



ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΕ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Παναγιώτης Γλύκας
TMD1913 | 2021

ΔΗΛΩΣΗ

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

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου». «Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού ΜΔΕ ανήκουν στο μεταπτυχιακό φοιτητή και το επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και τον επιβλέποντα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα) ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

ΥΠΟΓΡΑΦΗ:

Παναγιώτης Γλύκας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΔΗΛΩΣΗ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑ ΠΑΙΧΝΙΔΙΑ.....	2
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	2
2.2 ΟΙ ΦΙΓΟΥΡΕΣ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΩΝ ΣΗΜΕΡΑ.....	4
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΙΓΟΥΡΩΝ.....	4
2.3.1 ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ.....	5
2.3.2 ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	5
2.3.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ.....	6
2.3.4 ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΜΦΥΣΗΣΗ.....	6
2.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΙΓΟΥΡΩΝ.....	6
2.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ.....	8
3. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ & 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ.....	9
3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	9
3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	11
3.2.1 ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ.....	11
3.2.2 ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	11
3.2.3 ΣΥΝΤΗΞΗ ΠΟΥΔΡΑΣ ΣΕ ΚΛΙΝΗ.....	12
3.2.4 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ.....	13
3.2.5 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ.....	13
4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	15
4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	15
4.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ MJ.....	15
4.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ME.....	17
4.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ MSLA.....	18
4.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ SLS.....	19
4.2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	20
4.2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ.....	20
4.2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ.....	22
4.2.4 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΡΗΣΗΣ.....	24
5. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	26
5.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	26
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	28
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	32
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	33

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΑΝΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΟ.....	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ.....	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΤΕΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΡΗΣΗΣ.....	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑ ΣΤΑΔΙΟ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΟΓΚΟΣ ΦΙΓΟΥΡΩΝ.....	30

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

EIKONA 1. ΛΑΞΕΥΜΕΝΗ ΠΛΑΚΑ ΓΙΑ ΠΑΙΧΝΙΔΙ ΤΥΠΟΥ ΜΑΝΚΑΛΑ.....	2
https://www.interestingfacts.org/fact/the-ancient-history-of-board-gamesbridget-a-alexgmail-com-bridget-alexon-june-16-2020-at-139-pm	
EIKONA 2. ΠΟΥΛΙΑ ΑΠΟ ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΣΤΗΝ ΤΟΥΡΚΙΑ	2
https://www.theverge.com/2013/8/14/4622122/oldest-board-game-tokens-found-turkey	
EIKONA 3. ROYAL GAME OF UR.....	3
http://ludeme.eu/outputs/cig-ludeme-1.pdf	
EIKONA 4. ΖΩΓΡΑΦΙΣΜΕΝΟ ΧΑΛΙ ΜΕ ΠΑΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΘΕΟ ΤΩΝ ΠΑΙΧΝΙΔΙΩΝ MACUILXOCHITL .	3
https://theojac.org/blog/2020/11/9/patolli-harvest-game-of-the-aztecs-amp-maya	
EIKONA 5. ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ.....	5
https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/gravity-die-casting	
EIKONA 6. ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ	5
https://gr.pinterest.com/pin/389983648964587019/	
EIKONA 7. ΧΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ	6
https://www.pinterest.co.uk/pin/550494754421796613/	
EIKONA 8. ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΜΦΥΣΗΣΗ	6
https://www.slideshare.net/habib_117/extrusion-molding-51742817	
EIKONA 9. ΦΙΓΟΥΡΕΣ & ΖΑΡΙΑ ΤΟΥ D&D ΤΗΣ HASBRO	7
EIKONA 10. ΑΦΙΣΑ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΥΡΕΣΙΤΕΧΝΙΑΣ ΤΟΥ J.F. GOTTWALD.	9
https://www.facebook.com/freshmade3d/photos/a.644395049046842/1744803785672624/	
EIKONA 11. ΣΥΣΤΗΜΑ SLA - 1	10
https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21835865/3d-printing-the-machine-that-started-it-all	
EIKONA 12. ΠΙΟΝΙ ΤΡΑΙΝΟ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ ΜΟΝΟΠΟΛΗ.....	15
https://ableviz.artstation.com/projects/yGe6n	
EIKONA 13. ΦΙΓΟΥΡΑ ΤΟΞΟΘΗ	16
https://afternoah.com/product/bowman-figure-papo	
EIKONA 14. MJ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΡΔΙΑΣ.....	16
https://3d-prints.com/2019/07/25/the-complete-guide-to-material-jetting-polyjet-in-3d-printing/	
EIKONA 15. LAYERS ΚΑΙ MOTIBO INFILL ΤΗΣ ΜΕ	17
https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/	
EIKONA 16. ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ	17
https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/	
EIKONA 17. MSLA ΦΙΓΟΥΡΑ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟΥ ΠΑΙΧΝΙΔΙΟΥ	18
https://3dprintingminis.com/how-to-remove-prints-from-resin-3d-printer-build-plate-easily/	
EIKONA 18. ΚΟΜΜΑΤΙΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΑ ΜΕ ΕΚΤΥΠΩΤΗ SLS	20
https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive-polymeres/procede-de-fabrication-additive-sls	
EIKONA 19. "WINGED GUARDIAN SPEAR OUT" BY STOCKTO	26
EIKONA 20. "TRAVELLER" BY STOCKTO	26
EIKONA 21. PHOTON ZERO BY ANYCUBIC	27
https://all3dp.com/1/anycubic-photon-zero-3d-printer-review/	
EIKONA 22. ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΑΡΤΙΔΑ MSLA ΜΟΝΤΕΛΩΝ	27
EIKONA 23. ΦΙΓΟΥΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΑΠΟ ΤΟ BED.....	29
EIKONA 24. ΦΙΓΟΥΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ SUPPORT	29
EIKONA 25. ΒΑΜΜΕΝΕΣ ΦΙΓΟΥΡΕΣ.....	30

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα επιτραπέζια παιχνίδια και οι φιγούρες τους, ακόμα και από τα αρχαία χρόνια των λαών του κόσμου, κατείχαν μια σημαντική θέση στο πολιτισμό την ιστορία αλλά και την κουλτούρα του κάθε τόπου. Φιγούρες και μοντέλα από την αρχαιότητα μαρτυρούν την ύπαρξή τους καθώς και τους τρόπους με τους οποίους κατασκευάζονταν. Σπάνια και πολύτιμα υλικά όπως ελεφαντόδοντο ή χρυσός αντικαταστάθηκαν σταδιακά από πιο εύκολα διαθέσιμα και φθηνά υλικά, όπως το ξύλο και οι λίθοι διάφορων ειδών, διευρύνοντας έτσι το κοινό που πλέον είχε πρόσβαση στην διασκέδαση και την χαρά που ένα παιχνίδι μπορεί να φέρει. Οι αιώνες πέρασαν, οι μέθοδοι παραγωγής εξελίχθηκαν, οι παραγωγικές δυνατότητες βελτιώθηκαν τα κόστη μειώθηκαν και το επιτραπέζιο παιχνίδι αποτελεί ακόμα πηγή διασκέδασης για τον σύγχρονο άνθρωπο. Ακόμα και στην ταχύτατη και αγχώδη ζωή της πόλης, δεν είναι λίγες οι φορές που τα επιτραπέζια βοηθάνε τα άτομα να έρθουν πιο κοντά, δημιουργούν σχέσεις, παρέες και αξέχαστες στιγμές. Καθώς ένα κύμα ψηφιοποίησης μετατρέπει σταδιακά το υλικό σε άυλο ερχόμαστε αντιμέτωποι με ένα τεράστιο δίλημμα στον τομέα της παραγωγής τους. Ειδικότερα, είναι πλέον διαθέσιμες πολλές και διαφορετικές μέθοδοι παραγωγής των μοντέλων/φιγούρων που περιέχονται σε ένα επιτραπέζιο παιχνίδι, από τις οποίες πρέπει να επιλεγεί η καταλληλότερη εκτιμώντας τα δυνατά και αδύναμα σημεία κάθε μεθόδου, κυρίως από άποψη ποιότητας και κόστους.

Η μέθοδος της χύτευσης σε καλούπι είναι μια από τις αρχαιότερες μεθόδους παραγωγής. Με την πάροδο των χρόνων έχει εξελιχθεί σημαντικά και έχουν εμφανιστεί πολλές και διάφορες παραλλαγές της. Μια από τις πλέον ώριμες και εξελιγμένες μεθόδους χύτευσης είναι αυτή της χύτευσης με έγχυση ακριβείας (injection molding), η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για τη χύτευση πλαστικών και είναι η πρώτη και με διαφορά επιλογή των παραγωγών μοντέλων μικρής κλίμακας για επιτραπέζια παιχνίδια. Με τεράστιες ταχύτητες και αμελητέα κόστη υλικού επιτρέπει την μαζική παραγωγή μοντέλων και φιγούρων, ενισχύοντας από αυτή την άποψη το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα των επιχειρήσεων που την εφαρμόζουν.

Την τελευταία δεκαετία, ωστόσο, έχει κάνει εντονότερη την παρουσία και την δυναμική της μια σχετικά νέα κατηγορία κατασκευαστικών τεχνικών, οι μέθοδοι της Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing) ή Τριδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing). Η συγκεκριμένη οικογένεια τεχνικών φαίνεται να προσελκύει το ενδιαφέρον των ανθρώπων που ασχολούνται με τα επιτραπέζια παιχνίδια, καθώς ερασιτέχνες και επαγγελματίες είναι ανοιχτοί σε νέους τρόπους παραγωγής των φιγούρων. Βασικά χαρακτηριστικά της Προσθετικής Κατασκευής που φαίνεται να την καθιστούν καλή επιλογή για την παραγωγή μοντέλων για επιτραπέζια παιχνίδια είναι ο ψηφιακός της χαρακτήρας, η σχετική ταχύτητα κατασκευής και η δυνατότητα παραγωγή αρκετά πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Η Προσθετική Κατασκευή, ωστόσο, περιλαμβάνει πολλές και διάφορες μεθόδους, που διαφέρουν αρκετά από άποψη τεχνολογικής ωριμότητας, χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων. Η επιλογή, λοιπόν, μιας μεθόδου για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν είναι κάτι απλό καθώς πρέπει να εκτιμηθούν τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά κάθε τεχνικής, έχοντας ως βασικά κριτήρια το κόστος, την ποιότητα και την

ταχύτητα κατασκευής. Το τελικό ερώτημα είναι εάν και σε ποιο βαθμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος τριδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή μοντέλων μικρού μεγέθους αντί της καθιερωμένης μεθόδου της χύτευσης με έγχυση ακριβείας. Αυτά τα δύο ερωτήματα, ποια τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής / Τριδιάστατης Εκτύπωσης θα ήταν η καταλληλότερη για την παραγωγή μοντέλων για επιτραπέζια παιχνίδια και κατά πόσο η επιλεγθείσα μέθοδος μπορεί να αντικαταστήσει καθιερωμένες μεθόδους παραγωγής, αποτελούν τα βασικά ζητούμενα της παρούσας μελέτης.

Η δομή της μελέτης έχει ως εξής: στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η ιστορία των επιτραπέζιων παιχνιδιών και αναλύονται οι βασικές υφιστάμενες μέθοδοι παραγωγής των σχετικών μοντέλων/φιγούρων, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής / Τριδιάστατης Εκτύπωσης, στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται σε βάθος το πρόβλημα της επιλογής της καταλληλότερης μεθόδου μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας μελέτης περίπτωσης που αφορά στην κατασκευή δύο αντιπροσωπευτικών μοντέλων και τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα.

2. ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑ ΠΑΙΧΝΙΔΙΑ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα πρώτα αρχαιολογικά ευρήματα που σχετίζονται με τα επιτραπέζια παιχνίδια χρονολογούνται την περίοδο από το 10.000 π.Χ. με 6.000 π.Χ.. Πολλοί ερευνητές, ωστόσο, υποστηρίζουν ότι η χρήση τους εκτείνεται πολύ παλιότερα στον χρόνο, σε περιόδους όπου τα υλικά κατασκευής δεν ήταν ιδιαίτερα ανθεκτικά και δεν μπορούσαν συνεπώς να διατηρηθούν μέχρι σήμερα.

Πολλές ανασκαφές σε νεολιθικούς οικισμούς στις περιοχές του Ιράν καθώς και στην Αίγυπτο έχουν οδηγήσει στην ανακάλυψη διάφορων επιτραπέζιων παιχνιδιών, κυρίως ταμπλό τα οποία ήταν κατασκευασμένα από λαξευμένες ή χαραγμένες λίθινες πλάκες. Οι ερευνητές πιστεύουν ότι οι συγκεκριμένες πλάκες χρησιμοποιούνταν σε παιχνίδια τύπου Mancala. Ένα από τα ευρήματα αποτελείται από μία λίθινη πλάκα, στην οποία είναι λαξευμένες 6 μικρές εσοχές σε κάθε πλευρά (Εικ. 1). Παρόλο που δεν έχει βρεθεί κανένα πόνι/πούλι μαζί με κάποια από αυτές τις χαραγμένες πλάκες, εικάζεται ότι οι παίκτες τις χρησιμοποιούσαν για να στερεώνουν μέσα σπόρους, μικρές πέτρες ή άλλα εναλλακτικά πούλια (Bridget A., 2020).



ΕΙΚΟΝΑ 1. ΛΑΞΕΥΜΕΝΗ ΠΛΑΚΑ ΓΙΑ ΠΑΙΧΝΙΔΙ ΤΥΠΟΥ ΜΑΝΚΑΛΑ

Κοινά ευρήματα σε παρόμοια σημεία ανασκαφών στην Εγγύς Ανατολή αποτελούν μικρά πήλινα βέλη/κώνοι και άλλα αντίστοιχα κομμάτια τα οποία παρόλο που μοιάζουν με πούλια επιτραπέζιων παιχνιδιών, φαίνεται ότι χρησιμοποιούνταν για την καταμέτρηση αγαθών πριν την εφεύρεση της γραφής. Σε ένα άλλο νεολιθικό σημείο ανασκαφής στην Τουρκία έχουν βρεθεί 22 γυαλισμένα κομμάτια ασβεστόλιθου περίπου 2,5cm ύψους και με επίπεδη βάση, τα οποία θεωρείται ότι όντως χρησιμοποιούνταν ως πόνια για κάποιο αρχαίο επιτραπέζιο παιχνίδι.

Σε χώρο ανασκαφής στην Τουρκία έχουν βρεθεί αντίστοιχα ευρήματα, τα οποία χρονολογούνται πιο μετά (5.000 π.Χ.) και περιλαμβάνουν 49 μικρά λίθινα κομμάτια. Τα κομμάτια περιλαμβάνουν μοντέλα ζώων, διάφορες γεωμετρικές μορφές, κυκλικά πούλια φτιαγμένα από όστρακο χελώνας καθώς και ένα ζάρι (Εικ. 2). Οι κανόνες και ο τρόπος παιχνιδιού των παραπάνω επιτραπέζιων είναι ακόμα άγνωστος.



