



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

Τρισδιάστατη Εκτύπωση Μάσκας Προσώπου και Λειτουργικός Έλεγχος

ΞΥΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
Αριθμός Μητρώου: 16073

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Γκλώτσος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα 30/06/2021

Διπλωματική Εργασία

Τρισδιάστατη Εκτύπωση Μάσκας Προσώπου και Λειτουργικός Έλεγχος

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

**Δ.Γκλώτσος
Αναπληρωτής
Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανικών
Βιοϊατρικής**

**Π.Ασβεστάς
Αναπληρωτής
Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανικών
Βιοϊατρικής**

**Σ.Κωστόπουλος
Αναπληρωτής
Καθηγητής,
Τμήμα Μηχανικών
Βιοϊατρικής**

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Ξυλάς Ευάγγελος** του **Εμμανουήλ**, με αριθμό μητρώου **16073** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος **Μηχανικών Βιοϊατρικής**, 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

Ξυλάς Ευάγγελος



Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η τρισδιάστατη εκτύπωση μίας προστατευτικής μάσκας προσώπου με υποδοχή για φίλτρο, ο ενδεικτικός έλεγχος αποδοτικότητας συγκεκριμένων ειδών φίλτρων και ο έλεγχος διαρροών της μάσκας. Αρχικά, αναλύεται ο όρος της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η προέλευση αυτής της τεχνολογίας και η μετέπειτα εξέλιξή της.

Περιγράφεται η τεχνολογία πίσω από την επιλεγμένη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης (FDM) αλλά και οι πέντε επικρατέστερες εναλλακτικές τεχνολογίες (SLA, SLS, LOM, Inkjet, SGC). Συνδέεται το 3D Printing με τον τομέα της Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, και η ανταπόκρισή του στην περίοδο της πανδημίας του COVID-19.

Αναφέρονται τα υλικά, ο εξοπλισμός και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, και περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού της μάσκας προσώπου για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου, η μετέπειτα απαιτούμενη προετοιμασία και η εκτύπωση της μάσκας προσώπου. Αποτελείται από δύο τμήματα: το σώμα της μάσκας και το κάλυμμα φίλτρου που τη συνοδεύει, ενώ το εισαγόμενο φίλτρο εξαρτάται από την κρίση του χρήστη.

Διεξάγονται δύο είδη ελέγχων: Ο έλεγχος αποδοτικότητας φίλτρων και ο έλεγχος διαρροών. Κατά τον έλεγχο αποδοτικότητας φίλτρων, με τη χρήση σκόνης toner ελέγχονται ως προς την αποδοτικότητά τους πέντε είδη φίλτρων διαφορετικών υλικών. Εξάγονται εικόνες οπτικού μικροσκοπίου, οι οποίες δέχονται ψηφιακή ανάλυση και επεξεργασία. Τα αποτελέσματα αφορούν ποσοστό συγκράτησης αιωρούμενων σωματιδίων μεγέθους 4μm έως 30μm. Αυτό, καθιστά τον έλεγχο ως έναν έλεγχο PFE μικρής κλίμακας, αφού οι συνθήκες ελέγχου διαφέρουν από τους διεθνώς καθορισμένους. Κατά τον δεύτερο έλεγχο, αυτό των διαρροών, παρατηρήθηκαν οπτικά εικόνες από θερμική κάμερα, από τρεις διαφορετικές φάσεις: κατά την αναπνοή, την ομιλία, και την εμφύσηση εντός της μάσκας προσώπου σε συνδυασμό με τα πέντε διαφορετικά είδη φίλτρων. Από την παρατήρηση, δεν σημειώθηκε κάποια διαρροή θερμοκρασίας από το σώμα της μάσκας, επιβεβαιώνοντας την στεγανότητά της, ίσως το σημαντικότερο παράγοντα που πρέπει κανείς να λάβει υπόψη κατά τη δημιουργία μιας μάσκας προστασίας. Παράλληλα, συγκρίθηκαν με τιμές από παρόμοιες έρευνες, οι θερμοκρασίες που εμφάνιζαν δύο φίλτρα μεγαλύτερης ικανότητας φιλτραρίσματος κατά τις τρεις προαναφερθείσες φάσεις. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, με τις θερμοκρασίες να κυμαίνονται στο ίδιο εύρος.

Οι δύο παραπάνω έλεγχοι αποτελούν κυρίως επαληθεύσεις, καθώς δεν διεξήχθησαν υπό τις προβλεπόμενες συνθήκες για την εξαγωγή ενός πορίσματος. Ωστόσο συνέβαλαν στην κατανόηση της λειτουργίας των προστατευτικών φίλτρων σε συνδυασμό με μία προστατευτική μάσκα προσώπου.

Λέξεις Κλειδιά:

Πτυχιακή εργασία, Τρισδιάστατη Εκτύπωση, Προστατευτική Μάσκα Προσώπου, Έλεγχος αποδοτικότητας φίλτρων, Οπτικό μικροσκόπιο, Έλεγχος διαρροών μάσκας προσώπου, Θερμική κάμερα

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the 3D printing of a protective face mask with a filter holder, the indicative efficiency check of specific types of filters, and a leakage control. At first, the term 3D printing, the origin of this technology as well as its subsequent evolution are analyzed.

The technology behind the selected printing method (FDM) and the five most common alternatives (SLA, SLS, LOM, Inkjet, SGC) are described. 3D printing is then linked to the field of Biomedical Engineering and its attempt to help fight to the COVID-19 pandemic.

The materials, equipment and software used are listed, while the digital design process of the face mask, the required preparation and the printing of the face mask are described in detail. The complete face mask model is composed of two reusable 3D-printed parts, the face mask body and a filter support cap. The imported filter type depends on the user's judgment.

Two types of tests are performed: a filter efficiency test and an air leakage test. When testing filter efficiencies, five types of filters of different materials are tested for effectiveness using toner powder. Optical microscope images are exported, which are then digitally analyzed and processed. The results concern the retention rate of suspended particles of size 4 μm to 30 μm . This makes the test a small-scale PFE test, as its conditions differ from those internationally defined. During the second leak test, images from a thermal camera were observed, during three different phases: breathing, speech, and blowing into the face mask in combination with the five different types of filters. From the observation, there was no temperature leakage from the body of the mask, confirming its tightness, which is maybe the most important factor to consider when creating a protection mask. At the same time, the temperatures collected by the two filters with the greatest filtration of the five, were compared with values from similar journals, during the three aforementioned phases. The results are satisfactory, with temperatures being in the same range under similar conditions.

The above two tests mainly consist validations, as they were not performed under the conditions required for the extraction of a finding. However, they contributed to the understanding of the function of protective filters, in combination with a protective face mask.

Keywords:

Thesis, 3D-Printing, Protective face mask, Filter efficiency test, Optical microscope, Face mask leak test, Thermal camera

Ευχαριστίες:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Δημήτριο Γκλώτσο, καθηγητή του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης και για την ανάθεση του θέματος το οποίο βρήκα πολύ ενδιαφέρον, τις συμβουλές του και τη δυνατότητα που μου παρείχε να χρησιμοποιήσω τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
Λέξεις Κλειδιά:	4
ABSTRACT	5
Keywords:	5
Ευχαριστίες:	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1. 3D Printing	9
1.1 Η τεχνολογία πίσω από την 3D εκτύπωση	10
1.2 Χρησιμότητα του 3D Printing στην Βιοϊατρική Τεχνολογία	20
1.3 Χρήση της μάσκας προσώπου σε περίοδο πανδημίας	22
1.4 Συνδυασμός τεχνολογιών για την 3D εκτύπωση μάσκας	25
1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	28
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ	29
2.1 Υλικά	29
2.1.1 Εξοπλισμός	29
2.1.3 Λογισμικό	39
2.2 Μέθοδος	39
2.2.1 Σχεδιασμός Μάσκας Προσώπου	39
2.2.2 Προετοιμασία Εκτύπωσης	45
2.2.3 Εκτύπωση	50
2.3 Πειραματικός Έλεγχος	60
2.3.1 Έλεγχος Αποδοτικότητας Φίλτρων	60
2.3.2 Έλεγχος Διαρροών	69
2.3.3 Αποτελέσματα	71
3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	73
3.1 Συμπεράσματα Εκτύπωσης Μάσκας Προσώπου	73
3.2 Συμπεράσματα Ελέγχου Αποδοτικότητας Φίλτρων	73
3.3 Συμπεράσματα Ελέγχου Διαρροών	74
Συμπεράσματα	77
Αναφορές - Πηγές	80

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη δημιουργία μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης μιας προστατευτικής μάσκας προσώπου. Παράλληλα, διεξάγονται δυο πειραματικοί έλεγχοι, πρώτον αποδοτικότητας φίλτρων και των διαρροών. Γίνεται μια εισαγωγή στην τεχνολογία πίσω από την τρισδιάστατη εκτύπωση, και μια συσχέτιση της τεχνολογίας αυτής με την πανδημία του ιού COVID-19. Περιγράφονται οι μέθοδοι, τα υλικά και οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διεξαγωγή της εργασίας, αναλύονται τα αποτελέσματα των ελέγχων και τέλος εξάγονται τα συμπεράσματα από την όλη διαδικασία.

1. 3D Printing

Η τεχνολογία της προσθετικής διαδικασίας παραγωγής (AM – Additive Manufacturing) αποτελεί μία μέθοδο δημιουργίας τρισδιάστατων αντικειμένων. Κοινώς αναφέρεται ως 3D Printing και ως βασική αρχή φέρει τη διαδικασία διαδοχικών συγκολλήσεων υλικού, βάσει ενός ψηφιακού μοντέλου, με σκοπό την τελική εξαγωγή του ως φυσικό αντικείμενο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση ορίζεται ως η δημιουργία ενός δισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου στον υλικό κόσμο με τρεις διαστάσεις. Εφευρέθηκε το 1984 από τον Αμερικανό μηχανικό Chuck Hull, με τη μορφή της στερεολιθογραφίας όταν επιχείρησε να ενισχύσει σκληραίνοντας υγρά φωτο-ευαίσθητα πολυμερή με φως από λέιζερ, ανά μια στρώση υλικού κάθε φορά. Η τεχνική αυτή, αποσκοπούσε στην κάλυψη λεπτομερειών όπως και στην ταχύτερη κατασκευή αντικειμένων, ενώ κατοχυρώθηκε το 1986. Ο Chuck Hull έπειτα συνίδρυσε την εταιρεία “3D Systems Corporation” με έδρα την Valencia, κομμόπολη της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ. Από το 1988 υπήρξε μια από τις εταιρείες που κατασκεύασαν τις πρώτες μηχανές στερεολιθογραφίας.

Ομοίως, το 1988 ο Scott Crump, επίσης Αμερικανός μηχανικός, εφηύρε τη Μοντελοποίηση Συντηγμένων Αποθέσεων (FDM), ιδρύοντας με τη σύζυγό του Lisa Crump την εταιρεία “Stratasys” το 1989. Ο Crump εισήγαγε πρωτοποριακά το πλαστικό νήμα από στυρόλιο βουταδιενίου ακρυλονιτρίλιου (ABS) στους 3D εκτυπωτές, γεγονός που επέτρεψε στους μηχανικούς τη διαμόρφωση πλήρως λειτουργικών ανταλλακτικών και εργαλείων με έως και 70% της αντοχής ενός συμβατικά χυτού εξαρτήματος. Επιπλέον, ο Crump είναι υπεύθυνος και για άλλες καινοτομίες όπως το “Breakaway Support System” (BASS), το “WaterWorks Support System” αλλά και τον πρώτο 3D εκτυπωτή βιομηχανικής χρήσης με ονομασία “Dimension”[1].

Αρχικά οι εφαρμογές ήταν περιορισμένες στη δημιουργία πρωτοτύπων, με σκοπό τη γρήγορη και οικονομικότερη ανάπτυξη του προϊόντος. Μέσω του 3D Printing ή αλλιώς Ταχεία Προτυποποίηση (Rapid Prototyping), μηχανικοί και σχεδιαστές σχεδιάζουν και παράγουν αντικείμενα με σκοπό την μελέτη και βελτίωση του τρισδιάστατου αντικειμένου, στον τομέα όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Εντοπίζονται ατέλειες, αδυναμίες και δομικά σφάλματα τα οποία δεν πρέπει να περάσουν σε μια μαζικότερη παραγωγή του τελικού προϊόντος. Από το 2000 και μετά, οι 3D Εκτυπωτές έγιναν περισσότερο προσιτοί στο κοινό, καθώς συνεχώς γίνονταν καλύτεροι- και φθηνότεροι (Εικόνα 1.1). Το 2005 ιδρύθηκε από τον Adrian Bower το πρόγραμμα RepRap με συμμετέχοντες ενδιαφερόμενους από όλο τον κόσμο, με τελικό σκοπό τη δημιουργία ενός 3D εκτυπωτή με την ικανότητα να εκτυπώσει τμήματα και εξαρτήματα του ίδιου εκτυπωτή. Με αυτόν τον τρόπο, σύμφωνα με το όραμα του project, θα μπορούσε κανείς να εκτυπώσει γρήγορα και οικονομικά έναν 3D εκτυπωτή καθιστώντας τον εξαιρετικά προσιτό σε όλο τον κόσμο. Ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα της εποχής, ωστόσο, είναι η ποιότητα των υλικών. Τα διαθέσιμα υλικά δεν παρέχουν ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες για τη δημιουργία αντικειμένων πέρα των πρωτοτύπων.



Εικόνα 1.1: Δύο Σύγχρονοι 3D Εκτυπωτές. (Πηγές www.flashforge.com, www.prusa3d.com)

Στις μέρες μας, τα διαθέσιμα υλικά για την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να παρέχουν ξεχωριστές ιδιότητες στα εκτυπωμένα αντικείμενα, όπως τη σύστασή τους από κινητά μέρη, ή μεγάλες τιμές σκληρότητας ή ελαστικότητας. Η χρήση ανθεκτικών υλικών όπως το μέταλλο και το πλαστικό και ο συνδυασμός διαφορετικών μειγμάτων πλαστικού και ενισχυμένων μετάλλων έχει οδηγήσει στη δημιουργία νέων, ριζοσπαστικών υλικών με ιδιότητες όμοιες με δυνατότερα υλικά, όπως το ατσάλι. [2]

1.1 Η τεχνολογία πίσω από την 3D εκτύπωση

Η επιστήμη της τρισδιάστατης εκτύπωσης βρίσκεται σε μία συνεχώς εξελισσόμενη πορεία, πάντα βασισμένη σε τρεις βασικούς τομείς:

- 1) Τον τομέα του σχεδιασμού, ο οποίος περιλαμβάνει τη χρήση λογισμικών τρισδιάστατου σχεδιασμού, γνωστά ως προγράμματα CAD (Computer Aided

- Design), επιτρέποντας στο χρήστη να διαμορφώσει αντικείμενων με τρεις διαστάσεις
- 2) Τη διαδικασία της εκτύπωσης. Σε αυτό το στάδιο ο χρήστης αποστέλλει τις εντολές στον εκτυπωτή, κι εκείνος με τη σειρά του χρησιμοποιεί το επιλεγμένο υλικό για να δημιουργήσει το επιθυμητό αντικείμενο με τη μορφή και της προβλεπόμενες ιδιότητες του ψηφιακού μοντέλου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χρειαστεί λίγα λεπτά έως και μερικές ημέρες, ανάλογα τις διαστάσεις του αντικείμενου.
 - 3) Το τελικό στάδιο, κατά το οποίο ο κατασκευαστής τελειοποιεί το προϊόν ή εντοπίζει και επιδιορθώνει ατέλειες στην επιφάνεια των αντικειμένων.

Στις τεχνολογίες προτυποποίησης κατηγοριοποιούνται έξι βασικότερες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης:

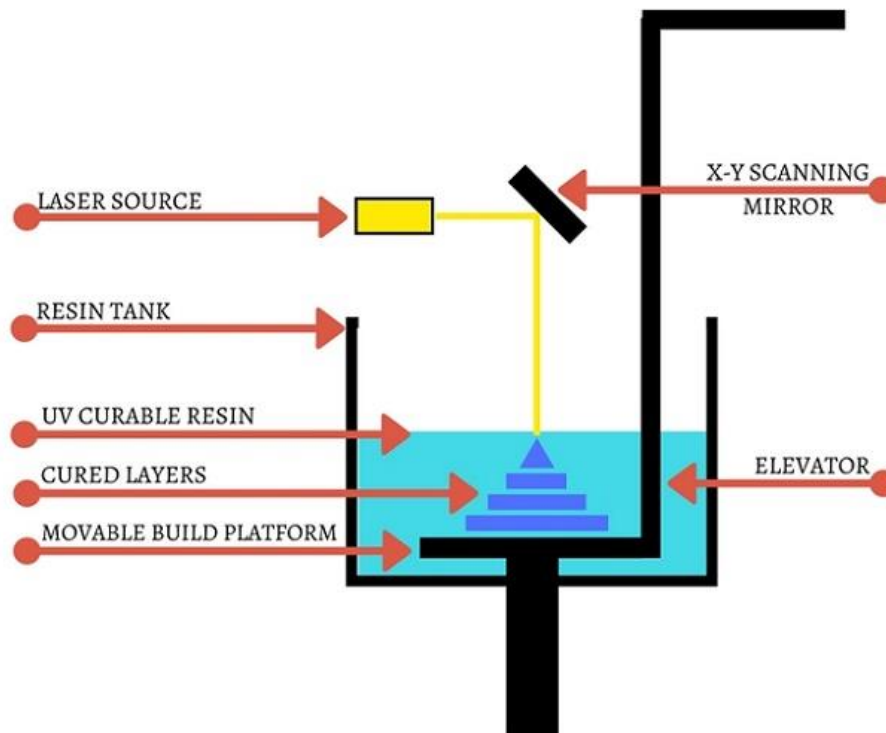
- 1) Στερεολιθογραφία (SLA)
- 2) Εναπόθεση Διαδοχικών Στρώσεων (FDM για εργοστασιακή χρήση, FFF για οικιακή)
- 3) Επιλεκτική Σύντηξη με Laser (SLS)
- 4) Κατασκευή Πλαστικοποιημένων Αντικειμένων (LOM)
- 5) Τρισδιάστατη Εκτύπωση Inkjet
- 6) Παραλλαγή Στερεολιθογραφίας (SGC)

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στους επιτραπέζιους εκτυπωτές ευρείας χρήσης είναι δύο: η τεχνολογία FDM και αυτή της στερεολιθογραφίας (SLA). Και οι δύο τεχνικές προϋποθέτουν την εναπόθεση υλικού σε στρώσεις για να σχηματιστεί το αντικείμενο.

Η μέθοδος της στερεολιθογραφίας (SLA) βασίζεται στην ιδιότητα των υγρών πολυμερών να στερεοποιούνται κατά την έκθεσή τους σε υπεριώδη ακτινοβολία.

Έτσι, μια τράπεζα με γυάλινο πυθμένα εισάγεται σταδιακά σε χώρο υγρής ρητίνης (Εικόνα 1.1.1). Έπειτα, υπεριώδη κύματα χαμηλής ισχύος εκπέμπονται από μια πηγή λέιζερ, η οποία κινείται στους άξονες, σχεδιάζοντας το προβλεπόμενο αντικείμενο. Κάθε σημείο στο οποίο έχει ακτινοβολήσει το λέιζερ στερεοποιείται επιλεκτικά, και με αυτό τον τρόπο έχει εκτυπωθεί η πρώτη στρώση. Μετά από αυτό το στάδιο, η τράπεζα υποχωρεί περισσότερο, και διεξάγεται η ίδια ακολουθία για τα επόμενα στρώματα. Όταν έχει σχεδιαστεί το μοντέλο, αφαιρείται από την υγρή ρητίνη, καθαρίζεται και αποκόπτονται περιττά τμήματα που ίσως έχουν παρασυρθεί. Για το τέλος της διαδικασίας, το αντικείμενο θερμαίνεται υπό ακτίνες υπεριώδους ακτινοβολίας όπου και στερεοποιείται. Τα πρώτα εκτυπωμένα μοντέλα με τη συγκεκριμένη μέθοδο διέθεταν ελάχιστη λεπτομέρεια και ελαστικότητα, κάτι που τα καθιστούσε πολύ εύθραυστα. Η συνεχής βελτίωση και ανανέωση της τεχνολογίας της στερεολιθογραφίας έχει φτάσει σε σημείο να δημιουργεί αντικείμενα με μεγάλη λεπτομέρεια, ελαστικότητα και αντοχή.

Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυνατότητα εκτύπωσης τμημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία με πολύ υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας, καθιστώντας το SLA ιδανικό για αντικείμενα μικρής κλίμακας. Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών υλικών με διαφορετικές, επιλεγμένες ιδιότητες.



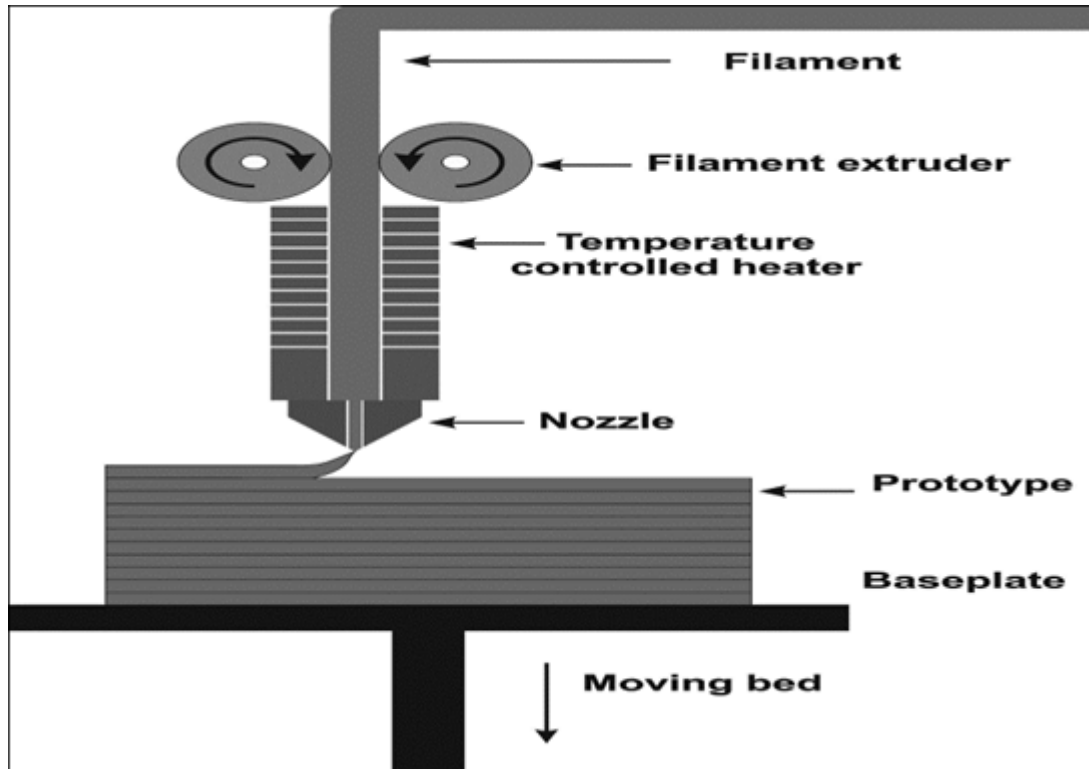
Εικόνα 1.1: Ενδεικτικό διάγραμμα εκτυπωτή τεχνολογίας SLA (Πηγή: www.manufactur3dmag.com)

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής, συμπεριλαμβάνονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τα οποία είναι επικίνδυνα για χρήση χωρίς προστατευτικό εξοπλισμό, είναι εύφλεκτα και κολλώδη και υπάρχει πιθανότητα μόλυνσης στο χώρο εργασίας εάν δεν αποθηκευτούν καταλλήλως. Δεν υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού υλικών ή χρωμάτων σε μία ενιαία εκτύπωση, ενώ σχεδόν πάντα είναι απαραίτητη η εκτύπωση στηριγμάτων, που ενδεχομένως εναποθέσουν υπολειπόμενες προεξοχές στο σώμα του εκτυπωμένου αντικειμένου. Ένας περιορισμός είναι ότι τα μέρη προς εκτύπωση πρέπει να είναι σχεδιασμένα με οπές έτσι ώστε η ρητίνη που δεν προορίζεται να σκληρυνθεί να μπορεί να διαφύγει από δομές κλειστού χώρου. Τέλος, αντικείμενου εκτύπωσης των εκτυπωτών SLA για είναι μικρότερος από αυτόν άλλων τεχνολογιών. Όσο για την μετέπειτα επεξεργασία, είναι μια σύνθετη διαδικασία σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, καθώς τα τμήματα πρέπει να περιλούζονται με δραστικές χημικές ουσίες όπως η ισοπροπυλική αλκοόλη. Λόγω της χρήσης σκληρών χημικών ουσιών, απαραίτητος είναι ο περιορισμός σε χώρους όπου ο αέρας ανανεώνεται συνεχώς.

Συνοπτικά, η μέθοδος SLA αποτελεί κατάλληλη τεχνική για αντικείμενα που έχουν περίπλοκες γεωμετρικά, λεπτομερείς δομές που, αλλά τα εκτυπωμένα αντικείμενα απαιτούν στηρίγματα στις περισσότερες κατασκευές.

Στην μέθοδο FDM ή FFF η πρώτη ύλη εκτύπωσης έχει μορφή νήματος. Διέρχεται μέσα από έναν προωθητή, με συγκεκριμένη ταχύτητα, έτσι ώστε ο όγκος του υλικού να είναι υπολογισμένος. Έπειτα, το νήμα διέρχεται από έναν χώρο που του προσδίδει την απαραίτητη θερμοκρασία για την τήξη του, από όπου και θα εξαχθεί από το ακροφύσιο εκτύπωσης (Εικόνα 1.1.2). Μόλις ολοκληρωθεί η πρώτη στρώση, η

τράπεζα στην οποία είναι τοποθετημένη υποχωρεί, έτσι ώστε στο εκτυπωμένο στρώμα να εναποτεθεί ένα ακόμα. Σε περιπτώσεις που το εκτυπωμένο τμήμα απαιτεί επιπλέον στηρίγματα, ένα δεύτερο ακροφύσιο εξαγωγής υλικού εναποθέτει το απαραίτητο υλικό για την παραγωγή τους. Τα στηρίγματα αυτά δεν αποτελούν τμήμα του μοντέλου, έχουν μόνο βοηθητικό ρόλο κυρίως για τη σταθεροποίηση του υλικού. Στο τέλος της εκτύπωσης το αντικείμενο διαχωρίζεται από τα στηρίγματα είτε με το χέρι από τον χειριστή, είτε με τη ρίψη πεποισμένης ροής νερού ώστε να αφαιρεθεί το επιπλέον υλικό.



Εικόνα 1.1.2: Διάγραμμα εκτυπωτή τεχνολογίας FDM (Πηγή: Olivera, Sharon & Muralidhara, H.B. & Venkatesh, K. & Gopalakrishna, Keshavanarayana. (2016))

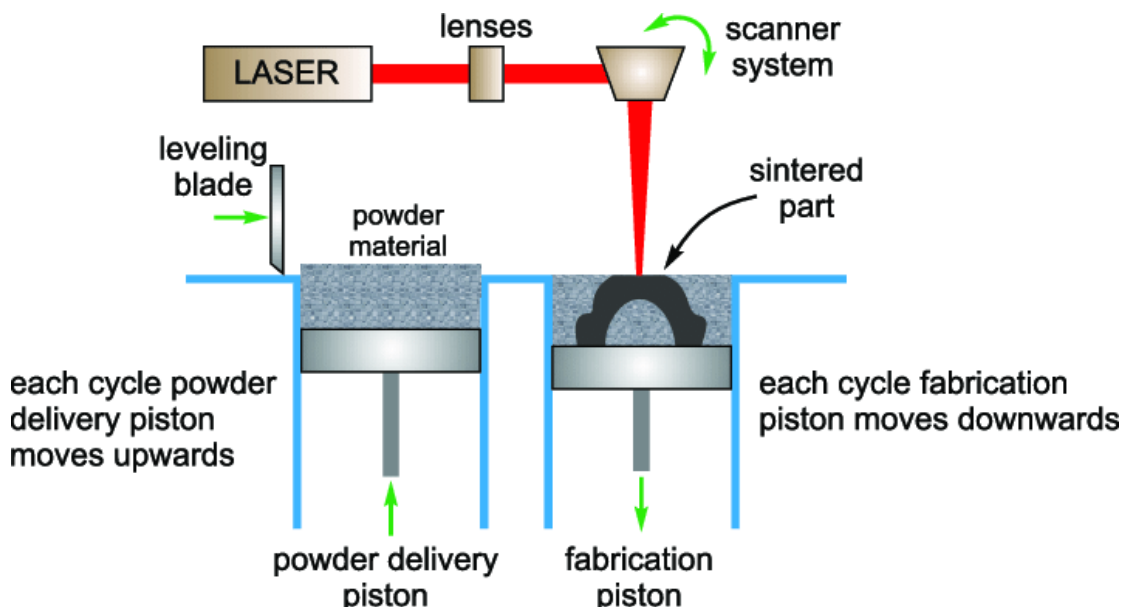
Η τεχνολογία αυτή είναι και η πιο δημοφιλής τεχνική ανάμεσα στους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι τα χαμηλά κόστη υλοποίησης και στα οικονομικώς προσιτά- με πληθώρα δυνατοτήτων υλικά που απαιτεί, όπως και στο σχετικά απλό στη λειτουργία και συντήρηση εξοπλισμό. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά μη ρυπογόνα και δεν απαιτούνται σκληρές χημικές ουσίες. Παράλληλα, η στερεή σε μορφή κιβωτίου φύση του εξοπλισμού επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση σε γραφείο ή την αποθήκευση σε κάποιο χώρο. Υπάρχει, επίσης, μεγάλη ποικιλία υλικών με διάφορες μηχανικές ιδιότητες. Τέτοια είναι το χαρτί, το κερί, τα μέταλλα και το πλαστικό.

Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου FFF είναι ότι οι στρώσεις υλικού στα εκτυπωμένα αντικείμενα είναι συνήθως οπτικά εμφανείς. Επίσης, ο τρόπος με τον οποίο συγκολλούνται τα στρώματα μεταξύ τους επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο το αντικείμενο διαχειρίζεται δυνάμεις, καθιστώντας το μηχανικά αδύναμο σε πιέσεις σε συγκεκριμένα σημεία. Τα 3D εκτυπωμένα αντικείμενα με τη συγκεκριμένη μέθοδο ίσως απαιτούν την παράλληλη εκτύπωση στηριγμάτων, όμως αυτό είναι κάτι που μπορεί να αποφευχθεί αν ο σχεδιαστής του ψηφιακού μοντέλου μεριμνήσει για αυτό.

Η εναπόθεση υλικού από δύο κεφαλές δίνει τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικού υλικού στον κάθε εξωθητή, καθιστώντας εφικτή την χρησιμοποίηση δύο υλικών επάνω σε ένα ενιαίο τρισδιάστατο αντικείμενο. Η δυνατότητα αυτή χρησιμοποιείται για λόγους εμφάνισης με τη χρήση διαφορετικών χρωμάτων στο ίδιο σώμα, αλλά και για τον καθορισμό συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων με βάση τις προτιμήσεις και τις ιδιότητες που επιθυμεί να αποδώσει στο αντικείμενο ο χρήστης. Ακόμα ένα θετικό στοιχείο είναι η δυνατότητα εκτύπωσης υλικού PVA για την εκτύπωση των στηριγμάτων, αφού έχει την ιδιότητα της διαλυτότητας στο νερό. Αυτό σημαίνει, ότι μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, το αντικείμενο θα έχει λείες επιφάνειες, αφού οι δομές των στηριγμάτων μπορούν να αφαιρεθούν σχετικά εύκολα, χωρίς να απαιτείται μεγάλος χρόνος για την μετα-επεξεργασία.

Συμπερασματικά, η μέθοδος FFF είναι κατάλληλη για περιβάλλον γραφείου, αφού ο χειρισμός του εκτυπωτή είναι σχετικά απλός όπως και η συντήρηση, ενώ δεν απαιτούνται σκληρά χημικά ή σταθμοί αερισμού για τη λειτουργία ή την μετα-επεξεργασία. Τα αναλώσιμα του εκτυπωτή βρίσκονται σε μεγάλη ποικιλία και με προσεγγιστικό κόστος, σε σχέση με αυτά άλλων μεθόδων. Πωλούνται σε μορφή νήματος, το οποίο δεν αλλοιώνεται με το χρόνο, ενώ η χρήση τους είναι αρκετά φιλική ακόμα και σε μη έμπειρους χρήστες.

Η επόμενη τεχνολογία ταχείας προτυποποίησης είναι αυτή της SLS, λαμβάνοντας ως αναλώσιμη ύλη συνήθως πολυμερή που έχουν τη μορφή σκόνης. Το πολυμερές τοποθετείται σε ένα σκεύος, από το οποίο μια κεφαλή κατανέμει τη σκόνη σε μια λεπτή στρώση, επάνω στην τράπεζα εκτύπωσης. Έπειτα, μια εστιασμένη λυχνία λέιζερ συγκολλεί τους κόκκους σκόνης αναλώσιμου στο ενιαίο σχήμα στρώσης, αντίστοιχο με αυτό του ψηφιακού μοντέλου. Η κεφαλή κινείται οριζοντίως κατά ένα μικρό κλάσμα του χιλιοστού, ώστε να επαναληφθεί η ίδια διαδικασία του επόμενου, ανώτερου στρώματος. Το περισσευούμενο υλικό πολυμερούς που δεν έχει χρησιμοποιηθεί κοσκινίζεται και αναμιγνύεται με την υπόλοιπη σκόνη. Ακολουθεί επανάληψη της διαδικασίας, έως ότου προκύψει ο σχηματισμός του πλήρους αντικειμένου (Εικόνα 1.1.13).



Εικόνα 1.1.3: Ενδεικτικό διάγραμμα εκτυπωτή τεχνολογίας SLS (Πηγή: Krkovic, Matija & Brojan, Miha & Bombač, David & Hermann, Dejan (2013))

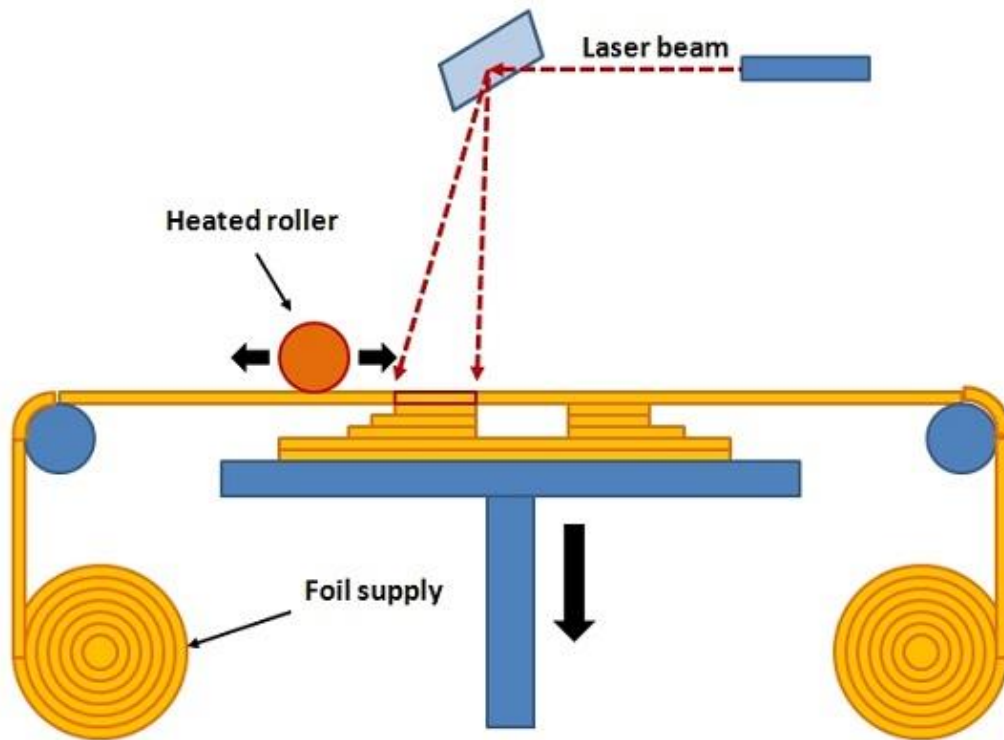
Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απουσία ορατών στρωμάτων στα εκτυπωμένα μέρη, τα οποία αντιθέτως εμφανίζουν ‘κοκκώδεις’ επιφάνειες. Τα εκτυπωμένα αντικείμενα διαθέτουν συγκριτικά ισχυρές μηχανικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση, ενώ η χρήση στηριγμάτων δεν είναι απαραίτητη κατά την εκτύπωση.

Ωστόσο, αρνητικό χαρακτηριστικό της μεθόδου SLS είναι ο μεγάλος σε όγκο εξοπλισμός, κάτι που την καθιστά ακατάλληλη για το περιβάλλον γραφείου. Είναι σχετικά δύσκολο να αλλαχτούν τα υλικά ή χρώματα, ενώ η σκόνη που χρησιμοποιείται ως υλικό εκτύπωσης μπορεί να είναι επικίνδυνη εάν εισπνευστεί.

Η αγορά του εξοπλισμού και των αναλώσιμων είναι κοστοβόρα, όπως επίσης απαιτείται ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό για τη λειτουργία και τη συντήρηση του, κάτι που θα επιβαρύνει περαιτέρω τον αγοραστή. Επιπλέον κόστος προστίθεται, αφού η τεχνολογία αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη σταθμού μετα-επεξεργασίας, όπως επίσης και σταθμού ανακύκλωσης αναλώσιμης σκόνης.

Γενικότερα, ο σχεδιασμός σχημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας χωρίς την ανάγκη εκτύπωσης στηριγμάτων παρέχει πληθώρα δυνατοτήτων σχεδίασης ενώ οι στρώσεις υλικού δεν είναι ορατές υπό την οπτική παρατήρηση. Το κόστος, ωστόσο αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους, αν κανείς λάβει υπόψη την αρχική εγκατάσταση, συντήρηση και εξειδίκευση εργασίας. Τέλος, η χρήση ισχυρών λυχνιών λέιζερ και αποκομμάτων σκόνης που προκύπτουν από την μέθοδο, το SLS ίσως θεωρηθεί μια επιβλαβής για το χρήστη και το περιβάλλον του τεχνολογία [3].

Η μέθοδος εκτύπωσης κατασκευής πλαστικοποιημένων αντικειμένων (LOM – Laminated Object Manufacturing) είναι μια προσθετική διαδικασία παραγωγής που χρησιμοποιεί όπως και οι υπόλοιπες μέθοδοι, την εναπόθεση υλικού σε στρώσεις. Ονομάζεται έτσι, λόγω της εναπόθεσης πλαστικοποιημένου υλικού. Αυτό το υλικό μπορεί να είναι είτε χαρτί, πλαστικό ή ακόμα και μέταλλο. Κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, εναποτίθενται στρώσεις υλικού, οι οποίες μετά καλύπτονται με συγκολλητικές ουσίες (πλαστικοποίηση). Κατά συνέπεια, οι στρώσεις ενώνονται μεταξύ τους όπως διεξάγεται η εκτύπωση. Το γεγονός ότι η συγκόλληση γίνεται στιγμές μετά την εκτύπωση είναι αυτό που διαχωρίζει τη μέθοδο LOM από τις υπόλοιπες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης (Εικόνα 1.1.4).



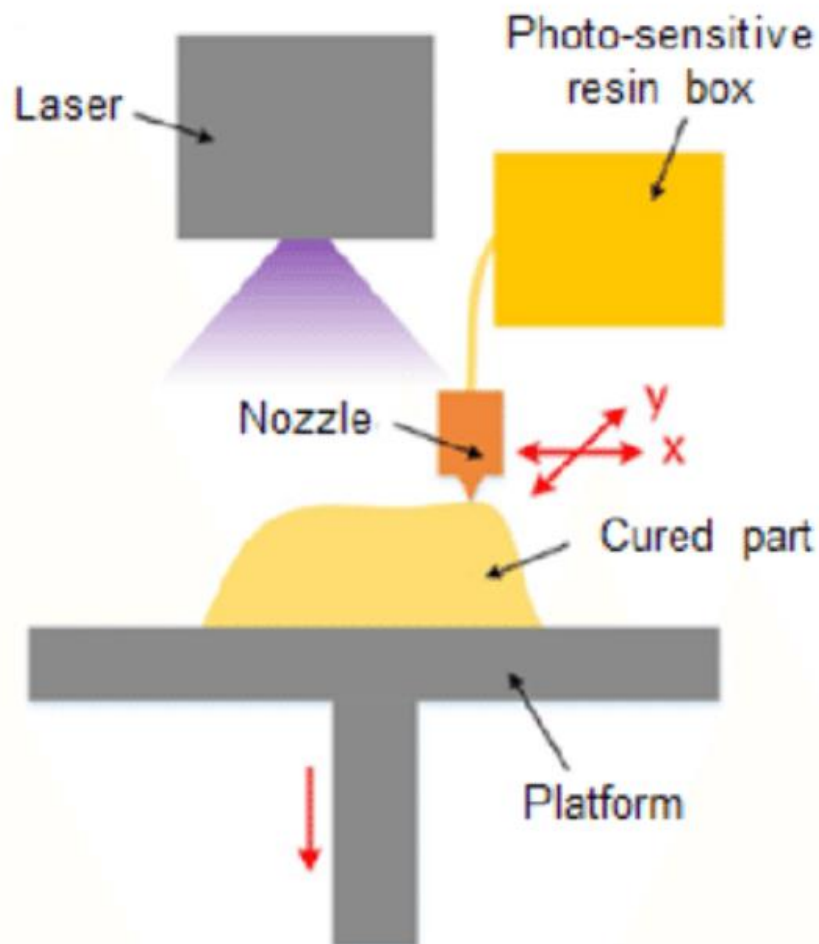
Εικόνα 1.1.4: Ενδεικτικό διάγραμμα εκτυπωτή τεχνολογίας LOM (Πηγή: www.3dprintingfromscratch.com)

Στα θετικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μεθόδου καταλογίζεται η σχετικά μεγάλη ταχύτητα εκτύπωσης με χαμηλό κόστος. Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα συνεργασίας με άλλες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης (Hybrid Manufacturing Systems), ενώ παρέχει ευκολία στην ενσωμάτωση εξωτερικών υλικών και αντικειμένων, όπως αισθητήρες και καλώδια, ταυτόχρονα με την εκτύπωση. Δεν υπάρχει η ανάγκη χρήσης στηριγμάτων, συνεπώς ούτε και αφαίρεσής τους μετά την υλοποίηση. Τα συστήματα LOM μπορούν παράλληλα, να εκτυπώσουν υλικό κάθε χρωματικού φάσματος. Σε μερικές μεθόδους κατασκευής πλαστικοποιημένων αντικειμένων, η φύση του υλικού δεν επιδέχεται αλλαγές κατά τη διάρκεια ή μετά την εκτύπωση. Σε άλλες όμως, το εκτυπωμένο αντικείμενο είναι ανακυκλώσιμο, γεγονός που μπορεί να προσφέρει χαμηλότερα κόστη αναλώσιμων.

Η μέθοδος αυτή, δεν είναι απολύτως κατάλληλη για την κατασκευή δομικών ή λειτουργικών μοντέλων. Για αυτό το λόγο, ακόμα και στην προτυποποίηση προϊόντων, εμφανίζεται ως λιγότερο ικανοποιητική, με κυριότερη χρήση σε εκθεσιακά μοντέλα. Τα φινιρίσματα επιφανειών τέτοιων αντικειμένων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα το υλικό που χρησιμοποιήθηκε, αλλά ίσως απαιτούν και μετέπειτα χειροκίνητη επεξεργασία που ίσως είναι χρονοβόρα. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι είναι δύσκολο να παραχθούν κοίλα μέρη σε ορισμένους τύπους διαδικασιών πλαστικοποίησης φύλλων. Και η αντοχή συγκόλλησης εξαρτάται από την τεχνική πλαστικοποίησης που χρησιμοποιείται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι κολλητικοί δεσμοί που χρησιμοποιούνται δεν είναι αρκετά ισχυροί για μακροχρόνια χρήση όσον αφορά την αντοχή και την ακεραιότητα του προϊόντος [4,5].

Η πέμπτη μέθοδος που αναλύεται είναι αυτή της Inkjet τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αποτελεί μια διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης, βάσει της οποίας

εναποτίθενται υγρά ή στερεά υλικά. Από πολυμερή, διηλεκτρικά νανοσωματίδια, έως και αγώγιμα νανοσωματίδια αποτελούν τις πρώτες ύλες αυτής της μεθόδου, καθιστώντας την προσαρμόσιμη σε μεγάλο εύρος υλικών. Κατά την εκτύπωση, το επιλεγμένο υλικό εξάγεται από την κεφαλή εξώθησης, η οποία ακολουθά το ψηφιακό σχέδιο. Όμοια με τις υπόλοιπες διαδικασίες ταχείας κατασκευής, σχηματίζει στρώσεις σε κάθε περίοδο εναπόθεσης υλικού. Κάθε στρώση που έχει κατατεθεί πρέπει να σκληρυνθεί μεταξύ διαδοχικών εναποθέσεων, ενώ η διαδικασία σκλήρυνσης ποικίλει αναλόγως των χρησιμοποιούμενων υλικών για την εκτύπωση του προϊόντος. Τα συστήματα 3D εκτύπωσης Inkjet περιλαμβάνουν τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη σκλήρυνση κάθε στρώματος εντός του συστήματος. Ενώ η ανάγκη σκλήρυνσης κάθε εναποτιθέμενου στρώματος μεταξύ των εναποθέσεων μπορεί να ακούγεται χρονοβόρα, τα αποτιθέμενα στρώματα είναι πολύ λεπτά και μπορούν να σκληρυνθούν γρήγορα, ιδανικά σε χαμηλή θερμοκρασία ή με έκθεση σε ακτινοβολία (όπως έκθεση σε υπέρυθρο ή υπεριώδες φως). Όσο για την ανάλυση της εκτύπωσης, οι παράγοντες που την καθορίζουν είναι το μέγεθος σταγόνας υλικού, το οποίο καθορίζεται από τη διατομή της κεφαλής εξώθησης. Πιο συγκεκριμένα, μικρότερη διατομή κεφαλής συνεπάγεται και καλύτερη ανάλυση αντικειμένου. Η μέθοδος Inkjet παρέχει αγώγιμες και μονωτικές δομές υψηλής ανάλυσης με ένα ευρύ φάσμα υλικών, καθιστώντας την ιδανική για πρόσθετη κατασκευή προηγμένων κυκλωμάτων PCB με υψηλή πυκνότητα διασύνδεσης και υψηλό αριθμό στρώσεων (Εικόνα 1.1.5).

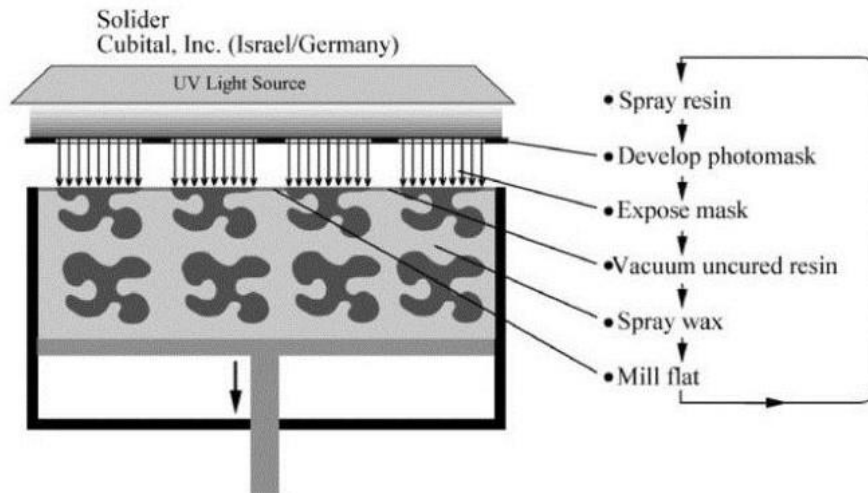


Εικόνα 1.1.5: Ενδεικτικό διάγραμμα εκτυπωτή τεχνολογίας Inkjet (Πηγή: John Wiley & Sons, Ltd)

Όπως αναφέρθηκε, η υψηλή ακρίβεια εναπόθεσης υλικού αποτελεί το βασικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής. Εκτυπώνει σύνθετες δομές σε μικρούς σχετικά χρόνους, κάτι που την καθιστά ιδανική για βιομηχανική χρήση. Ταυτόχρονα, τα εκτυπωμένα αντικείμενα διαθέτουν πολύ λείες επιφάνειες, βασικό στοιχείο για την κατασκευή πρωτοτύπων. Την ποιότητα εκτύπωσης βελτιώνει, επίσης, η πληθώρα διαθέσιμων χρωμάτων προς εκτύπωση.

Ως αρνητικό χαρακτηριστικό θεωρείται το εξαιρετικά υψηλό κόστος εξοπλισμού και αναλώσιμων, όπως και η έλλειψη αντοχής των εκτυπωμένων τμημάτων. Τα προϊόντα αυτά, συνήθως είναι δομικά 'αδύναμα', που σημαίνει ότι αδυνατούν να αντέξουν μεγάλες πιέσεις και φορτία. Μία ακόμη επιβάρυνση του κόστους, αποτελεί η απαραίτητη εκτύπωση στηριγμάτων σε σύνθετες δομές, εάν συμπεριλάβει κανείς το ήδη υψηλό κόστος αναλώσιμων υλικών [6,7].

Τελευταία τεχνολογία προτυποποίησης είναι η παραλλαγή της στερεολιθογραφίας, αυτή της Σκλήρυνσης Στερεού Εδάφους (Solid Ground Curing - SGC). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί λαμπτήρες παραγωγής υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία στερεοποιεί ολόκληρες στρώσεις υλικού επάνω στην τράπεζα εκτύπωσης. Αρχικά, ένα στρώμα φωτοευαίσθητης ρητίνης ψεκάζεται επάνω στην επιφάνεια. Έπειτα, ο εκτυπωτής δημιουργεί μια 'μάσκα' φωτός, δηλαδή το περίγραμμα της διατομής του προβλεπόμενου ψηφιακού μοντέλου. Αυτή η μάσκα, με τη χρήση ηλεκτροστατικού μελανιού στερεοποιείται, ομοίως με την τεχνολογία των φωτοτυπικών μηχανημάτων. Κατόπιν, ακτίνες υπεριώδους ακτινοβολίας εκπέμπονται προς τη μάσκα, περνώντας μέσα από τα διάτρητα σημεία της, προκαλώντας την πλήρη σκλήρυνση των υποκείμενων στρωμάτων ρητίνης. Αφού το στρώμα έχει σκληρυνθεί, ο εκτυπωτής αφαιρεί την περισσευόμενη υγρή ρητίνη, και εναποθέτει κερί στο σημείο που χρησιμοποιείται ως υποστηρικτική δομή του αντικειμένου καθ' όλη τη διαδικασία δημιουργίας του. Μια μεταλλική επιφάνεια ψύξης προκαλεί τη στερεοποίηση του κεριού, αφαιρεί το περισσευόμενο κερί, το οποίο και συλλέγεται από σύστημα εξαερισμού που λειτουργεί με κενό. Έτσι, η ανώτερη επιφάνεια λειαίνεται και επαναλαμβάνεται η ίδια ακολουθία. Κατά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, το μοντέλο περιβάλλεται από κερί. Η αφαίρεσή του γίνεται με την θέρμανση του αντικειμένου σε φούρνο μικροκυμάτων, ή με πλύση, για την αποκάλυψη του τελικού προϊόντος (Εικόνα 1.1.6).

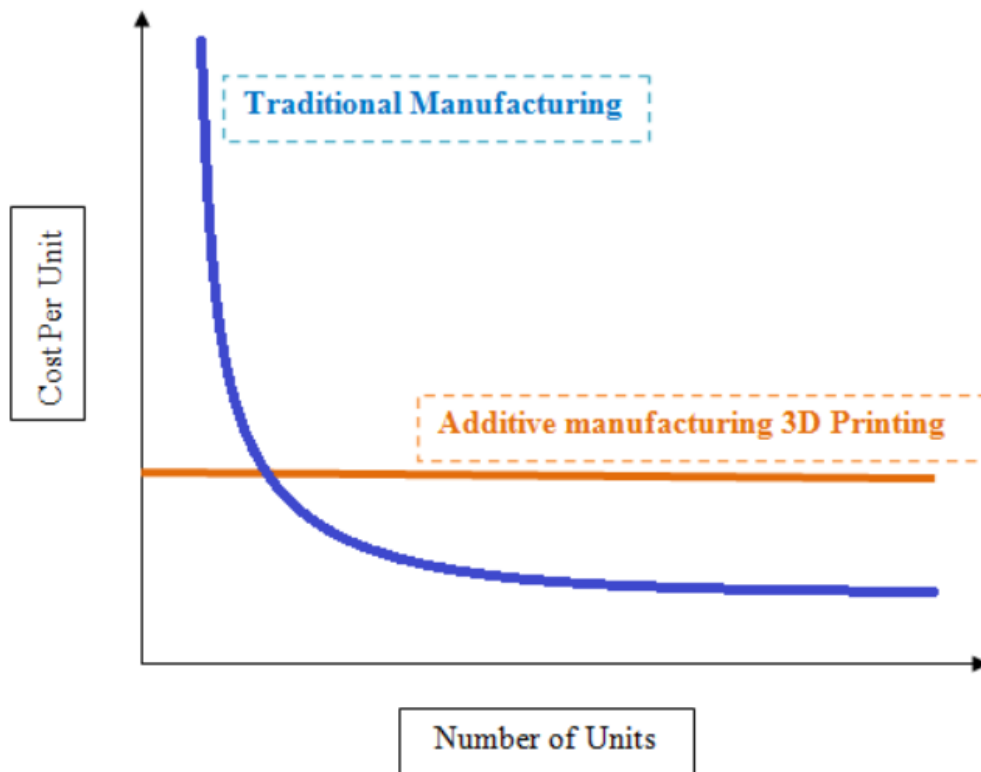


Εικόνα 1.1.6: Ενδεικτικό διάγραμμα λειτουργίας εκτυπωτή SGC (Πηγή: www.greenindustrylinks.com)

Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης με μεγάλη ακρίβεια, όπως και η έλλειψη ανάγκης για χρήση στηριγμάτων.

Αρνητικό χαρακτηριστικό είναι η παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων, χωρίς να είναι εφικτή η επαναχρησιμοποίηση υλικού, αλλά και το ότι εμφανίζονται επιφανειακές ανωμαλίες επηρεάζοντας την ακρίβεια αναπαράστασης του ψηφιακού μοντέλου στον υλικό κόσμο [8,9].

Η ραγδαία ανάπτυξη που γνώρισε ο τομέας του 3D Printing έχει οδηγήσει σε πολλές ανακαλύψεις, ενώ παράλληλα έχει μειωθεί το κόστος [10] και ο χρόνος κατασκευής, το βάρος του παραγόμενου αντικειμένου και η κατανάλωση σε υλικό (Εικόνα 1.1.2). Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν την 3D εκτύπωση περισσότερο συμφέρουσα από την παραδοσιακή διαδικασία παραγωγής και πιο προσιτή στον μέσο καταναλωτή [11].



Εικόνα 1.1.2: Σύγκριση κόστους τρισδιάστατης εκτύπωσης και παραδοσιακής μεθόδου κατασκευής. (Πηγή: Handal, Raed. (2017). Additive Manufacturing As A Manufacturing Method).

1.2 Χρησιμότητα του 3D Printing στην Βιοϊατρική Τεχνολογία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, έτσι, έχει εισχωρήσει σε τομείς και πεδία σε μερικά από τα οποία η χρήση της είναι πλέον απαραίτητη. Χρησιμοποιείται για παράδειγμα, στη Βιοϊατρική τεχνολογία στον τομέα της μηχανικής ιστών, όπου δημιουργούνται εμφυτεύματα από βιο-συμβατά υλικά με σκοπό την αντικατάσταση ιστών που έχουν καταστραφεί ή έχουν παύσει να λειτουργούν. Η βασική αρχή πίσω από την ιστομηχανική είναι ο συνδυασμός βιοσυμβατών υλικών, με ζωντανά κύτταρα για τη δημιουργία δομών οι οποίες θα επιτρέπουν την επαναφορά του υγιούς ιστού μέσα από το κατασκευασμένο εμφύτευμα [12-13]. Η τεχνολογία του 3D Printing έχει προσαρμοστεί κατάλληλα με την ιστομηχανική, επιτρέποντας την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, όμοιων με τις δομές συνδετικού ιστού του ανθρώπινου σώματος [12]. Από εμφυτεύματα πόρων που επιτρέπουν την ανάπλαση οστού [14], έως σύνθετα μικρο-όργανα αποτελούμενα από κύτταρα [15], το κύριο πλεονέκτημα της 3D εκτύπωσης είναι η δυνατότητα που παρέχει στη δημιουργία γεωμετρικά σύνθετων δομών με πολύ μεγάλη ακρίβεια τοποθέτησης υλικού ή κυττάρων στο χώρο.

Ομοίως με την ιστομηχανική, ο τομέας της τρισδιάστατης βιολογικής εκτύπωσης αφορά στο σχηματισμό δομών φυσιολογίας, αναπαριστώντας τον ανθρώπινο ιστό/μικροπεριβάλλον με τη χρήση κατάλληλων υλικών [16]. Μπορεί η κατασκευή οργάνων αντίστοιχων των πραγματικών να απέχει δεκαετίες, ωστόσο η βιο-εκτύπωση δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα της πιστής αναπαράστασης του οργάνου τόσο δομικά, όσο και λειτουργικά. Με αυτό τον τρόπο, επιστήμονες και ερευνητές

μπορούν να κατανοήσουν και να διεξάγουν πειράματα επάνω σε αυτούς τους ιστούς, μελετώντας τη συμπεριφορά τους σε θεραπείες υπό φυσιολογικές συνθήκες. Παραδείγματα τέτοιων εκτυπωμένων ιστών αποτελούν το συκώτι, το μυοκάρδιο, σκελετικοί μύες, δερματικός ιστός, νευρώνες και κακοήθεις όγκοι [16-25]. Εκτυπωμένα μοντέλα αυτών έχουν συμβάλει στην παρακολούθηση της απορρόφησης φαρμάκων στα πλαίσια ερευνητικών εργαστηρίων αλλά και της φαρμακοβιομηχανίας.

Το πεδίο των χειρουργικών εμφυτευμάτων και προθέσεων αναπτύσσεται συνεχώς, επιτρέποντας μία περισσότερο συνεκτική ενσωμάτωση αυτών των ξένων αντικειμένων στον περιβάλλοντα ιστό τους, καθώς και την αύξηση της λειτουργικότητάς τους. Ο σχεδιασμός των εμφυτευμάτων και των προθέσεων απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση που συνδυάζει αρχές της επιστήμης των υλικών, της μηχανικής, της εμβιομηχανικής, της μοριακής βιολογίας, των φαρμακευτικών προϊόντων και μιας μακροχρόνιας κλινικής παρακολούθησης. Το 3D Printing μπορεί να συμβάλει στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ της βιολογίας και της μηχανικής δημιουργώντας σύνθετα βιοσυμβατά και βιοδραστικά κατασκευάσματα που εκμεταλλεύονται μοναδικές ιδιότητες υλικών, όπως η οστεοκαθοδήγηση και η οστεοαγωγικότητα, για την προώθηση της αναγέννησης των ιστών και της ολοκλήρωσης του εμφυτεύματος με τον περιβάλλοντα ιστό. Τεχνολογία ακτινολογικής απεικόνισης, όπως υπολογιστική Τομογραφία (CT), μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία πολύ ακριβών μοντέλων CAD ενός ελαττώματος που μπορεί να χρησιμεύσει ως μοντέλο για τρισδιάστατη εκτύπωση, για να εξασφαλιστεί η τέλεια εφαρμογή στον επιθυμητό ιστό [26].

Η ανατομικές διαφοροποιήσεις των ασθενών στην οδοντιατρική οδήγησε το πεδίο στην υιοθέτηση μιας προσαρμοσμένης προσέγγισης για τη διαχείριση κάθε ασθενούς. Πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες σάρωσης και απεικόνισης έχουν ως αποτέλεσμα εξαιρετικά ακριβείς τρισδιάστατες ανακατασκευές της στοματικής κοιλότητας όπου πλέον χρησιμεύουν ως πρότυπα για το σχεδιασμό προσαρμοσμένων στοματικών εμφυτευμάτων [27,28]. Στον τομέα της προσθετικής οδοντιατρικής, η χρήση του 3D εκτυπωτή είναι κλινικά καθιερωμένη ως εφικτή και ακριβής προσέγγιση για την κατασκευή προσθέσεων, με συγκρίσιμη ανθεκτικότητα σε συμβατικές τεχνικές και υλικά [29].

Στον τομέα της ορθοπεδικής, τα εμφυτεύματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό, έχοντας ως σκοπό την επαναφορά της μορφής, της δομικής ακεραιότητας και της κίνησης. Τα περισσότερα διαθέσιμα εμφυτεύματα παράγονται σε προκαθορισμένα μεγέθη, σχεδιασμένα έτσι, ώστε να ταιριάζουν στους περισσότερους ασθενείς. Παρά ταύτα, ασθενείς των οποίων η ανατομική δομή αποκλίνει από την μέση δομή ή έχει υποστεί μεγάλη παραμόρφωση, χρειάζονται εξειδικευμένα εμφυτεύματα ώστε να εξασφαλιστεί η κατάλληλη θεραπεία [30]. Ομοίως με την οδοντιατρική, κατασκευάζονται ψηφιακά μοντέλα της ανατομίας του ασθενούς έχοντας ως οδηγό τις ακτινολογικές εξετάσεις, που επιτρέπουν το σχεδιασμό εξατομικευμένων εμφυτευμάτων από 3D Printer. Τα ορθοπεδικά εμφυτεύματα έχουν την εξής ιδιαιτερότητα- πολλές φορές απαιτείται η ένωση ή ακόμα και η ενοποίηση με τα οστά του ασθενούς, ώστε να υποστηρίζεται ο σκελετός και να αποφευχθεί η απόρριψη του εμφυτεύματος από τον οργανισμό [31]. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται υλικά με κατάλληλες ιδιότητες, ώστε να υποστηρίζεται η ανάπλαση του οστού, όπως πορώδη, βιο-απορροφήσιμα, ή εμπλουτισμένα με ασβέστιο [32]. Παράλληλα, πρέπει το τελικό αποτέλεσμα να έχει τη δυνατότητα να απορροφά ουσίες και φάρμακα με όσο το δυνατόν πλησιέστερο τρόπο με το πραγματικό οστό [33]. Αξιοσημείωτη είναι

η χρήση των 3D Εκτυπωτών στην κατασκευή ειδικών εξωτερικών ναρθήκων για τη θεραπεία των κοινών καταγμάτων [34].

Η 3D εκτύπωση αποτελεί το αποτελεσματικότερο εργαλείο στην μετατροπή ψηφιακών μοντέλων σε φυσικών, κατασκευάζοντας εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες υψηλών απαιτήσεων, όπως τους χώρους χειρουργείων των νοσοκομείων [35]. Αφού αποστειρωθούν, εργαλεία όπως οδηγίοι τομών [36], διαστολές και σφιγκτήρες μπορούν αμέσως να χρησιμοποιηθούν ενεργά. Έρευνα έδειξε, ότι 3D εκτυπωμένοι διαστολές που αποτελούνται κυρίως από PLA αποδίδουν εξίσου καλά με τα αντίστοιχα, συμβατικά εργαλεία, ενώ είναι ανοξείδωτοι και κοστίζουν περίπου 10 φορές λιγότερο. Μπορεί κανείς έτσι να φανταστεί την επίδραση που θα είχε η ευρεία χρήση των 3D εκτυπωτών παγκοσμίως, στην εκτύπωση χειρουργικών εργαλείων. Ρεαλιστικά, η εδραίωση αυτής της τεχνολογίας σε υπό ανάπτυξη χώρες είναι αρκετά εφικτή [37].

Παρομοίως με την εκτύπωση όλου του παραπάνω ιατροτεχνολογικού εξοπλισμού, είναι εφικτή και η εκτύπωση εξοπλισμού προστασίας, όπως μάσκες προσώπου, προσωπίδες- ασπίδια προστασίας, γάντια, οπτικά γυαλιά προστασίας, προστατευτικά αυτιού, αλλά και αναπνευστήρες. Επίσης είναι δυνατή η εξατομίκευση όλου αυτού του εξοπλισμού με βάση την ανατομική δομή του κάθε ανθρώπου, χρησιμοποιώντας κοινά μέσα όπως ένα κινητό τηλέφωνο και την κάμερα που διαθέτει [38]. Η ευρεία διάδοση της 3D τεχνολογίας έχει τη δυνατότητα να παρέχει τον απαραίτητο εξοπλισμό όπου εκείνος είναι αναγκαίος, όπως για παράδειγμα σε απομακρυσμένες ή δύσβατες περιοχές, σε περιόδους κρίσης ή μεγάλων ελλείψεων.

1.3 Χρήση της μάσκας προσώπου σε περίοδο πανδημίας

Τον τελευταίο καιρό, η εξάπλωση της νόσου του κορωνοϊού οξείας αναπνευστικού συνδρόμου του 2019 (COVID-19) σε παγκόσμιο επίπεδο έχει λάβει ανησυχητικό ρυθμό, αδιακρίτως ιατρικών καταστάσεων, ηλικιών ή άλλων δημογραφικών στοιχείων ασθενών. Καθώς το ξέσπασμα συνεχίζει να εξελίσσεται, έχουν γίνει συγκρίσεις με την κοινή γρίπη. Και οι δύο προκαλούν αναπνευστική νόσο, ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ιών και του τρόπου εξάπλωσής τους. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις στα μέτρα δημόσιας υγείας που μπορούν να εφαρμοστούν για την αντιμετώπιση κάθε ιού. Και οι δύο μεταδίδονται μέσω επαφής, σταγονιδίων και μικροβιοφόρων εστιών. Κατά συνέπεια, μέτρα δημόσιας υγείας όπως η τήρηση της υγιεινής των χερών και η καλή αναπνευστική εθιμοτυπία είναι σημαντικές ενέργειες που μπορούν να λάβουν όλοι για την πρόληψη της μόλυνσης [39].

Μία από τις σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των δύο ιών, αποτελεί η ταχύτητα μετάδοσης. Η κοινή γρίπη παρουσιάζει συντομότερη μέση περίοδο επώασης αλλά σειριακό διάστημα (χρόνο μεταξύ διαδοχικών περιπτώσεων) από τον ιό της COVID-19. Ο ιός της COVID-19 παρουσιάζει σειριακό διάστημα από πέντε έως έξι ημέρες, σε αντίθεση με τον ιό της γρίπης του οποίου το σειριακό διάστημα είναι στις τρεις ημέρες. Από τα παραπάνω δεδομένα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η γρίπη έχει τη δυνατότητα ταχύτερης εξάπλωσης από τον ιό της COVID-19. Παράλληλα, η μετάδοση κατά τις τρεις έως και πέντε πρώτες ημέρες ίσως είναι προ-συμπτωματική μετάδοση (μετάδοση του ιού πριν από την εμφάνιση συμπτωμάτων) και είναι ο κύριος παράγοντας μετάδοσης της γρίπης. Αντίθετα, ενώ μαθαίνουμε ότι υπάρχουν άνθρωποι που μπορούν να αποβάλλουν τον ιό COVID-19 ακόμα και σε μία μέρα πριν από την εμφάνιση των συμπτωμάτων, προς το παρόν, αυτό δεν φαίνεται να αποτελεί έναν από τους σημαντικούς παράγοντες μετάδοσης. Ο αριθμός αναπαραγωγής όπως

και ο ρυθμός των δευτερογενών λοιμώξεων που προκαλούνται από ένα άτομο που φέρει τον ιό, θεωρείται ότι κυμαίνεται ανάμεσα στο 2 και το 2.5 για τον ιό της COVID-19, μεγαλύτερο από αυτόν της γρίπης. Ωστόσο, οι θεωρητικές εκτιμήσεις για τα δεδομένα των δύο ιών, αυτόν της γρίπης και της COVID-19, δυσκολεύουν αντίστοιχες συγκρίσεις, αφού διαφέρουν στο περιβάλλον και τον χρόνο. Η θνησιμότητα που εμφανίζει ο COVID-19 είναι μεγαλύτερη από αυτή της γρίπης ειδικά της εποχικής γρίπης [39].

Ενώ η πραγματική θνησιμότητα του COVID-19 θα χρειαστεί λίγο χρόνο για να κατανοηθεί πλήρως, τα δεδομένα που έχουμε μέχρι τώρα δείχνουν ότι αρχικός λόγος θνησιμότητας (ο αριθμός των αναφερόμενων θανάτων σε σχέση με τις αναφερόμενες περιπτώσεις) μετράται μεταξύ των ποσοστών 3-4%, η πραγματική θνησιμότητα της μόλυνσης σε ποσοστό (ο αριθμός των αναφερόμενων θανάτων δια του αριθμού των λοιμώξεων) θα είναι χαμηλότερη. Για την εποχική γρίπη, η θνησιμότητα είναι συνήθως πολύ κάτω από 0,1%. