
- Sculpteo, Carbon fiber plastic: Discover Ultrasint® PA11 CF
<https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-materials-guide/carbon-filled-plastic/>
- Sculpteo, Nylon 3200 Glass-filled 3D printing material
<https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/glass-filled-nylon-material/>
- Sculpteo, Stainless Steel 316L 3D printing material
<https://www.sculpteo.com/en/materials/dmls-material/dmls-stainless-steel-material/>
- Sculpteo, Titanium 6Al-4V 3D printing material
<https://www.sculpteo.com/en/materials/dmls-material/dmls-titanium-material/>
- Stephanie Kloos, Maximilian A. Dechet, Wolfgang Peukert, Jochen Schmidt
Production of spherical semi-crystalline polycarbonate microparticles for Additive Manufacturing by liquid-liquid phase separation
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591018303589?via%3Dihub>
- Stratasys, Nickel Alloy 625 https://info.stratasysdirect.com/rs/626-SBR-192/images/DMLM_Nickel_Alloy_625_Material_Datasheet_202002.pdf
- Stratasys, Nickel Alloy 718 https://info.stratasysdirect.com/rs/626-SBR-192/images/DMLM_Nickel_Alloy_718_Material_Datasheet_202002.pdf
- T. Løgstrup Andersen 2013, Biobased composites: materials, properties and potential applications as wind turbine blade materials, B. Madsen
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bioresins>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica 2021, 3D printing
<https://www.britannica.com/technology/3D-printing>
- Thierry Chartier, Alexander Badev, 2013 Rapid Prototyping of Ceramics, in Handbook of Advanced Ceramics (Second Edition),
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/fused-deposition-modeling>
- Tree Stump on 60mm base by onebitpixel is licensed under the Creative Commons - Attribution - Non-Commercial license.
<https://www.thingiverse.com/thing:405799>
- ximes 2019, Ender 3 Pro V-Slot covers
<https://www.thingiverse.com/thing:3379068>

- Yu Zheng, Xiaoying Ji, Qingwen Wang, Jiabin Shen, Structural design of polyurethane/poly(butylene succinate)/polycaprolactone compounds: Via a multilayer-assembled strategy: Achieving tunable triple-shape memory performances
<https://www.researchgate.net/publication/329781059> Structural design of polyurethanepolybutylene succinatepolycaprolactone compounds Via a multilayer-assembled strategy Achieving tunable triple-shape memory performances
- Yu Zheng, Xiaoying Ji, Qingwen Wang, Shaoyun Guo, Structural design of polyurethane/poly(butylene succinate)/polycaprolactone compounds: Via a multilayer-assembled strategy: Achieving tunable triple-shape memory performances <https://www.researchgate.net/figure/Molecular-structures-of-a-TPU-b-PCL-and-c-PBS-fig1-329781059>
- Zachary Hay 2020, Best 3D Printing Temperatures for PLA, PETG, Nylon, TPU <https://all3dp.com/2/the-best-printing-temperature-for-different-filaments/>
- Εργαστήριο Προηγμένων, Σύνθετων, Νάνο Υλικών και Νανοτεχνολογίας
<http://nanolab.chemeng.ntua.gr/el/>