ΕΙΚΟΝΑ 2. ΠΟΥΛΙΑ ΑΠΟ ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΣΤΗΝ ΤΟΥΡΚΙΑ

Παρόλα αυτά ερευνητές έχουν καταφέρει να κατανοήσουν τους κανόνες του «παιχνιδιού των 20 τετραγώνων» (Game of twenty squares) που είναι γνωστό και ως «βασιλικό παιχνίδι της Ur»

(Royal Game of Ur), το οποίο χρονολογείται στο 2.500 π.Χ. και ήταν πολύ διάσημο στην εποχή του με ευρήματα να απλώνονται σε σημεία ανασκαφών από την ανατολική μεσόγειο έως την κεντρική Ασία (Εικ. 3).

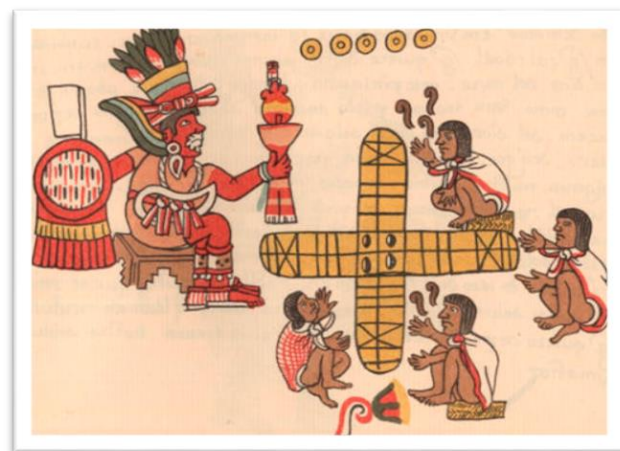
Ένα από τα πιο εντυπωσιακά σχετικά ευρήματα αποτελεί μια πλάκα κατασκευασμένη από όστρακο χελώνας, λάπιδας, λάζουλι και κόκκινο ασβεστόλιθο, η οποία συνοδεύεται από μικρούς δίσκους/πούλια (Green W., 2008).



ΕΙΚΟΝΑ 3. ROYAL GAME OF UR

Αντίστοιχα ευρήματα που σχετίζονται πιθανότατα με κάποια μορφή επιτραπέζιων παιχνιδιών έχουν ανακαλυφθεί και στην Αμερική, κυρίως σε περιοχές ανασκαφών της αυτοκρατορίας των Αζτέκων. Σε κείμενα της αποικιακής εποχής της Αμερικής όπως το Codex Magliabecchi, απεικονίζεται μια σχετική σκηνή όπου παίκτες πετούν φασόλια σε ένα ειδικά σχεδιασμένο τάπητα (Εικ. 4). Το σημείο που προσγειώνονταν τα φασόλια καθόριζε το πως θα μπορούσε ο παίκτης να κινηθεί στον τάπητα, ενώ παράλληλα οι παίκτες και οι θεατές στοιχημάτιζαν στα αποτελέσματα μέχρι και εξωτικά αγαθά από μακρινές περιοχές.

Στην Ευρώπη τα παλαιότερα στοιχεία ύπαρξης επιτραπέζιων παιχνιδιών προέρχονται από το έπος της Ιλιάδας (8ος αιώνα π.Χ.) όπου αναφέρεται το παιχνίδι «Πεττεία» ή «Πεσσοί». Αργότερα, το συγκεκριμένο παιχνίδι θα εξελιχθεί στο ρωμαϊκό Ludus Latrunculorum. Στην Νορβηγία υπάρχουν στοιχεία για το παιχνίδι 'Hnefatafl' τα οποία χρονολογούνται κοντά στο 400 π.Χ., ενώ στην Ιρλανδία υπάρχουν ευρήματα που σχετίζονται με το παιχνίδι 'Fidchell' ή 'Ficheall' που χρονολογείται στο 144 π.Χ..



ΕΙΚΟΝΑ 4. ΖΩΓΡΑΦΙΣΜΕΝΟ ΧΑΛΙ ΜΕ ΠΑΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΘΕΟ ΤΩΝ ΠΑΙΧΝΙΑΙΩΝ MACUILXOCHITL

Οι μέθοδοι κατασκευής των επιτραπέζιων παιχνιδιών στην αρχαιότητα ήταν περιορισμένες και σχετικά απλοϊκές, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα για μαζική παραγωγή ενώ η ταχύτητα και η ποιότητα της κατασκευής τους σχετίζονταν άμεσα με την ικανότητα του κατασκευαστή. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνταν διέφεραν ανά περιοχή και σχετίζονταν με τον αντίστοιχο πλούτο. Συνήθη υλικά αποτελούσαν το ξύλο, το μάρμαρο, οι ημιπολύτιμοι λίθοι, τα όστρακα και τα οστά ζώων, ο άργυρος, ο χρυσός, ο χαλκός, το γυαλί, το ελεφαντόδοντο, ο ορείχαλκος και ο πηλός. Οι κύριες τεχνικές μορφοποίησης και κατεργασίας που χρησιμοποιούνταν ήταν η επίστρωση με κάποιου είδους βαφή, η χύτευση και η λάξευση (Attia P., 2016).

2.2 ΟΙ ΦΙΓΟΥΡΕΣ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΩΝ ΣΗΜΕΡΑ

Οι φιγούρες μικρής κλίμακας ή αλλιώς μινιατούρες (Miniature models) είναι πολύ διαδεδομένες στον χώρο των επιτραπέζιων παιχνιδιών. Οι προδιαγραφές και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους διαφέρουν ανά παιχνίδι και το ύψος τους κυμαίνεται συνήθως από 20mm έως και 54mm. Στη πλειοψηφία τους αναπαριστούν πολεμιστές, οχήματα, κτήρια, μηχανήματα καθώς και αντικείμενα του περιβάλλοντος. Όσοι ασχολούνται με τα επιτραπέζια παιχνίδια συχνά αποκαλούν τις φιγούρες αυτές και «minis».

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των φιγούρων είναι συνήθως διάφορων είδη μετάλλων, πλαστικών ή χαρτιού. Πολύ συχνά οι φιγούρες βάζονται ή τελειοποιούνται από τους ίδιους τους παίκτες (Bigalow R., 1984).

Τα minis αγοράζονται για διάφορους λόγους από τους ενδιαφερόμενους. Ένας λόγος είναι για την χρήση τους σε επιτραπέζια παιχνίδια καθώς μέσω των μορφολογικών χαρακτηριστικών μιας φιγούρας καθορίζονται πολλές φορές η αντίστοιχη θέση, ο προσανατολισμός καθώς και η «ορατότητα» (Line of Sight – LoS). Η ορατότητα μιας φιγούρας, δηλ. με τι έχει οπτική επαφή ένας χαρακτήρας, είναι ένας πολύ διαδεδομένο χαρακτηριστικό, ειδικά σε πολεμικά επιτραπέζια παιχνίδια πολεμικών παιχνιδιών και σε ορισμένα παιχνίδια ρόλων (Role Playing Games - RPG). Μία απλή και γρήγορη τεχνική για να εξακριβωθεί εάν μια φιγούρα είναι στο οπτικό πεδίο μιας άλλης είναι να εκταθεί μια κλωστή από τη μία προς την άλλη.

Ένας ακόμα λόγος που αγοράζονται αυτές οι φιγούρες είναι ο συλλεκτικός. Ο ενδιαφερόμενος μπορεί να αποκτήσει μια φιγούρα με περιορισμένα αντίγραφα στην αγορά, αποκτώντας έτσι και την αντίστοιχη αίσθηση κύρους και αναγνώρισης στον χώρο. Κάποιοι ενδιαφέρονται στο να βάζουν αυτές τις φιγούρες με εξαιρετικές λεπτομέρειες είτε για συλλεκτικούς λόγους είτε για να τις διαθέσουν προς πώληση. Δεν είναι λίγες, μάλιστα, οι φορές όπου συλλέκτες αγοράζουν φιγούρες αξίας αρκετών εκατοντάδων δολαρίων.

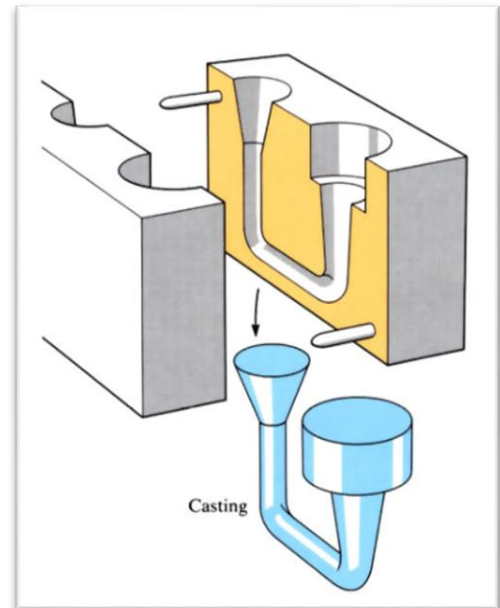
Μερικές από τις πιο σπάνιες και συλλεκτικές φιγούρες ανήκουν στο γνωστό επιτραπέζιο παιχνίδι ρόλων 'Dungeons & Dragons'. Για παράδειγμα, η φιγούρα 'Snowball the Beholder' εκτιμάται ότι αξίζει περίπου 350\$, ενώ η φιγούρα 'Gargantuan Black Dragon' είναι ένα βαμμένο μοντέλο ενός μαύρου δράκου το οποίο κοστίζει κάτι λιγότερο από 550\$. Τελευταία και ακριβότερη είναι συγκριτικά μεγάλη φιγούρα με ύψος έως και 250mm ο 'Colossal Red Dragon' ο οποίος κοστίζει μεταξύ των συλλεκτών 650\$. Οι αντίστοιχες φιγούρες συνοδεύονται με κάρτες που αντικατοπτρίζουν τις δυνάμεις τους και τις ιδιότητες τους δίνοντας τους εκτός από συλλεκτική αξία και χρηστική αξία και δύναμη μέσα στον κόσμο του Dungeons & Dragons (Zooney N., 2018).

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΙΓΟΥΡΩΝ

Για την κατασκευή πλαστικών προϊόντων χρησιμοποιούνται κυρίως τέσσερις μέθοδοι: η χύτευση σε ελαστικά καλούπια, η χύτευση με έγχυση ακριβείας, η διαμόρφωση με εξώθηση και η χύτευση με εμφύσηση (Groover M., 2017). Σε αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούνται κυρίως πολυμερή/πλαστικά, όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυστυρόλιο, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και κάποια μεταλλικά υλικά.

2.3.1 ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ

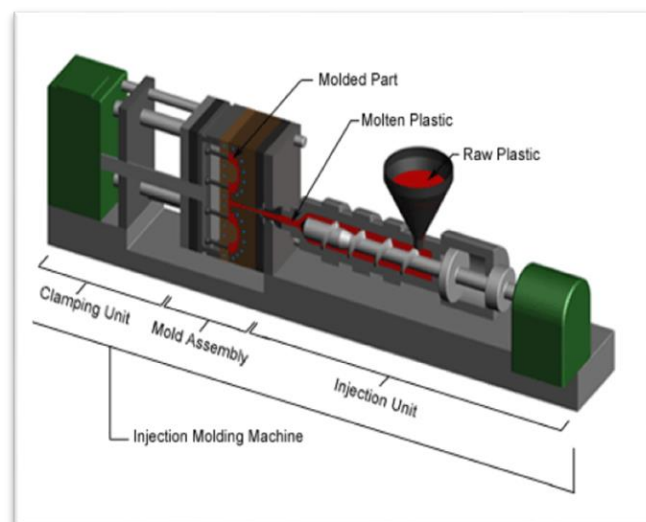
Η συγκεκριμένη οικογένεια μεθόδων περιλαμβάνει πολλές μεθόδους χύτευσης στις οποίες ένα αρχικό πρότυπο της φιγούρας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ελαστικών καλουπιών (silicone molding). Το βασικό πρότυπο κατασκευάζεται συνήθως χειρωνακτικά από εξειδικευμένους τεχνίτες με άριστη τεχνική και εμπειρία στη λάξευση υλικών, στον σχεδιασμό μοντέλων αλλά και την χύτευση. Στην συνέχεια η φιγούρα-πρότυπο τοποθετείται σε ένα κατάλληλο πλαίσιο, όπου και εγχέεται το υλικό του καλουπιού, συνήθως κάποιου είδους σιλικόνη. Όταν το υλικό του καλουπιού στερεοποιηθεί, αποσυναρμολογείται το πλαίσιο και η φιγούρα-πρότυπο αφαιρείται από το εσωτερικό τέμνοντας το καλούπι σε δύο ή περισσότερα τμήματα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ελαστικό συνήθως καλούπι που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την χύτευση αντιγράφων της αρχικής φιγούρας από διάφορα υλικά, συνήθως πολυμερή (Εικ. 5). Τόσο η κατασκευή του καλουπιού όσο και η χύτευση των αντιγράφων γίνεται συνήθως σε θαλάμους κενού για να αποφευχθεί η δημιουργία φυσαλίδων, για αυτό και η μέθοδος αναφέρεται συχνά και με τον όρο χύτευση σε κενό (vacuum casting). Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει έντονα χειρωνακτικό χαρακτήρα και απαιτεί καλή γνώση πολλών μεταβλητών και περιορισμών, και για αυτό θεωρείται κατάλληλη για μικρές ποσότητες παραγωγής (Open.edu, 2017).



ΕΙΚΟΝΑ 5. ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ

2.3.2 ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

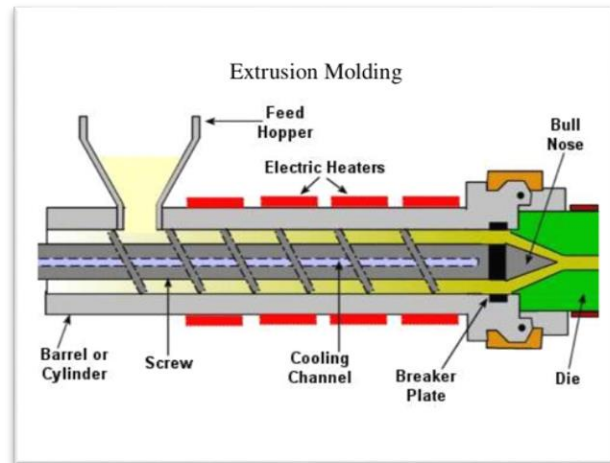
Για τη μαζική παραγωγή πλαστικών μοντέλων/φιγούρων επιτραπέζιων παιχνιδιών χρησιμοποιείται κυρίως η χύτευση/καλούπωμα με έγχυση ακριβείας (injection molding)(Εικ. 6). Στη συγκεκριμένη μέθοδο η πρώτη ύλη τροφοδοτείται σε έναν θερμαινόμενο κοχλία ο οποίος ρευστοποιεί και ωθεί το υλικό στο καλούπι που διαθέτει μία ή περισσότερες κοιλότητες. Εντός του καλουπιού το υλικό ψύχεται και στερεοποιείται. Στην συνέχεια το καλούπι ανοίγει και με την βοήθεια ειδικά τοποθετημένων οδηγών το κομμάτι απομακρύνεται. Στη συνέχεια το καλούπι κλείνει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



ΕΙΚΟΝΑ 6. ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

2.3.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ

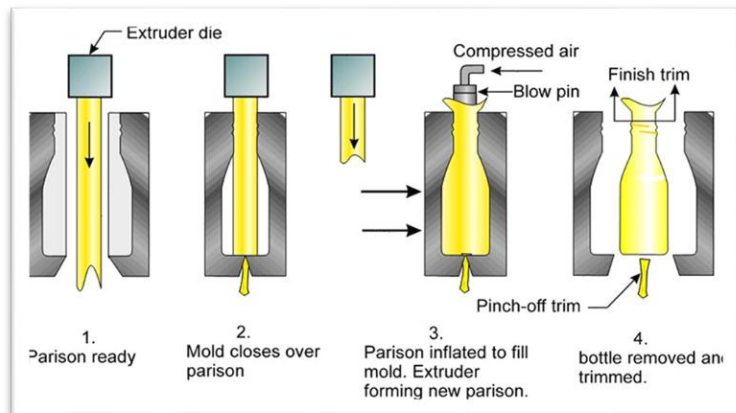
Στην μέθοδο της διαμόρφωσης με εξώθηση (extrusion molding), ο θερμαινόμενος κοχλίας περιστρέφεται συνεχώς ωθώντας έτσι το τηγμένο υλικό μέσα από ένα ειδικό στόμιο/μήτρα, το οποίο δίνει στο υλικό την επιθυμητή μορφή (Εικ. 7). Στην συνέχεια το διαμορφωμένο υλικό ψύχεται και στερεοποιείται. Τέλος, το συνεχές στερεοποιημένο προϊόν της εξώθησης κόβεται στα επιθυμητά μήκη, έτσι ώστε να παραχθούν τα τελικά προϊόντα (ConairGroup, 2015).



ΕΙΚΟΝΑ 7. ΧΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΞΩΘΗΣΗ

2.3.4 ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΜΦΥΣΗΣΗ

Στην μέθοδο της χύτευσης με εμφύσηση (blow molding) το τηγμένο υλικό διαμορφώνεται αρχικά μέσω εξώθησης σε σχήμα σωλήνα ή προφόρμας. Η αρχική αυτή διαμόρφωση θερμαίνεται και τοποθετείται στη συνέχεια μέσα σε ένα καλούπι όπου με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα εξωθείται στα τοιχώματα της κοιλότητας, αποκτώντας έτσι την τελική της μορφή (Εικ. 8). Τέλος το καλούπι ψύχεται και το χυτό αφαιρείται με το άνοιγμα του καλουπιού.



ΕΙΚΟΝΑ 8. ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΕΜΦΥΣΗΣΗ

2.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΙΓΟΥΡΩΝ

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος παραγωγής φιγούρων και μοντέλων μικρού μεγέθους σε βιομηχανική κλίμακα είναι η χύτευση με έγχυση ακριβείας. Η μέθοδος αυτή προτιμάται για την υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα παραγωγής καθώς και το σχετικά χαμηλό κόστος ανά κομμάτι που μπορούν να επιτευχθούν σε μεγάλες ποσότητες παραγωγής.

Το κόστος προμήθειας του σχετικού εξοπλισμού (μηχανή έγχυσης ακριβείας) μπορεί να κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 25.000\$ και 100.000\$, αναλόγως φυσικά του επιθυμητού όγκου παραγωγής, της ταχύτητας και της ευελιξίας από πλευράς υλικού και πολυπλοκότητας. Στο κόστος του εξοπλισμού πρέπει φυσικά να προστεθεί και το κόστος των εργαλείων παραγωγής (καλουπιών). Το κόστος των καλουπιών κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 500\$ και 5.000\$ ανάλογα με το μέγεθος την πολυπλοκότητα των μοντέλων, τον αριθμό των κοιλοτήτων και τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί. Τα απαιτούμενα καλούπια περιέχουν, συνήθως, περισσότερες της μιας

κοιλότητες και προορίζονται για μεγάλο όγκο παραγωγής, δεν προβλέπεται δηλ. αντικατάστασή τους εντός του κύκλου ζωής του προϊόντος.

Το γνωστό επιτραπέζιο παιχνίδι Monopoly στις κλασσικές εκδόσεις του πέρα από τις κάρτες, τα χαρτονομίσματα και τον πίνακα παιχνιδιού περιέχει 2 ζάρια, 6 πόνια παικτών, 36 μοντέλα κατοικιών και 16 μοντέλα ξενοδοχείων. Τα συγκεκριμένα μοντέλα, μπορούν να παραχθούν με τη μέθοδο της χύτευσης με έγχυση ακριβείας χρησιμοποιώντας ένα καλούπι το οποίο διαθέτει εννέα κοιλότητες και έχει κατά συνέπεια σχετικά μεγάλο κόστος. Σε ένα άλλο γνωστό επιτραπέζιο παιχνίδι, το Dungeons and Dragons, χρησιμοποιούνται επίσημα 1.284 διαφορετικές φιγούρες και μοντέλα τα οποία διατίθενται εμπορικά σε ξεχωριστά πακέτα, ενώ διατίθενται και μεμονωμένα σπανιότερα μοντέλα. Πολλά από αυτά τα μοντέλα παράγονται μαζικά με την μέθοδο της χύτευσης με έγχυση ακριβείας και άρα χρειάζονται τα κατάλληλα καλούπια αυξάνοντας σημαντικά το κόστος του αρχικού εξοπλισμού. Άλλα πιο σπάνια και σχετικά μεγαλύτερα σε μέγεθος μοντέλα παράγονται με σχετικά ακριβότερες μεθόδους χύτευσης ή ακόμα σπανιότερα σκαλίζονται στο χέρι, και είναι συνεπώς ακριβότερα από τα μοντέλα μαζικής παραγωγής.

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται ένα πλήρες σετ μοντέλων και ζαριών του επιτραπέζιου παιχνιδιού Dungeons and Dragons (D&D) της εταιρίας Hasbro. Πέρα από τις κάρτες και το ταμπλό του παιχνιδιού, το παιχνίδι περιλαμβάνει 40 φιγούρες και 10 ζάρια. Πιο συγκεκριμένα, περιέχονται τα εξής πλαστικά κομμάτια:

1. 10 ζάρια έξι εδρών συνολικού βάρους 41 γραμμαρίων από πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA)
 - a. 2 κίτρινα
 - b. 2 πορτοκαλί
 - c. 1 κόκκινο
 - d. 1 μοβ
 - e. 1 παγίδα
 - f. 1 νεκροκεφαλής
 - g. 1 όρασης
 - h. 1 αστεριού
2. 36 φιγούρες από πολυαιθυλένιο, ύψους 38- 56mm και συνολικού βάρους 371 γραμμαρίων.
 - a. 6 σκελετούς
 - b. 2 γουάιτς
 - c. 4 μπαγκμπέαρ
 - d. 6 γκόμπλιν
 - e. 4 όγκερ
 - f. 3 ρείθ
 - g. 5 γκνολ
 - h. 1 λιτς
 - i. 2 κάριον κρόουλερ
 - j. 3 τρολ
 - k. 1 πολεμιστής
 - l. 1 ιερέας
 - m. 1 μάγισσα
 - n. 1 κλέφτης



ΕΙΚΟΝΑ 9. ΦΙΓΟΥΡΕΣ & ΖΑΡΙΑ ΤΟΥ D&D ΤΗΣ HASBRO

Με βάση τα παραπάνω εκτιμάται ότι για την παραγωγή των πλαστικών κομματιών με την μέθοδο της χύτευσης με έγχυση ακριβείας απαιτούνται καλούπια που διαθέτουν τουλάχιστον 8 διαφορετικές κοιλότητες για τα ζάρια και 14 διαφορετικές κοιλότητες για τις φιγούρες. Εναλλακτικά για την παραγωγή ολόκληρου του επιτραπέζιου μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλούπια με περισσότερες από μία φιγούρες, ομαδοποιημένες βάσει χρώματος, μειώνοντας έτσι τον αριθμό διαφορετικών καλουπιών που απαιτούνται. Η λογική και ο αριθμός των φιγούρων υποδηλώνει ότι έχουν χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον τέσσερα διαφορετικά καλούπια για την κατασκευή των 36 φιγούρων, ένα δηλαδή για κάθε χρώμα.

Η ταχύτητα παραγωγής των μοντέλων με τη μέθοδο της χύτευσης με έγχυση ακριβείας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το συνολικό βάρος των μοντέλων, οι λεπτομέρειές του, το χρησιμοποιούμενο υλικό καθώς και ο εξοπλισμός. Αντίστοιχα, ο χρόνος χύτευσης μπορεί να κυμαίνεται από 2 δευτερόλεπτα έως και 2 λεπτά ανά κύκλο χύτευσης. Επιπλέον σε αυτούς τους χρόνους προστίθενται ο χρόνος προετοιμασίας της παραγωγής καθώς και η μετέπειτα επεξεργασία της κάθε φιγούρας, η οποία μπορεί να χρειάζεται για διόρθωση των ατελειών και αφαίρεση πιθανών υπολειμμάτων της χύτευσης (Losek J., 2021).

2.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ

Η μέθοδος της χύτευσης με έγχυση ακριβείας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή σχετικά μικρών παρτίδων μοντέλων κομματιών που έχουν περιορισμένα αντίγραφα ή σχετικά μεγαλύτερο μέγεθος. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται σχετικά φθηνότερος εξοπλισμός μειώνεται, όμως, ο ρυθμός παραγωγής.

Το κόστος προμήθειας μια μικρής μηχανής χύτευσης με έγχυση ακριβείας, που χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις αυτές, ξεκινάει από τα 600€ και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 5.000€. Τα χρησιμοποιούμενα καλούπια είναι πιο μικρά και απλοϊκά, καθώς δεν απαιτείται ιδιαίτερος σχεδιασμός για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιο αυτόματο μηχάνημα. Το κόστος κατασκευής των καλουπιών κυμαίνεται από 500€ έως και 2.000€, ανάλογα πάντα με τις προδιαγραφές. Στη χύτευση με έγχυση ακριβείας μικρών παρτίδων πολλές εργασίες εκτελούνται χειρωνακτικά καθώς χρησιμοποιείται εξοπλισμός με χαμηλό βαθμό αυτοματοποίησης, αυξάνοντας έτσι το αντίστοιχο κόστος εργασίας. Ο κύκλος παραγωγής σε αυτές τις μηχανές μπορεί να κυμανθεί από 40 δευτερόλεπτα έως και 2 λεπτά. Σε αυτά τα μικρά μηχανήματα τα καλούπια είναι, επίσης, μικρότερα από τα καλούπια ακριβότερων αυτόματων μηχανών και έτσι περιορίζεται η ποσότητα παραγωγής ανά κύκλο σε ελάχιστα τεμάχια (Rex Plastics, 2013).

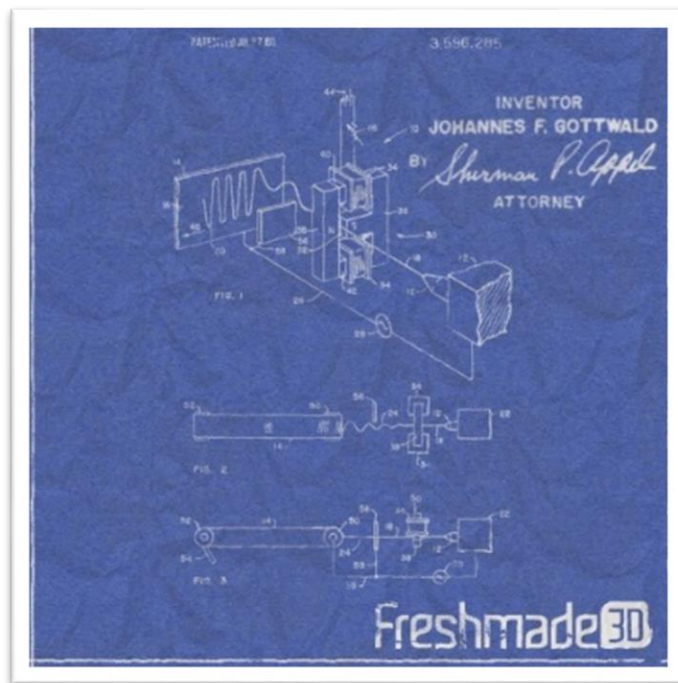
Για την παραγωγή μικρών παρτίδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η μέθοδος της χύτευσης σε ελαστικά καλούπια που αναλύθηκε παραπάνω. Στη περίπτωση αυτή, το κόστος των καλουπιών είναι σχετικά μικρότερο αυξάνεται όμως ο απαιτούμενος χρόνος παραγωγής. Τα ελαστικά καλούπια δεν προορίζονται, επίσης, για πολλές χρήσεις μιας και λόγω των υλικών κατασκευής (διάφοροι τύποι σιλικόνης) και του τρόπου χρήσης τους τους φθείρονται πολύ πιο γρήγορα από τα μεταλλικά καλούπια, υψηλής αντοχής, που χρησιμοποιούνται σε άλλες τεχνικές (Adam Savage's Tested, 2014).

3. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ & 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Με τον όρο Προσθετική Κατασκευή-ΠΚ (Additive Manufacturing) περιγράφεται μια οικογένεια κατασκευαστικών τεχνικών και μεθόδων στις οποίες τα κομμάτια κατασκευάζονται με τη σταδιακή προσθήκη λεπτών στρώσεων υλικού, σε μεγάλο βαθμό αυτόματα με βάση τα αντίστοιχα ψηφιακά μοντέλα (Gibson I., Rosen D., Stucker B., 2017). Η συγκεκριμένη οικογένεια τεχνικών περιγράφεται συχνά και με τον κάπως πιο πρόσφατο όρο Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing), αν και υπάρχει συνήθως μια λεπτή διαφορά μεταξύ των δύο: ο πιο σωστός επιστημονικά όρος «Προσθετική Κατασκευή» χρησιμοποιείται κυρίως για την περιγραφή του συνόλου των τεχνολογιών αλλά και σε εμπορικό πλαίσιο για την περιγραφή συστημάτων υψηλών επιδόσεων (κυρίως επεξεργασίας μετάλλου) ενώ ο όρος «Τριδιάστατη Εκτύπωση» χρησιμοποιείται κυρίως στην περίπτωση αναφοράς σε συστήματα χαμηλότερων επιδόσεων και κόστους που επεξεργάζονται, κατά κύριο λόγο, διάφορα είδη πλαστικού.

3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Είναι γεγονός ότι η τριδιάστατη εκτύπωση είναι μία τεχνολογία που σχετικά πρόσφατα έχει τραβήξει το ενδιαφέρον των από επιστημονική και οικονομική σκοπιά. Η ιδέα, όμως, της τριδιάστατης εκτύπωσης, όπως και σχετικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας υπάρχουν από αρκετά παλιότερα. Ήδη από την δεκαετία του 1950 εντοπίζεται η περιγραφή μίας μηχανής που ακολουθεί τη λογική της προσθετικής κατασκευής, στο διήγημα επιστημονικής φαντασίας του Raymond F. Jones με τίτλο “Tools of the Trade”. Το 1971 κατοχυρώθηκε από τον Johannes F. Gottwald ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που περιγράφει σε πρωτόλεια μορφή ένα σύστημα τριδιάστατης εκτύπωσης (Εικ. 10) το οποίο βασίζεται στην εξώθηση υλικού (Gonzalez C., 2020) .



ΕΙΚΟΝΑ 10. ΑΦΙΣΑ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΥΡΕΣΙΤΕΧΝΙΑΣ ΤΟΥ J.F. GOTTWALD

Λίγα χρόνια αργότερα, τη δεκαετία του 1980, ο Hideo Kodama εφηύρε, αλλά δεν κατάφερε να κατοχυρώσει, δύο από τις δημοφιλέστερες τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης: την προσθετική κατασκευή με εξώθηση υλικού και με χρήση φωτοπολυμερών που στερεοποιούνται με έκθεση σε λέιζερ. Κατοχύρωσε, ωστόσο, πνευματικά έναν σχεδιογράφο (plotter) με 3 βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Την ίδια δεκαετία κατοχυρώθηκε από την εταιρία τεχνολογίας Raytheon Technologies μια τεχνική κόκκοι μετάλλου συνενώνονταν σε στρώσεις χρησιμοποιώντας ένα λέιζερ ως πηγή ενέργειας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτέλεσε, ουσιαστικά, πρόδρομο των σημερινών τεχνολογιών σύντηξης πούδρας σε κλίνη.

Το 1984 ο Bill Masters κατοχυρώνει πνευματικά την ιδέα ενός συστήματος και της αντίστοιχης διαδικασίας παραγωγής κομματιών με τη βοήθεια H/Y (Computer Automated Manufacturing Process and System) το οποίο βασίζεται στην τοπικά ελεγχόμενη τοποθέτηση υλικού για τη δημιουργία αντικειμένων. Την ίδια χρονιά οι Alain Le Méhauté, Olivier de Witte και Jean Claude André κατοχυρώνουν τη διαδικασία της Στερεολιθογραφίας (Stereolithography) που είναι η δεύτερη πιο διαδεδομένη τεχνική τριδιάστατης εκτύπωσης σήμερα. Το ίδιο έτος η εταιρία R.H. Research αναπτύσσει έναν διδιάστατο εκτυπωτή στον οποίο θερμοπλαστική πρώτη ύλη εξάγεται από ένα ειδικό στόμιο. Το σύστημα του στομίου καθώς και τα υλικά της εταιρίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν σε δύο από τα πρώτα συστήματα 3D εκτύπωσης, τα BPM (Ballistic Particle Manufacturing) και SPI (Sanders Prototyping Inc.).

Το ίδιο περίπου διάστημα η εταιρία 3D Systems Corp. ξεκινάει τις διαδικασίες για να κατοχυρώσει ένα δικό της σύστημα Στερεολιθογραφίας στο οποίο οι στρώσεις φωτοπολυμερούς στερεοποιούνται με την βοήθεια υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας μέσω λέιζερ. Ο κάτοχος του αντίστοιχου διπλώματος ευρεσιτεχνίας, Chuck Hull, θεωρείται από τους πιο σημαντικούς ανθρώπους στον χώρο της τριδιάστατης εκτύπωσης μιας και η προσφορά του στο συγκεκριμένο πεδίο είναι τεράστια και συμπεριλαμβάνει την ανάπτυξη των σχετικών τεχνικών ψηφιακού τεμαχισμού (digital slicing) και μοτίβων εσωτερικής σάρωσης (infill scanning) καθώς και την ανάπτυξη του προτύπου μεταφοράς γεωμετρικών δεδομένων STL. Το 1986 η εταιρία 3D Systems Corporation καταφέρνει να κατοχυρώσει τη λειτουργία του πρώτου εμπορικά διαθέσιμου συστήματος Στερεολιθογραφίας SLA-1 (Εικ. 11).



ΕΙΚΟΝΑ 11. ΣΥΣΤΗΜΑ SLA - 1

Μπορεί η Στερεολιθογραφία να αποτελεί την πρώτη εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία 3D εκτύπωσης, η πιο διαδεδομένη όμως τεχνική σήμερα, τόσο σε παραγωγικό όσο και καταναλωτικό επίπεδο, είναι αυτή της εξώθησης πλαστικού. Το πρώτο σχετικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αφορά το σύστημα Fused Deposition Modeling (FDM), η λειτουργία του οποίου κατοχυρώθηκε το 1988 από τον S. Scott Crump. Τα πρώτα αντίστοιχα συστήματα διατέθηκαν εμπορικά μερικά χρόνια αργότερα, το 1992, από την Stratasys.

Το 1995 παρουσιάζεται από ερευνητές του Ινστιτούτου Fraunhofer για πρώτη φορά άλλη μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος, αυτή της επιλεκτικής τήξης μετάλλου (Selective Laser Melting - SLM). Παράλληλα, διάφορες εταιρίες ξεκίνησαν να πειραματίζονται με υλικά εκτός των θερμοπλαστικών πολυμερών. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να επεκταθεί η χρήση μεταλλικών υλικών σε μεθόδους προσθετικής κατασκευής, προσελκύοντας έτσι όλο και περισσότερο ενδιαφέρον για το πεδίο της τριδιάστατης εκτύπωσης.

Όσο η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής εξελίσσεται, χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα σε τομείς όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυτιλία καθώς και η παραγωγή μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Τομείς που μπορούν να εκμεταλλευτούν την ευελιξία που προσφέρει η 3D εκτύπωσης ξεκίνησαν να ενσωματώνουν αντίστοιχα συστήματα στον παραγωγικό τους εξοπλισμό, και να εξετάζουν σενάρια χρήσης των μεθόδων αυτών για την

απευθείας παραγωγή τελικών κομματιών, παράλληλα φυσικά με τις διαδικασίες παραγωγής που βασίζονται σε παλιότερες και πιο εδραιωμένες μεθόδους. Σε σύγκριση με αυτές, η 3D εκτύπωση φαίνεται να υπερτερεί σε κάποιες περιπτώσεις στο κόστος κατασκευής, στην ταχύτητα ή/και στην ευελιξία σχεδιασμού.

Εκμεταλλεόμενοι την υψηλή ταχύτητα κατασκευής που προσφέρει η προσθετική κατασκευή σε συνδυασμό με τα σχετικά χαμηλά κόστη παραγωγής, εταιρίες και ιδιώτες εξοικονομούν πολύτιμο χρήμα και χρόνο, αποκτώντας έτσι ένα συγκριτικό πλεονέκτημα απέναντι στους ανταγωνιστές τους. Ερευνητές και επαγγελματίες της 3D εκτύπωσης υποστηρίζουν ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν ενδείκνυται μόνο για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων και μοντέλων ή την παραγωγή εξειδικευμένων προϊόντων αλλά μπορεί να αποτελέσει βασικό πυλώνα για την επερχόμενη 4^η βιομηχανική επανάσταση, που θα μεταμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται η παραγωγή και η κατανάλωση. Τομείς όπως η αεροναυπηγική, η παροχή υπηρεσιών υγείας, η εκπαίδευση καθώς και η αντιμετώπιση καταστροφών φαίνεται να έχουν τα μεγαλύτερα περιθώρια εκμετάλλευσης της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής (Minshall T., 2016). Για όλους τους παραπάνω λόγους η αγορά των συστημάτων 3D εκτύπωσης και Προσθετικής Κατασκευής, βιομηχανικών και μη, σήμερα αγγίζει τα 12 δις δολάρια και αναπτύσσεται συνεχώς με πρόβλεψη να φτάσει μέχρι και τα 50 δις δολάρια μέχρι το 2026 (Grand View Research, 2021; Fortune Business Insights, 2020).

3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

3.2.1 ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

α) **Μοντελοποίηση με εναπόθεση τηγμένου υλικού (Fused deposition modeling - FDM):** Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys και είναι, πιθανότατα, η πιο γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος τριδιάστατης εκτύπωσης. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία θερμοπλαστικό υλικό σε μορφή νήματος τροφοδοτείται σε μία θερμαινόμενη κεφαλή. Εκεί υλικό λιώνει και εναποτίθεται στις κατάλληλες θέσεις πάνω σε μία βάση όπου και επαναστερεοποιείται καθώς κρύνει. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζονται και εναποτίθενται διαδοχικά στρώσεις (layers), η μία πάνω από την άλλη έως ότου το μοντέλο ολοκληρωθεί. Πολλές φορές λόγω της γεωμετρίας κάποιων κομματιών απαιτείται η κατασκευή βοηθητικών στηριγμάτων (supports), τα οποία αφαιρούνται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία. Στην πορεία των χρόνων και με τη λήξη των σχετικών διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας αναπτύχθηκαν αντίστοιχα συστήματα από διάφορες εταιρίες, οι οποίες αναφέρονται στην τεχνολογία με τον όρο κατασκευή με συγκόλληση νήματος (Fused Filament Fabrication - FFF)

3.2.2 ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ

- **Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SL):** Η πρώτη μέθοδος προσθετικής κατασκευής / τριδιάστατης εκτύπωσης που είχε μεγάλη εμπορική απήχηση. Σε αυτή την μέθοδο φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη σε υγρή μορφή τοποθετείται σε ένα κάδο με διαφανή βάση. Στη συνέχεια ένα λέιζερ, με την βοήθεια μικρών καθρεπτών, σαρώνει την βάση του κάδου, στερεοποιώντας, έτσι, επιλεκτικά τη ρητίνη για να σχηματιστεί η αντίστοιχη στρώση. Το μοντέλο κατασκευάζεται και εδώ συγκολλώντας διαδοχικές στρώσεις, με κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω (All3DP, 2020).

- **Φωτοπολυμερισμός μέσω ψηφιακού φωτός (Digital light processing - DLP):** Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι παρόμοια με την Στερεολιθογραφία από την οποία διαφέρει στην πηγή του φωτός, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένας σύστημα ψηφιακής προβολής εικόνων. Η χρήση του συστήμα ψηφιακής προβολής επιτρέπει την ταυτόχρονη έκθεση όλη της περιοχής σε φως, γεγονός που επιταχύνει τη διαδικασία σημαντικά. Η γεωμετρία κάθε στρώσης αποτυπώνεται στην ψηφιακή οθόνη του συστήματος η οποία αναλύεται σε τετράγωνα pixel, τα οποία ονομάζονται voxels. Στη συνέχεια μια πηγή υπεριώδους φωτός, τύπου LED συνήθως, χρησιμοποιείται για την έκθεση της αντίστοιχης περιοχής χρησιμοποιώντας σε κάποιες περιπτώσεις και ειδικές διατάξεις μικρο-καθρεπτών (DMD).
- **Στερεολιθογραφία με χρήση μάσκας (Mask Stereolithography - MSLA):** Η μέθοδος αυτή είναι προσομοιάζει στην τεχνολογία DLP είναι όμως αρκετά φθηνότερη από αυτή καθώς χρησιμοποιεί συστοιχίες LED λαμπτήρων UV φωτός, το οποίο διοχετεύεται μέσα από μια οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD). Η οθόνη λειτουργεί ως μάσκα, επιτρέποντας στο φως να περάσει από συγκεκριμένα σημεία, εκθέτοντας έτσι τις αντίστοιχες περιοχές σε υπεριώδη ακτινοβολία προκειμένου να στερεοποιηθεί η ρητίνη και να σχηματιστεί η στρώση. Και εδώ, η ταυτόχρονη έκθεση όλης της στρώσης επιτρέπει σχετικά υψηλές ταχύτητες παραγωγής, όπως στην τεχνολογία DLP. Σε αντίθεση με την DLP, ωστόσο, η ακρίβεια της κατασκευής μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα με την ανάλυση της οθόνης LCD.

3.2.3 ΣΥΝΤΗΞΗ ΠΟΥΔΡΑΣ ΣΕ ΚΛΙΝΗ

- **Επιλεκτική συσσωμάτωση με χρήση λέιζερ (Selective Laser Sintering - SLS):** Σε αυτήν την τεχνική το μοντέλο σχηματίζεται σταδιακά από κάτω προς τα πάνω. Τα σχετικά συστήματα διαθέτουν συνήθως ένα μηχανισμό εναπόθεσης πούδρας, συνήθως πολυμερούς ή μετάλλων με επικάλυψη πολυμερούς, ο οποίος εναποθέτει μια πρώτη λεπτή στρώση στην πλατφόρμα της μηχανής. Στη συνέχεια, μια εστιασμένη ακτίνα λέιζερ σαρώνει με την βοήθεια ενός συστήματος μικρών κατόπτρων τη εναποτεθείσα πούδρα, συσσωματώνοντας έτσι τοπικά τους κόκκους και σχηματίζοντας τη σχετική στρώση. Στην συνέχεια η πλατφόρμα κατεβαίνει κατά μία στρώση, εναποτίθεται μια νέα στρώση πούδρας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Σε αυτήν την τεχνική, η μη συσσωματωμένη πούδρα βοηθά στην στήριξη της κατασκευαζόμενης δομής, καλύπτοντας έτσι την ανάγκη για στηρίγματα.
- **Επιλεκτική τήξη με λέιζερ (Selective laser melting - SLM):** Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή μεταλλικών κομματιών και λειτουργεί παρόμοια με την SLS με βασική διαφορά τη σχετικά υψηλότερη θερμοκρασία που απαιτείται για την τήξη των κόκκων μετάλλου. Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών απαιτείται επίσης η χρήση υποστηρικτικών δομών που αποτρέπουν τις παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Τα κομμάτια διαχωρίζονται από τα στηρίγματα και την πλατφόρμα κατασκευής αφού υποστούν επιπλέον θερμική επεξεργασία για την χαλάρωση των σχετικών παραμενουσών τάσεων.
- **Τήξη με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων (Electron beam melting - EBM):** Αποτελεί μέθοδο παρόμοια με τις προηγούμενες μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων (υψηλής ενέργειας) αντί λέιζερ η EBM για την ταχύτερη τήξη των χρησιμοποιούμενων υλικών, συνήθως μετάλλων και μεταλλικών κραμάτων. Η χρήση δέσμης υψηλότερης ενέργειας αυξάνει, ωστόσο, το ελάχιστο πάχος στρώσης που δύναται να χρησιμοποιηθεί καθώς και το ελάχιστο μέγεθος μοντέλου. Επιπλέον, η χρησιμοποιούμενη

πούδρα πρέπει να είναι αγωγίμη και οι κόκκοι έχουν σχετικά μεγαλύτερο μέγεθος. Τέλος, η τήξη μεταλλικής πούδρας απαιτεί ιδιαίτερο θάλαμο κενό αέρος.

3.2.4 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

- **Εναπόθεση Υλικού (Material jetting - MJ):** Τα σχετικά συστήματα λειτουργούν παρόμοια με απλό εκτυπωτή έγχυσης μελάνης (inkjet) μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση η σχετική κεφαλή εναποθέτει σταγονίδια της πρώτης ύλης αντί μελάνης. Η κεφαλή έχει συνήθως μεγάλο μήκος και διαθέτει μεγάλο αριθμό σχετικών οπών, γεγονός που επιτρέπει τη ταχεία εναπόθεση της απαιτούμενης στρώσης φωτοπολυμερούς. Παράλληλα με την εναπόθεση εκτελείται και η στερεοποίηση του φωτοπολυμερούς μέσω μιας πηγής υπεριώδους φωτός που ακολουθεί την κεφαλή εναπόθεσης. Στην συνέχεια η πλατφόρμα κατεβαίνει όσο το απαιτούμενο πάχος/ύψος στρώσης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η ταχύτητα κατασκευής είναι σχετικά υψηλή καθώς ο όγκος των παραγόμενων μοντέλων δεν επηρεάζει το χρόνο κατασκευής. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι στη συγκεκριμένη τεχνολογία είναι εφικτή η κατασκευή μοντέλων από πολλαπλά υλικά ή χρώματα.
- **Εναπόθεση σε σταγονίδια (Drop on demand - DOD):** Και η συγκεκριμένη τεχνική αφορά στην εναπόθεση σταγονιδίων μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση οι κεφαλές διαθέτουν σχετικά μικρό αριθμό οπών και δεν αποτελούν συστοιχία μεγάλου μήκους όπως στην τεχνική MJ, με αποτέλεσμα να είναι σχετικά μικρότερη η ταχύτητα. Τα αντίστοιχα συστήματα χρησιμοποιούνται, κυρίως, για την κατασκευή κέρινων ομοιωμάτων που απαιτούνται στη χύτευση χαμένου κεριού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων. Τα σχετικά συστήματα διαθέτουν συνήθως δύο κεφαλές, μία για την εναπόθεση του βασικού υλικού (συνήθως κάποιος τύπος συνθετικού κεριού) και μία για την εναπόθεση υλικού για τα στηρίγματα. Το υλικό των στηριγμάτων είναι υδατοδιάλυτο και αφαιρείται σχετικά εύκολα μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Τα σχετικά συστήματα διαθέτουν, επίσης, συχνά εργαλεία κοπής που επιτρέπουν τη διόρθωση πιθανών ατελειών στο περίγραμμα κάθε στρώσης μέσω φρεζαρίσματος.

3.2.5 ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ

- **Συγκόλληση κόκκων άμμου (Sand binder Jetting - SBJ):** Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι παρόμοια με την SLS καθώς αφορά στην συγκόλληση κόκκων υλικού, συνήθως άμμου ή γύψου, έτσι ώστε να σχηματισθούν οι απαιτούμενες στρώσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όμως, η συνένωση των κόκκων επιτυγχάνεται με την εναπόθεση σταγονιδίων συγκολλητικής ουσίας και όχι με θέρμανση των κόκκων. Η διαδικασία παραγωγής κάθε στρώσης περιλαμβάνει την εναπόθεση μιας στρώσης πούδρας και την συνένωση των κόκκων, όπως και στην SLS. Η εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας επιτρέπει και τον επιλεκτικό χρωματισμό της πούδρας καθιστώντας δυνατή την κατασκευή πολύχρωμων κομματιών. Η μέθοδος χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή αναλώσιμων καλουπιών/εκμαγείων από άμμο, ειδικά για τη χύτευση κομματιών πολύπλοκης γεωμετρίας.
- **Συγκόλληση κόκκων μετάλλου (Metal binder Jetting - MBJ):** Και στη συγκεκριμένη μέθοδο, συγκολλητική ουσία εναποτίθεται επιλεκτικά σε μία στρώση μεταλλικής πούδρας συγκολλώντας τους αντίστοιχους κόκκους. Στη συνέχεια εναποτίθεται μια νέα στρώση πούδρας και συγκολλητικής ουσίας σχηματίζοντας έτσι την επόμενη στρώση. Τα μεταλλικά κομμάτια που παράγονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο έχουν μικρότερη αντοχή από αυτά που παράγονται με μεθόδους σύντηξης σε κλίνη πούδρας. Για να αυξηθεί, λοιπόν, η σχετική

αντοχή τα κομμάτια υπόκεινται σε περαιτέρω θερμική επεξεργασία, έτσι ώστε να απομακρυνθεί η συγκολλητική ουσία και να πληρωθούν οι σχετικοί πόροι από επιπλέον υλικό, καθώς και να βελτιωθούν οι μεταλλουργικές τους ιδιότητες.

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Για να είναι ποιοτικά συγκρίσιμο το μοντέλο 3D εκτύπωσης με αυτά που παράγονται μέσω της μεθόδου χύτευσης με έγχυση ακριβείας θα πρέπει να επιλεγεί μία τεχνολογία η οποία θα μπορεί να επιτύχει αντίστοιχα υψηλό βαθμό ακρίβειας και ποιότητας επιφάνειας, τόσο σε ότι αφορά στη εξωτερική μορφή του μοντέλου όσο και στα εσωτερικά τμήματά του (Μπιλάλης Ν. & Μαραβελάκης Ε., 2014).

Μετά από μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας εντοπίστηκαν τέσσερις μέθοδοι που μπορούν να θεωρηθούν οι πλέον κατάλληλες για την παραγωγή φιγούρων/μοντέλων για επιτραπέζια παιχνίδια: η Εναπόθεση Υλικού (Material Jetting - MJ), η Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion - ME), η Στερεολιθογραφία με χρήση Μάσκας (Mask Stereolithography - MSLA) και η Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering – SLS). Οι παραπάνω μέθοδοι καλύπτουν σχεδόν όλες τις κατηγορίες τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής που σχετίζονται με την επεξεργασία πολυμερών. Δεν εξετάστηκε κάποια μέθοδος Εναπόθεσης Συγκολλητικής ουσίας (Binder jetting), διότι αφορούν κυρίως στην επεξεργασία μεταλλικών και κεραμικών υλικών.

Το σκεπτικό επιλογής των συγκεκριμένων μεθόδων καθώς και τα σχετικά χαρακτηριστικά που τις καθιστούν κατάλληλες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

4.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ MJ

Η μέθοδος MJ εκτιμάται ότι είναι μία καλή επιλογή για την παραγωγή μοντέλων για επιτραπέζια παιχνίδια διότι:

1. επιτρέπει την χρήση πολλαπλών διαφορετικών υλικών,
2. επιτρέπει την χρήση διαφορετικών χρωμάτων,
3. διαθέτει σχετικά υψηλή ταχύτητα κατασκευής, και
4. επιτρέπει σχετικά υψηλή διαστασιολογική/μορφολογική ακρίβεια.

Η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών υλικών και χρωμάτων βοηθά στη μείωση του κόστους παραγωγής, καθώς το εκτυπωμένο μοντέλο δεν απαιτεί κάποιου είδους βαφή. Επιπλέον, η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης διαφορετικών υλικών επιτρέπει την παραγωγή ενός μοντέλου τα εύθραυστα μέρη του οποίου αποτελούνται από σχετικά ανθεκτικότερο υλικό, αυξάνοντας έτσι τον προσδοκώμενο χρόνο ζωής του μοντέλου. Το πόνι του γνωστού επιτραπέζιου παιχνιδιού ‘Monopoly’, για παράδειγμα, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 12 θα μπορούσε κάλλιστα να παραχθεί από έναν σύστημα MJ με δυνατότητα ταυτόχρονης εκτύπωσης δύο υλικών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ρητίνη κόκκινου



ΕΙΚΟΝΑ 12. ΠΙΟΝΙ ΤΡΑΙΝΟ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ ΜΟΝΟΠΟΛΗ

χρώματος, χαμηλής αντοχής για την κατασκευή του κυρίως σώματος, λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους. Αντίστοιχα, η δεύτερη κεφαλή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εναπόθεση ρητίνης μαύρου χρώματος, υψηλότερης αντοχής (και υψηλότερου κόστους) και την κατασκευή πιο ευαίσθητων τμημάτων, όπως οι ρόδες ή η καμινάδα.

Ένα άλλο πιο σύνθετο παράδειγμα θα ήταν η παραγωγή ενός κομματιού με πολύ λεπτά και άρα εύθραυστα στοιχεία στην γεωμετρία του, όπως η χορδή ενός τόξου (Εικ. 13) ή το δόρυ στο χέρι ενός πολεμιστή. Ένα από τα πιο δυσάρεστα πράγματα που μπορούν να συμβούν σε έναν συλλέκτη φιγούρων είναι να σπάσουν οι φιγούρες του. Οι πιθανότητες φθοράς τους αυξάνονται γραμμικά σε σχέση με την χρήση τους. Σε αυτή την περίπτωση, επιλέγοντας τα κατάλληλα υλικά από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων για κάθε τμήμα του μοντέλου μπορούμε να παράγουμε φιγούρες οι οποίες έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής.

Η παραπάνω φιγούρα είναι κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Με τη μέθοδο MJ θα μπορούσε να παραχθεί και πάλι από πλαστικό, αλλά η χορδή του τόξου θα ήταν κατασκευασμένη από μία ελαστικότερη φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη προσθέτοντας αντοχή στο συγκεκριμένο τμήμα και ρεαλισμό στο μοντέλο. Κάτι παρόμοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί στο δόρυ ενός πολεμιστή το οποίο θα αποτελούταν από μία σκληρότερη ρητίνη σε σχέση με το υπόλοιπο μοντέλο για να μειωθεί η πιθανότητα φθοράς του μέσω της χρήσης του.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου, που σχετίζεται με τη δυνατότητα παράλληλης χρήσης πολλαπλών υλικών ή/και χρωμάτων, είναι ότι εξοικονομείται χρόνος και κόστος που αφορούν σε μετέπειτα επεξεργασία. Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μοντέλου στο οποίο η παράλληλη χρήση διαφανών και έγχρωμων υλικών επιτρέπει την απεικόνιση πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών και σχηματισμών που θα ήταν αδύνατο να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνική προσθετικής κατασκευής ή χύτευσης (3d-prints, 2019)

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της τεχνικής MJ είναι τα σχετικά εύκολα αφαιρούμενα, υδατοδιαλυτά στηρίγματα. Χρησιμοποιώντας υλικά στήριξης τα οποία αφαιρούνται εύκολα με την χρήση νερού υπό πίεση ή μέσα σε λουτρό υπερήχων, το τελικό μοντέλο διαχωρίζεται από τα στηρίγματα με ευκολία χωρίς να μένουν καθόλου ίχνη των στηριγμάτων. Το χαρακτηριστικό



ΕΙΚΟΝΑ 13. ΦΙΓΟΥΡΑ ΤΟΞΟΤΗ



ΕΙΚΟΝΑ 14. MJ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΡΔΙΑΣ

αυτό καθιστά δυνατή την παραγωγή μοντέλων υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας σε οποιοδήποτε προσανατολισμό.

Τέλος, επειδή η κεφαλή του εκτυπωτή καλύπτει ολόκληρο το πλάτος της μηχανής και κινείται μόνο κατά μήκος, η ταχύτητα εκτύπωσης επηρεάζεται ελάχιστα από τον όγκο και τον αριθμό των φιγούρων που εκτυπώνονται παράλληλα, πετυχαίνοντας έτσι συγκριτικά μεγαλύτερες ταχύτητες χωρίς να θυσιάζεται η υψηλή ποιότητα και ανάλυση.

4.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ

Οι τεχνικές που βασίζονται στην εξώθηση θερμοπλαστικών αποτελούν, μακράν τις πιο διαδεδομένες και γνωστές μεθόδους τριδιάστατης εκτύπωσης, είτε πρόκειται για μικρό όγκο παραγωγής είτε για μεγάλο. Τα στοιχεία που την καθιστούν υποψήφια για την παραγωγή επιτραπέζιων μοντέλων και φιγούρων είναι τα εξής:

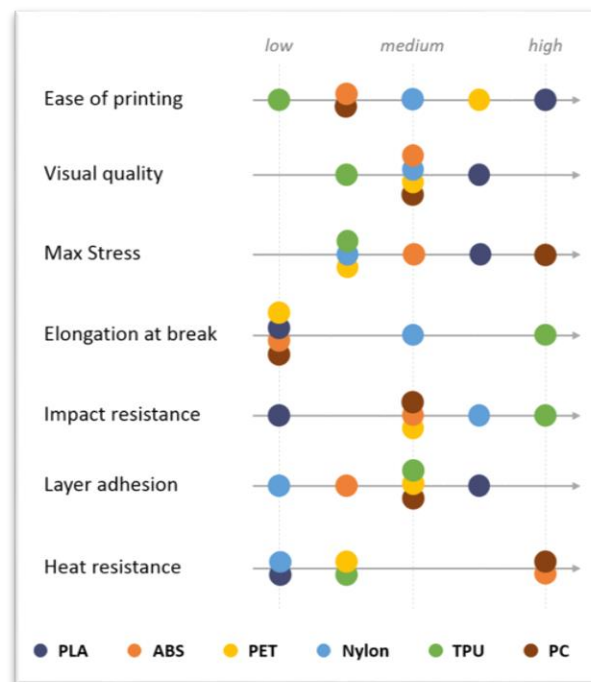
1. ποικιλία υλικών,
2. μικρότερη καμπύλη μάθησης σε σχέση με άλλες μεθόδους,
3. χαμηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού, και
4. πολλές δυνατότητες παραμετροποίησης της κατασκευής (Εικ. 15).



ΕΙΚΟΝΑ 15. LAYERS ΚΑΙ MOTIBO INFILL ΤΗΣ ΜΕ

Η προμήθεια ενός συστήματος ΜΕ προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων από μία μεγάλη γκάμα υλικών. Ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της εφαρμογής ή του πελάτη μπορεί να επιλεγεί το υλικό που διαθέτει τις κατάλληλες ιδιότητες (Εικ. 16). Μερικά από τα υλικά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, που τα καθιστούν ιδανικά για παραγωγή φιγούρων, είναι και τα εξής (Bournias Varotsis A., 2021):

- Πολυγαλακτικό οξύ (PLA)
 - Ευκολία χρήσης
 - Υψηλή ποιότητα εμφάνισης
 - Υψηλή συνεκτικότητα μεταξύ των στρώσεων
- Πολυκαρβονικό (PC)
 - Υψηλή μηχανική αντοχή
 - Υψηλή θερμική αντοχή
- Θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU)
 - Υψηλή ελαστικότητα
 - Υψηλή αντοχή σε κρούση



ΕΙΚΟΝΑ 16. ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ

Με βάση τα παραπάνω, για την παραγωγή ενός συλλεκτικού μοντέλου που προορίζεται για έκθεμα και για το οποίο μας ενδιαφέρει, κυρίως, η εμφάνιση, θα προτιμηθεί η χρήση PLA. Αντίστοιχα, για κάποιο μοντέλο το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι εύκολο να μεταφερθεί και απαιτεί συνεπώς υψηλότερη αντοχή, θα προτιμηθεί η χρήση PC λόγω των καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων του.

Τα περισσότερα συστήματα ME απευθύνονται σε καταναλωτές, κυρίως για ιδιωτική χρήση, και είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να είναι εύκολα και φθηνά στην χρήση. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον τεράστιο όγκο πληροφοριών και οδηγιών που είναι πλέον διαθέσιμα μειώνουν τον απαιτούμενο χρόνο εκμάθησης και δοκιμών. Αυτό φυσικά συνεπάγεται την σχετικά γρήγορη ένταξη ενός η περισσότερων συστημάτων ME στην παραγωγική διαδικασία μιας εταιρίας.

Καθώς την κύρια αγορά εκτυπωτών ME αποτελούν ερασιτέχνες και ιδιώτες, το αντίστοιχο κόστος προμήθειας είναι αρκετά μικρό και ανταγωνιστικότερο άλλων πιο εξειδικευμένων και πολύπλοκων μεθόδων τριδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό αποτελεί ένα επιπλέον οικονομικό πλεονέκτημα καθώς απαιτείται μικρότερο αρχικό κεφάλαιο για την προμήθεια εξοπλισμού παραγωγής.

Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα που προσφέρει η διευρυμένη χρήση και απλότητα αυτών των εκτυπωτών είναι ότι έχει επιτρέψει την ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών συστημάτων, προσφέροντας έτσι ακόμα μεγαλύτερη δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες του χρήστη ή/και της εφαρμογής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της δυνατότητας αποτελεί το λογισμικό ανοικτού κώδικα *Octoprint*, που δίνει την δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης του εκτυπωτή από απόσταση μέσω του διαδικτύου, δυνατότητα που επιτρέπει τη μείωση του κόστους λειτουργίας και ελέγχου μίας εγκατάστασης 3D εκτυπωτών.

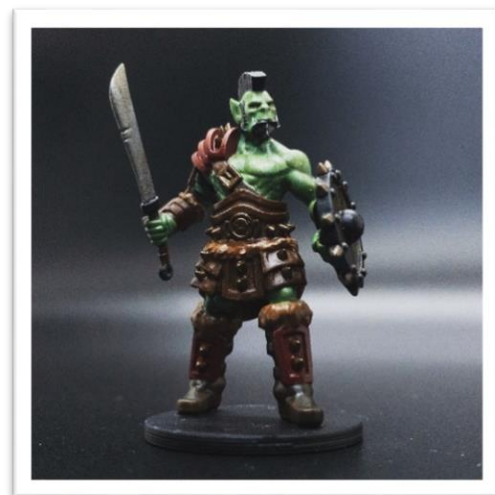
4.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ MSLA

Η μέθοδος MSLA είναι μια ακόμα μέθοδος για την παραγωγή μοντέλων και φιγούρων για επιτραπέζια παιχνίδια. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής η MSLA διαθέτει τα παρακάτω συγκριτικά πλεονεκτήματα:

- υψηλή ακρίβεια, ειδικά στην απόδοση λεπτομερειών (Εικ. 17),
- υψηλή ταχύτητα, και
- καλή μηχανική αντοχή.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των εκτυπωτών MSLA που καθορίζουν την ποιότητα των παραγόμενων μοντέλων και την ακρίβεια στην απόδοση των χαρακτηριστικών είναι η ανάλυση της οθόνης LCD. Καθώς η τεχνολογία LCD είναι πια αρκετά ώριμη, οι τιμές των αντίστοιχων οθονών είναι αρκετά χαμηλές, γεγονός που μειώνει το κόστος παραγωγής και την τιμή των εκτυπωτών MSLA.

Η δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων με υψηλό βαθμό λεπτομέρειας, σχετικά γρήγορα και με σχετικά χαμηλό κόστος συνετέλεσε στο να αποτελεί η MSLA



ΕΙΚΟΝΑ 17. MSLA ΦΙΓΟΥΡΑ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟΥ ΠΑΙΧΝΙΔΙΟΥ

τη δεύτερη πιο διαδεδομένη μέθοδο οικιακής αλλά και εταιρικής τριδιάστατης εκτύπωσης.

Η σχετικά καλή αντοχή των μοντέλων σχετίζεται με τα χρησιμοποιούμενα υλικά αλλά και τη μέθοδο σχηματισμού των στρώσεων. Η χρήση φωτοπολυμεριζόμενων ρητινών και η ταυτόχρονη έκθεση όλης της στρώσης σε φως επιτρέπει την δημιουργία πιο ομοιογενών στρώσεων και καθιστά τη μηχανική συμπεριφορά των μοντέλων πιο ιστροπική σε σχέση με άλλες μεθόδους. Το σχετικά υψηλότερο κόστος των ρητινών σε συνδυασμό με την ανάγκη αφαίρεσης των σχετικών υπολειμμάτων μετά την εκτύπωση αυξάνει κάπως το τελικό κόστος παραγωγής ενός μοντέλου. Η επικινδυνότητα των χρησιμοποιούμενων ρητινών και διαλυτών καθιστά, επίσης, απαραίτητη την χρήση εξοπλισμού προστασίας για την διαχείριση της ρητίνης και τον καθαρισμό του μοντέλου.

Η υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα παραγωγής σε συνδυασμό με την καλές μηχανικές ιδιότητες του μοντέλου καθιστούν τη MSLA ιδανική για την κατασκευή του προτύπου (master figure) με βάση το οποίο θα κατασκευαστεί ένα ελαστικό καλούπι παραγωγής των τελικών κομματιών. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι επίσης δυνατή η απευθείας κατασκευή του καλουπιού με τη χρήση MSLA και κατάλληλης ρητίνης (αντοχή σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες), έτσι να εξοικονομηθεί χρόνος και κόστος παραγωγής.

4.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ SLS

Ενδιαφέρον έχει η περίπτωση της μεθόδου SLS η οποία είναι μία από τις πιο προηγμένες μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής. Η τεχνική πολυπλοκότητα της διαδικασίας απαιτεί υψηλή τεχνογνωσία και εκτενή μελέτη με αποτέλεσμα το κόστος και ο χρόνος ανάπτυξης αντίστοιχων συστημάτων να είναι σχετικά υψηλός. Τα συστήματα SLS διαθέτουν επίσης αρκετά στοιχεία αυτοματισμού και ειδικές διατάξεις που εξασφαλίζουν υψηλή ποιότητα εκτύπωσης. Επιπλέον, η συντήρηση και η χρήση των συστημάτων απαιτεί ειδικές γνώσεις, γεγονός που καθιστά τη λειτουργία συστημάτων SLS πιο ακριβή. Αυτά σε συνδυασμό με το πολύ υψηλό κόστος αγοράς καθιστούν σχεδόν απαγορευτική την χρήση από μικρομεσαίες εταιρίες και για μικρό-μεσαίο όγκο παραγωγής, πόσο μάλλον από ιδιώτες.

Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, η τεχνική SLS παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- καλή ακρίβεια και καλές μηχανικές ιδιότητες,
- υψηλή παραγωγική απόδοση, και
- δεν υφίσταται ανάγκη στήριξης των μοντέλων.

Τα προϊόντα ενός SLS συστήματος είναι συνήθως εξαιρετικά από άποψη ποιότητας και αντοχής και για αυτό αποτελούν πολλές φορές και τα τελικά προϊόντα (Εικ. 18). Τα συστήματα διαθέτουν συνήθως μεγάλο χώρο κατασκευής, επιτρέποντας στην περίπτωση της παραγωγής φιγούρων την παραγωγή πολλών μοντέλων σε μια παρτίδα. Επιπλέον, η απουσία της ανάγκης για στηρίγματα, που υπάρχει στις άλλες υποψήφιες μεθόδους, επιτρέπει την παράλληλη κατασκευή μοντέλων σε πολλούς «ορόφους»/επίπεδα, γεγονός που μειώνει ακόμα περισσότερο τον χρόνο προετοιμασίας και ελέγχου.



ΕΙΚΟΝΑ 18. ΚΟΜΜΑΤΙΑ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΑ ΜΕ ΕΚΤΥΠΩΤΗ SLS

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το σχετικά υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης που σχετίζεται με το κόστος προμήθειας του εξοπλισμού και των υλικών αλλά και με τις ειδικές απαιτούμενες γνώσεις συντήρησης. Η κατασκευή μοντέλων και χαρακτηριστικών πολύ μικρού μεγέθους καθώς και μεγάλων λείων επιφανειών είναι, επίσης, σχετικά δύσκολη λόγω του σχετικά μεγάλου μεγέθους των κόκκων καθώς και των συρρικνώσεων που παρατηρούνται ως συνέπεια των σχετικά υψηλών θερμοκρασιών.

4.2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου Προσθετικής Κατασκευής ακολουθήθηκε η διαδικασία ανάλυσης πολλαπλών κριτηρίων, που προτείνεται από τους Gibson I., Rosen D. & Stucker B. (2017, κεφ. 13). Το πρώτο βήμα της διαδικασίας αφορά στην επιλογή των κριτηρίων και τον καθορισμό των αντίστοιχων κλιμάκων και της μεθόδου μέτρησης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αξιολόγηση κάθε εναλλακτικής μεθόδου ως προς κάθε κριτήριο και η κανονικοποίηση των σχετικών βαθμολογιών προς αποφυγή στρεβλώσεων λόγω διαφορών στις κλίμακες μέτρησης των κριτηρίων. Τέλος εξάγεται η συνολική βαθμολογία κάθε μεθόδου, βάσει συγκεκριμένων σεναρίων χρήσης και καθορισμού των αντίστοιχων συντελεστών βαρύτητας.

4.2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

Η πλήρης αξιολόγηση των τεχνικών και των πιθανών αντικρουόμενων απαιτήσεων του χειριστή απαιτεί την ανάλυση πολλών κριτηρίων. Τα κριτήρια που επελέγησαν για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι τα εξής:

- **Ταχύτητα (κλίμακα 0-10):** Το συγκεκριμένο κριτήριο σχετίζεται με τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής από τη μηχανή ανά μοντέλο αλλά και με τη δυνατότητα παράλληλης εκτύπωσης πολλών μοντέλων. Δε λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος σχεδιασμού, προετοιμασίας και καθαρισμού/φινιρίσματος. Καθώς το συγκεκριμένο κριτήριο επηρεάζεται από διάφορα χαρακτηριστικά των συστημάτων, όπως το μέγεθος της

διαθέσιμης επιφάνειας ή του διαθέσιμου χώρου κατασκευής ενός συστήματος και η ποιότητα επιμέρους εξαρτημάτων, τα οποία διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ενιαία μέθοδος και μονάδα μέτρησής της. Κατά συνέπεια επιλέχθηκε ως κλίμακα αξιολόγησης του κριτηρίου η ποιοτική κλίμακα 0-10.

- **Ακρίβεια (mm):** Αφορά στο βαθμό απόδοσης διαστάσεων και μικρών χαρακτηριστικών/λεπτομερειών, όπως παρέχεται από τους κατασκευαστές του εξοπλισμού, λαμβάνοντας υπόψη και το εκτιμώμενο τυπικό μέγεθος των μοντέλων που πρέπει να κατασκευαστούν στη συγκεκριμένη εφαρμογή.
- **Ευελιξία (κλίμακα 0-10):** Αφορά στο βαθμό ευκολίας στη χρήση και στην ενσωμάτωση στην παραγωγική διαδικασία, καθώς και στην ποικιλία των υλικών. Η βαθμολόγηση του συγκεκριμένου κριτηρίου στην ποιοτική κλίμακα 0-10, βασίστηκε στην άποψη ειδικών και επιστημόνων στο πεδίο της Προσθετικής Κατασκευής.
- **Κόστος υλικών (€/kg):** Περιλαμβάνει το κόστος τόσο του βασικού υλικού όσο και πιθανού υλικού στήριξης, ως ποσοστού του βασικού υλικού. Το σχετικό κόστος αφορά σε ευρείας χρήσης, μη εξειδικευμένα υλικά.
- **Κόστος εξοπλισμού (€):** Κόστος προμήθειας συστήματος/3D εκτυπωτή.

Σχετικά με το κόστος παραγωγής, επισημαίνεται ότι δεν συνυπολογίστηκε το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο θεωρείται αμελητέο όπως και το κόστος εργασίας καθώς αυτό σχετίζεται κυρίως με εργασίες προετοιμασίας και μετεπεξεργασίας που δεν συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση.

Τα παραπάνω κριτήρια/χαρακτηριστικά, με εξαίρεση το κόστος υλικών, δεν σχετίζονται μόνο με την τεχνολογία αλλά διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με το σύστημα/εκτυπωτή που εξετάζεται. Για παράδειγμα, το κόστος προμήθειας ενός συστήματος ME ή MSLA μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με το διαθέσιμο κατασκευαστικό χώρο της μηχανής και την ποιότητα των επιμέρους εξαρτημάτων. Αντίστοιχα, συστήματα που ανήκουν στην ίδια τεχνολογική κατηγορία μπορεί να επιτυγχάνουν αρκετά διαφορετικές επιδόσεις από άποψη ταχύτητας, ευελιξίας και ακρίβειας ως συνέπεια του σχεδιασμού τους και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Για να εξαχθεί, λοιπόν, μια όσο γίνεται αντιπροσωπευτικότερη εικόνα κάθε τεχνολογίας, αποφασίστηκε η βαθμολόγηση των κριτηρίων της ταχύτητας, της ακρίβειας, της ευελιξίας και του κόστους προμήθειας να βασιστεί σε δύο συστήματα ανά τεχνολογία, ενός χαμηλών σχετικά προδιαγραφών (low-end) και ενός υψηλών προδιαγραφών (high-end) από τα οποία εξάγεται μία μέση τιμή ανά κριτήριο.

Για την επιλογή των σχετικών συστημάτων ελήφθησαν υπόψη και κάποιοι περιορισμοί που αφορούν τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αρχικά σε ό,τι αφορά το μέγεθος των μοντέλων υποθέτουμε ότι το μέσο μέγεθος/ύψος μιας φιγούρας είναι περίπου 37mm, μια τιμή που μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική των περισσότερων μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε επιτραπέζια παιχνίδια. Αντίστοιχα το ελάχιστο μέγεθος ορίστηκε στα 20mm και το μέγιστο στα 54mm. Θεωρήθηκε, επίσης, ότι τα μοντέλα είναι πλήρως γεμάτα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αντοχή, καθώς και ότι διαθέτουν αρκετά λεπτομερή χαρακτηριστικά, υπόθεση που αυξάνει τις απαιτήσεις τόσο σε ό,τι αφορά το ελάχιστο πάχος στρώσης όσο και τη χρήση στηριγμάτων.

Τα συστήματα που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της ανάλυσης είναι τα εξής:

- MJ: Stratasys Polyjet 3D και Stratasys J55

- MSLA: Anycubic Photon Mono και Peopoly Phenom
- ME: Creality Ender 3 V2 και Ultimaker S3
- SLS: Sintratec Kit και Sinterit Lisa

4.2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

Η αξιολόγηση κάθε τεχνολογίας ανά κριτήριο έχει ως εξής.

Ταχύτητα

- MJ: 8,
 - ▲ Κατασκευαστικός χώρος: 490x390x200mm - 140x200x190mm
 - ▲ Ταχύτητα (Z άξονας): 28mm/h
 - ▲ Η ποσότητα του όγκου εκτύπωσης στον X και Y άξονα επιηρεάζει ελάχιστα την ταχύτητα.
- MSLA: 10
 - ▲ Κατασκευαστικός χώρος: 115x65x155mm - 346x194x400mm
 - ▲ Ταχύτητα (Z άξονας): 60mm/h
 - ▲ Η ποσότητα του όγκου εκτύπωσης στον X και Y άξονα δεν επιηρεάζει την ταχύτητα
- ME: 4
 - ▲ Κατασκευαστικός χώρος: 220x220x250mm - 230x190x200mm
 - ▲ Ταχύτητα (X, Y άξονες): 60mm/s
 - ▲ Η ποσότητα του όγκου εκτύπωσης στον X και Y άξονα επιηρεάζει δραματικά την ταχύτητα
- SLS: 6
 - ▲ Κατασκευαστικός χώρος: 600x520x380 mm - 150x200x150mm
 - ▲ Ταχύτητα (X, Y άξονες): 650mm/s
 - ▲ Η ποσότητα του όγκου εκτύπωσης στον X και Y άξονα επιηρεάζει δραματικά την ταχύτητα

Ακρίβεια

- MJ: 0,05mm
- MSLA: 0,1mm
- ME: 0,5mm
- SLS: 0,3mm

Ευελιξία

- MJ: 5
 - ▲ Ποικιλία υλικών: 8 (Μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων υλικών και χρωμάτων)
 - ▲ Προσαρμογή/Τροποποίηση: 2 (Δύσκολη τροποποίηση προσαρμογή σε απαιτήσεις της παραγωγής)
- MSLA: 2
 - ▲ Ποικιλία υλικών: 2 (Μικρή ποικιλία φωτοπολυμερών)
 - ▲ Προσαρμογή/Τροποποίηση: 4 (Σχετικά δύσκολη από τεχνικής άποψης η τροποποίηση)
- ME: Συνολική βαθμολογία: 10
 - ▲ Ποικιλία υλικών: 10 (Πολύ μεγάλη ποικιλία υλικών και χρωμάτων)

- ▲ Προσαρμογή/Τροποποίηση: 10 (Πολύ μεγάλη δυνατότητα προσαρμογών)
- SLS: Συνολική βαθμολογία: 1.5
 - ▲ Ποικιλία υλικών: 2 (Μικρή ποικιλία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα).
 - ▲ Προσαρμογή/Τροποποίηση: 1 (Πρακτικά μηδενικές δυνατότητες τροποποίησης)

Κόστος υλικών

- MJ: 650€/kg
- MSLA: 50€/kg
- ME: 25€/kg
- SLS: 55€/kg

Κόστος εξοπλισμού

- MJ: 40500€
- MSLA: 1300€
- ME: 2075€
- SLS: 7500€

Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός του συνολικού βαθμού καταλληλότητας κάθε τεχνολογίας και να αποφευχθούν στρεβλώσεις που οφείλονται στις διαφορές στις κλίμακες μέτρησης των μεγεθών, πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση των τιμών σε κλίμακα $[0, 1]$, με το 0 να αντιστοιχεί στην χαμηλότερη/χειρότερη επίδοση ανά κριτήριο και το 1 στη βέλτιστη.

Για τον υπολογισμό των κανονικοποιημένων τιμών στα κριτήρια που επιθυμούμε την μεγιστοποίησή τους (Ταχύτητα-Ακρίβεια-Ευελιξία) χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$r = (a - a_{\min}) / (a_{\max} - a_{\min}) \quad (1)$$

όπου r η κανονικοποιημένη τιμή μιας τεχνολογίας σε ένα κριτήριο, a η αντίστοιχη αρχική τιμή, a_{\min} η ελάχιστη τιμή για το συγκεκριμένο κριτήριο μεταξύ των υποψήφιων τεχνολογιών και a_{\max} η μέγιστη.

Για τα κριτήρια που επιθυμούμε την ελαχιστοποίησή τους (Κόστος υλικών-Κόστος εξοπλισμού) χρησιμοποιήθηκε, αντίστοιχα, ο παρακάτω τύπος.

$$r = (a_{\max} - a) / (a_{\max} - a_{\min}) \quad (2)$$

Οι κανονικοποιημένες τιμές ανά τεχνολογία δίνονται στον Πίνακα 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΑΝΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΚΡΙΤΗΡΙΑ				
	Ταχύτητα	Ακρίβεια	Ευελιξία	Κόστος Υλικών	Κόστος Εξοπλισμού
MJ	0,66	1,00	0,41	0,00	0,00
MSLA	1,00	0,88	0,05	0,96	1,00
ME	1,00	0,00	1,00	1,00	0,98
SLS	0,33	0,45	0,00	0,95	0,84

4.2.4 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΡΗΣΗΣ

Για την συνολική αξιολόγηση των τεχνολογιών και την κατάρτιση των συντελεστών βαρύτητας ανά κριτήριο καταρτίστηκαν τρία σενάρια χρήσης: το σενάριο Α στο οποίο αποδίδεται σχετικά μεγαλύτερη βαρύτητα στα στοιχεία κόστους, το σενάριο Β που αποδίδεται σχετικά μεγαλύτερη βαρύτητα στην ταχύτητα και την ακρίβεια και το σενάριο Γ, που αποδίδει ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια.

Για τον υπολογισμό της συνολικής επίδοσης s_i κάθε τεχνολογίας i χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$s_i = \sum_{j=1}^4 w_j r_{ij} \quad (3)$$

Όπου w_j η βαρύτητα του κριτηρίου j στο συγκεκριμένο σενάριο και r_{ij} η κανονικοποιημένη τιμή της επίδοσης της τεχνολογίας i ως προς το κριτήριο j .

Τα τρία σενάρια και οι αντίστοιχες βαρύτητες κάθε κριτηρίου δίνονται στον Πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	ΣΕΝΑΡΙΑ		
	Α	Β	Γ
ΤΑΧΥΤΗΤΑ	0,15	0,3	0,2
ΑΚΡΙΒΕΙΑ	0,15	0,3	0,2
ΕΥΕΛΙΞΙΑ	0,1	0,1	0,2
ΚΟΣΤΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	0,3	0,15	0,2
ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ	0,3	0,15	0,2

Με βάση τα παραπάνω καταρτίστηκε ο τελικός πίνακας αξιολόγησης των εναλλακτικών τεχνολογιών ανά σενάριο χρήσης/εκμετάλλευσης (Πίνακας 3). Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 φαίνεται να ξεχωρίζουν βαθμολογικά οι μέθοδοι MSLA και ME και για τα τρία εξετασθέντα σενάρια χρήσης. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, καθώς τα σχετικά μεγάλα κόστη εξοπλισμού και υλικών για τις τεχνολογίες MJ και SLS φαίνεται να μειώνουν σημαντικά τις αντίστοιχες συνολικές επιδόσεις.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προκύπτει από την ανάλυση των σχετικών βαθμολογιών αφορά στη σύγκριση μεταξύ των δύο επικρατέστερων τεχνολογιών ME και MSLA στην περίπτωση των σεναρίων Α και Γ, στα οποία οι δύο τεχνολογίες αποτιμώνται σχεδόν ισοδύναμες. Με βάση τα σχετικά αποτελέσματα, φαίνεται ότι εάν ο χρήστης επιθυμεί να διατηρήσει το κόστος χαμηλά ή/και απαιτεί ένα σύστημα που θα μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά για διάφορα σενάρια χρήσης τότε καλύτερη επιλογή αποτελούν συστήματα που βασίζονται στις συγκεκριμένες τεχνολογίες.

Εξετάζοντας, ωστόσο, στην περίπτωση του σεναρίου Β (απόδοση υψηλότερης βαρύτητας σε ταχύτητα και ακρίβεια) βλέπουμε ότι υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των δύο επικρατέστερων μεθόδων με την MSLA να υπερτερεί της ME. Καθώς η υψηλή ακρίβεια, σε πρώτο βαθμό, αλλά και η ταχύτητα αποτελούν βασικές απαιτήσεις στην κατασκευή φιγούρων/μοντέλων για επιτραπέζια παιχνίδια εκτιμάται ότι η επιλογή ενός MSLA συστήματος αποτελεί την καλύτερη επιλογή στις παρούσες συνθήκες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΤΕΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΡΗΣΗΣ

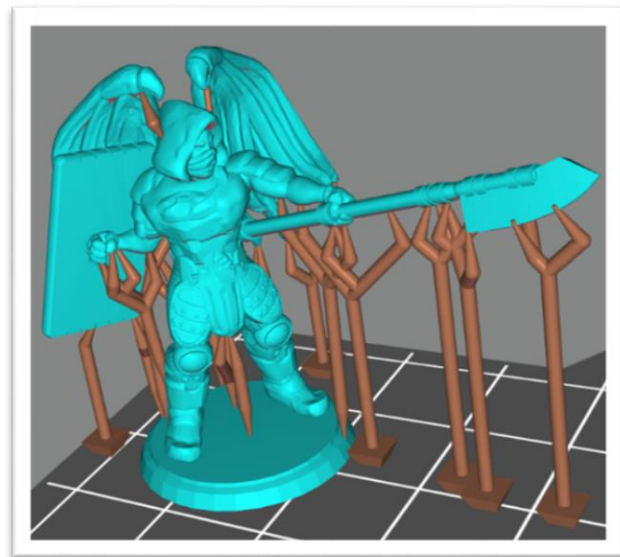
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΚΡΙΤΗΡΙΑ					ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΔΟΣΗ
	Ταχύτητα	Ακρίβεια	Ευελιξία	Κόστος Υλικών	Κόστος Εξοπλισμού	
ΣΕΝΑΡΙΟ Α						
MJ	0,10	0,15	0,04	0,00	0,00	0,29
MSLA	0,15	0,13	0,01	0,29	0,30	0,88
ME	0,15	0,00	0,10	0,30	0,29	0,84
SLS	0,05	0,07	0,00	0,29	0,25	0,65
ΣΕΝΑΡΙΟ Β						
MJ	0,20	0,30	0,04	0,00	0,00	0,54
MSLA	0,30	0,26	0,01	0,14	0,15	0,86
ME	0,30	0,00	0,10	0,15	0,15	0,70
SLS	0,10	0,14	0,00	0,14	0,13	0,50
ΣΕΝΑΡΙΟ Γ						
MJ	0,13	0,20	0,08	0,00	0,00	0,41
MSLA	0,20	0,18	0,01	0,19	0,20	0,78
ME	0,20	0,00	0,20	0,20	0,20	0,80
SLS	0,07	0,09	0,00	0,19	0,17	0,51

5. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

5.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ

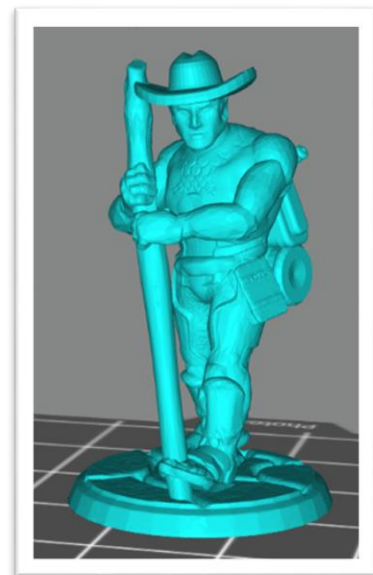
Προκειμένου να ελεγχθούν πρακτικά τα συμπεράσματα της προηγηθείσας ανάλυσης αλλά και να εκτιμηθεί σε μεγαλύτερο βάθος η δυνατότητα χρήσης της τεχνικής MSLA για την παραγωγή φιγούρων μικρού μεγέθους εξετάστηκαν δύο συγκεκριμένες περιπτώσεις μοντέλων, ύψους 38mm.

Η πρώτη φιγούρα “Winged guardian spear out” (Εικ. 19) αναπαριστά έναν μαχητή με ασπίδα, δόρυ και φτερά στην πλάτη του. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε βάσει των ιδιαίτερων πολύπλοκων χαρακτηριστικών αυτής της φιγούρας. Το δόρυ εκτείνεται σχεδόν παράλληλα με το επίπεδο της επιφάνειας εκτύπωσης και η διατομή του είναι πολύ μικρή έχοντας ως αποτέλεσμα την αυξημένη δυσκολία μιας πετυχημένης ολοκλήρωσης της εκτύπωσης. Επιπλέον τα φτερά προεξέχουν αρκετά καθιστώντας έτσι απαραίτητη την χρήση στηριγμάτων, συνεπώς η συγκεκριμένη φιγούρα επιτρέπει την αξιολόγηση της ακρίβειας στην εκτύπωση προεξοχών (Overhangs) αλλά και λεπτομερών χαρακτηριστικών που χρειάζονται στήριξη. Επισημαίνεται ότι τα απαραίτητα στηρίγματα υπολογίζονται αυτόματα μέσω του λογισμικού προγραμματισμού της μηχανής, μπορούν ωστόσο να τροποποιηθούν και χειρωνακτικά από τον χειριστή.



ΕΙΚΟΝΑ 19. "WINGED GUARDIAN SPEAR OUT" BY STOCKTO

Η δεύτερη φιγούρα “Traveller” (Εικ. 20) αναπαριστά έναν ταξιδιώτη με μαστούνη στο χέρι και ένα σακίδιο στην πλάτη. Το μαστούνη έχει παρόμοια διατομή με το δόρυ της πρώτης φιγούρας, αλλά αυτή στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι σχεδόν κάθετο στην επιφάνεια εκτύπωσης με αποτέλεσμα να μην δημιουργεί ιδιαίτερες δυσκολίες στην εκτύπωσή του. Συνολικά εκτιμάται ότι είναι ένα σχετικά εύκολο μοντέλο ακόμα και για χρήστες με μικρή εμπειρία στον προγραμματισμό συστημάτων MSLA και το σχεδιασμό στηριγμάτων.



ΕΙΚΟΝΑ 20. "TRAVELLER" BY STOCKTO

Επιλέγοντας λοιπόν μια απαιτητική, από άποψη χαρακτηριστικών, φιγούρα μεγάλου όγκου και μία απλούστερη φιγούρα μικρού όγκου εκτιμάται ότι θα εκτιμηθούν σε καλό βαθμό τα παρακάτω κατασκευαστικά χαρακτηριστικά:

- Χρόνος,
- Ακρίβεια,
- Κόστος υλικού,

- Κόστος εργασίας και
- Κόστος μηχανής.

Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές είναι ο *Photon Zero* της *Anycubic* (Εικ. 21). Ο συγκεκριμένος εκτυπωτής MSLA θεωρείται σχετικά χαμηλών προδιαγραφών και κόστους (150\$). Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία μπορεί να επιτύχει διαστασιολογική ακρίβεια 0.1155mm στον άξονα X και Y, και ταχύτητα 30mm/h στον άξονα Z. Επειδή τυπώνει παράλληλα μια ολόκληρη στρώση με την χρήση μιας πηγής LED υπεριώδους φωτός και μιας LCD οθόνης, ο χρόνος εκτύπωσης είναι ανάλογος του ύψους των κατασκευών κατά τον άξονα Z. Για να ελεγχθεί και η δυνατότητα παράλληλης εκτύπωσης πολλών φιγούρων, στοιβάχθηκαν στο διαθέσιμο χώρο της μηχανής με 6 φιγούρες (Εικ. 22). Η συγκεκριμένη δυνατότητα είναι αρκετά σημαντική τόσο από άποψη κόστους όσο και ταχύτητας.



ΕΙΚΟΝΑ 21. PHOTON ZERO BY ANYCUBIC

Για τον προγραμματισμό της εκτύπωσης και την επεξεργασία των δομών στήριξης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Photon Workshop*. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν οι προτεινόμενες ρυθμίσεις για την συγκεκριμένη ρητίνη (*Anycubic grey*) και ύψος στρώσης 0,05mm. Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης οι φιγούρες απομακρύνθηκαν προσεκτικά από την επιφάνεια εκτύπωσης με μία σπάτουλα (Εικ. 23) και στη συνέχεια αφαιρέθηκαν από αυτές τα στηρίγματα με την βοήθεια μίας τσιμπίδας.



ΕΙΚΟΝΑ 22. ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΑΡΤΙΔΑ MSLA ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Τα 6 μοντέλα καθαρίστηκαν από τα κατάλοιπα της ρητίνης μέσω εμβάπτισης σε ένα δοχείο με ισοπροπυλική αλκοόλη (Isopropyl Alcohol – IPA), την οποία κολούθησε πλύση με νερό για να αφαιρεθούν τα κατάλοιπα της ισοπροπυλικής αλκοόλης. Στη συνέχεια τα μοντέλα τοποθετήθηκαν στον θάλαμο ωρίμανσης (curing) στο οποίο εκτέθηκαν σε υπεριώδη ακτινοβολία μήκους κύματος 405nm έτσι ώστε να πολυμεριστεί πλήρως η ρητίνη και να αυξηθεί η αντοχή τους. Στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας αφαιρέθηκαν τα υπολείμματα των στηριγμάτων και διορθώθηκαν μικρο-ατέλειες με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού πολυεργαλείου χειρός (Dremel) (Εικ. 24). Σε αυτό τα στάδια οι φιγούρες ήταν πλέον έτοιμες για χρήση ή για βαφή/χρωματισμό σε περίπτωση που αυτό απαιτείται.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Κατασκευαστικός Χρόνος

Για την κατασκευή των μοντέλων απαιτήθηκαν συνολικά 358 λεπτά, από την αρχή της διαδικασίας μέχρι την ολοκλήρωσή της, εκ των οποίων τα 39' απαιτούσαν την απασχόληση ενός ατόμου. Αναλυτικά ο χρόνος ανά στάδιο της διαδικασίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑ ΣΤΑΔΙΟ

A/A	ΣΤΑΔΙΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	ΛΕΠΤΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ
1	Τοποθέτηση στο bed και ρύθμιση του slicer	17	NAI
2	Προετοιμασία εκτυπωτή	4	NAI
3	Εκτύπωση	299	ΌΧΙ
4	Αφαίρεση από το bed	5	NAI
5	Αφαίρεση support	5	NAI
6	Ξέπλυμα σε IPA και νερό	4	NAI
7	Curing	20	ΌΧΙ
8	Διορθώσεις με Dremel	4	NAI
9	Βαφή (Προαιρετικό)	720	NAI

Εκτιμάται ότι σε περίπτωση μαζικής παραγωγής και επαναλαμβανόμενων παρτίδων εκτυπώσεων ο χρόνος ανά παρτίδα μπορεί να μειωθεί. Για παράδειγμα ο χρόνος που σχετίζεται με τον προγραμματισμό (τοποθέτηση στον χώρο της μηχανής και επιλογή παραμέτρων) απαιτείται στην πρώτη εκτύπωση μιας παρτίδας μοντέλων, και εφόσον οι ρυθμίσεις είναι κατάλληλες η εργασία αυτή δεν χρειάζεται να εκτελεστεί σε επόμενες επαναλήψεις. Ένα ακόμα στάδιο που μπορεί να επιταχυνθεί είναι αυτό της μετεπεξεργασίας που περιλαμβάνει εργασίες (καθαρισμός, ωρίμανση, αφαίρεση στηριγμάτων, βαφή) οι οποίες σε διαδικασίες μαζικής μπορούν να υλοποιηθούν πιο αποτελεσματικά.

Ακρίβεια

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει στις Εικόνες 23 και 24 οι ατέλειες είναι ελάχιστες και σχετικά μικρές σε μέγεθος. Οι επιμέρους στρώσεις, ύψους 0.05mm, διακρίνονται ελάχιστα και κυρίως σε αιχμηρές κορυφές των μοντέλων κατά μήκους του άξονα Z, όπως στο μαστούδι της

φιγούρας ‘Traveler’. Οι περισσότερες ατέλειες που αφορούν σε υπολείμματα των στηριγμάτων μπορούν να διορθωθούν πλήρως χειρωνακτικά, με τη βοήθεια ηλεκτρικών και μη εργαλείων. Αν η φιγούρα έχει κάποια ατέλεια που δεν διορθώνεται με λείανση ή αφαίρεση υλικού, τότε μπορεί να εφαρμοστεί το κατάλληλο επίχρισμα.



ΕΙΚΟΝΑ 23. ΦΙΓΟΥΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΑΠΟ ΤΟ BED



ΕΙΚΟΝΑ 24. ΦΙΓΟΥΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΩΝ SUPPORT

Το τελικό αισθητικό αποτέλεσμα βελτιώνεται, επίσης, σημαντικά, αν οι φιγούρες βαφθούν καθώς η βαφή καλύπτει το φαινόμενο κλίμακας (stairstepping) καθώς και άλλες εναπομείνουσες μικρο-ατέλειες (Εικ.25).

Κόστος Υλικού

Ο όγκος κάθε μοντέλου χωρίς στηρίγματα καθώς και με στηρίγματα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΟΓΚΟΣ ΦΙΓΟΥΡΩΝ

Winged Guardian	Με στηρίγματα	3,615ml
Winged Guardian	Χωρίς στηρίγματα	3,102ml
Traveler	Χωρίς στηρίγματα	3,031ml

Συνολικά, για μια την παρτίδα 6 μοντέλων της Εικόνας 22 χρησιμοποιήθηκαν 19,938ml ρητίνης. Το αντίστοιχο συνολικό κόστος υλικών ανέρχεται σε 0,997€ ή περίπου στα 0.166€ ανά φιγούρα.

Κόστος Εργασίας

Για να παραχθούν οι έξι φιγούρες απασχολήθηκε ένα άτομο για 39' λεπτά συνολικά. Με το μέσο κόστος εργασίας να κυμαίνεται στα 8€/h το κόστος εργασίας ανά φιγούρα εκτιμάται στα 0.86€ για την εργασία που απαιτήσε. Συνυπολογίζοντας το κόστος βαφής, η οποία απαιτήσε 720' λεπτά εργασίας, το συνολικό κόστος εργασίας, για μία χρωματισμένη πλέον φιγούρα, αυξάνεται στα 16.86€.



ΕΙΚΟΝΑ 25. ΒΑΜΜΕΝΕΣ ΦΙΓΟΥΡΕΣ

Κόστος Χρήσης Εξοπλισμού

Όσον αφορά το λειτουργικό κόστος της μηχανής εκτιμάται ότι κυμαίνεται στα 2.5€ ανά ώρα λειτουργίας (Franchetti M., Kress C., 2017). Με βάση το παραπάνω ωριαίο κόστος και τον μετρηθέντα χρόνο λειτουργίας υπολογίζεται ότι το συνολικό κόστος χρήσης του εξοπλισμού για την παραγωγή της συγκεκριμένης παρτίδας ανέρχεται στα 12.5€ ή στα 2.08€ ανά φιγούρα.

Σύγκριση με εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα

Η τιμή του επιτραπέζιου Dungeons & Dragons της Hasbro, που περιέχει 40 φιγούρες, 10 ζάρια καθώς και άλλα παρελκόμενα, κυμαίνεται στα 40€. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και αν υποθέσουμε ότι παράγουμε όλες τις φιγούρες με την μέθοδο MSLA το συνολικό κόστος παραγωγής ενός σετ εκτιμάται ότι ανέρχεται σε **124.24€**. Όπως είναι προφανές το κόστος με τη χρήση ενός συστήματος παραγωγής με τη μέθοδο MSLA ξεπερνά κατά πολύ το κόστος παραγωγής με χύτευση μέσω έγχυσης ακριβείας (εκτιμάται ότι μπορεί να είναι και δεκαπλάσιο αυτού, αν συνυπολογιστεί το κέρδος και τα άλλα στοιχεία κόστους που ενσωματώνονται στην τιμή ενός εμπορικά διαθέσιμου σετ του παιχνιδιού) εξανεμίζοντας το περιθώριο κέρδους, εάν θεωρήσουμε την τιμή σταθερή. Αντίθετα, στην περίπτωση παραγωγής μεμονωμένων προσαρμοσμένων ή συλλεκτικών φιγούρων, των οποίων οι τιμές είναι πολύ πιο υψηλές λόγω του μικρού όγκου παραγωγής, εκτιμάται ότι είναι δυνατό να υπάρχει περιθώριο κέρδους συμπεριλαμβανομένου ακόμα και του κόστους βαφής.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι η εκτύπωση φιγούρων με έναν σύστημα MSLA είναι εφικτή τόσο από άποψη ποιότητας όσο και κόστους, υπό την προϋπόθεση ότι ο συνολικός όγκος παραγωγής ανά φιγούρα είναι σχετικά μικρός. Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος MSLA υπερέρχει της χύτευσης με έγχυση ακριβείας και από άποψη ταχύτητας, παρότι ο χρόνος παραγωγής ανά φιγούρα είναι συγκριτικά μεγαλύτερος, καθώς στην χύτευση με έγχυση ακριβείας απαιτείται σημαντικός χρόνος για την παραγωγή των καλουπιών. Αντίθετα στην περίπτωση μαζικής παραγωγής (περισσότερα από μερικές εκατοντάδες κομμάτια, κατά περίπτωση) η χύτευση με έγχυση ακριβείας υπερέρχει από άποψη ταχύτητας και κόστους.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας έρχονται στο προσκήνιο, όλο και πιο συχνά, νέες τεχνικές παραγωγής. Στην τρέχουσα περίοδο, ώριμες και εγκαθιδρυμένες τεχνικές όπως η χύτευση με έγχυση ακριβείας κυριαρχούν στον χώρο της παραγωγής πλαστικών, ενώ παράλληλα βελτιώνονται και τελειοποιούνται συνεχώς, από πλευράς ταχύτητας και κόστους. Στον τομέα των πλαστικών μοντέλων μικρής κλίμακας για επιτραπέζια παιχνίδια η μέθοδος της χύτευσης με έγχυση ακριβείας είναι η πιο ώριμη και διαδεδομένη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης η χρήση, της κατά πολύ νεότερης τεχνολογίας, της Στερεολιθογραφίας με χρήση μάσκας για την παραγωγή αντίστοιχων μοντέλων είναι μεν τεχνικά εφικτή, αλλά είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα μόνο σε μικρότερες ποσότητες παραγωγής. Από αυτή την άποψη αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για την παραγωγή φιγούρων και πλαστικών μοντέλων τα οποία είναι συλλεκτικού χαρακτήρα ή είναι προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις του πελάτη.

Κάποια σχετικά θέματα που θα μπορούσαν να εξεταστούν περαιτέρω αφορούν στον ακριβέστερο προσδιορισμό του κόστους υλικών λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα επίτευξης εκπτώσεων λόγω μεγάλης ποσότητας παραγγελίας, και στον ακριβέστερο προσδιορισμό του κόστους συντήρησης/λειτουργίας του εξοπλισμού καθώς και του κόστους εγκαταστάσεων. Η μελέτη θα μπορούσε επίσης να εστιάσει στην χρήση εξοπλισμού υψηλότερων δυνατοτήτων καθώς και υποστηρικτικού εξοπλισμού, όπως συστημάτων αυτόματου καθαρισμού και ωρίμανσης (wash & cure), ο οποίος εκτιμάται ότι μπορεί να επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία MSLA και να μειώσει το κόστος εργασίας. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση μεταξύ των δύο τεχνολογιών από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας και περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 3d-prints (2019) 'The Complete Guide To Material Jetting (PolyJet) in 3D printing'. *3d-prints.com*
- Adam Savage's Tested (2014) 'How to make resin copies of 3D-Printed Figures'. https://www.youtube.com/watch?v=J1jDaZX6PCk&ab_channel=AdamSavage%E2%80%99sTested
- All3DP (2020) 'The Types of 3D Printing Technology'. *All3dp.com*
- Attia P. (2016) 'The full history of board games'. *Medium*
- Bigalow R. (1984) 'Through the looking glass'. *Dragon 205*
- Bournias Varotsis A. (2021) 'Introduction to FDM 3D printing'. <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>.
- Gibson I., Rosen D., Stucker B. (2017) *Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, Τριδιάστατη εκτύπωση, ταχεία προτυποποίηση και άμεση ψηφιακή κατασκευή*. 2^η εκδ. Μετάφραση-Επιμέλεια: Βασιλίας Δεδούσης, Γιάννης Γιαννατσής, Κριτική
- Bridget A. (2020) 'The ancient history of board games'. *Discover*
- Green W. (2008) 'Big game hunter'. *Time*
- Browne C. (2018) 'Modern Techniques for Ancient Games, Department of Data Science and Knowledge Engineering (DKE)'.
- ConairGroup (2015) 'Plastic Processing Overview'. https://www.youtube.com/watch?v=qnl6JtE_vLc&ab_channel=engineerguy
- Dr. Minshall T. (2016) 'How 3D printing is enabling the '4th Industrial Revolution''. *TEDx Talks*
- Fortune Business Insights (2020) '3D Printing Market Worth \$51.77 Billion at 25.8% CAGR; Growing Demand for Prototyping Technology from Defense Industry to Widen Sales Horizons'. *Intrado Globenewswire*
- Franchetti M., Kress C., (2017) 'An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques'.
- Gonzalez C. (2020) 'Infographic: The history of 3D printing'. *The American society of mechanical engineers*
- Grand View Research (2021) '3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component, By Printer Type (Desktop, Industrial), By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Material, By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028'. *Market Research*
- Losek J. (2021) 'Injection Molding Price'. *Icomold by Fathom*
- Groover M. (2010) *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes, and Systems* 4^η εκδ. John Wiley & Sons, Inc.
- Rex Plastics (2013) 'How much does plastic injection molding cost?'. *Rexplastics*

- Zoey N. (2018) ‘25 Of The Rarest Dungeons And Dragons Miniatures (And What They’re Worth)’. *The gamer*
- Open.edu (2017) ‘Gravity die casting’.
- Μπιλάλης Ν., Μαραβελάκης Ε. (2014) *Συστήματα CAD/CAM & Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση 2^η έκδοση*, Κριτική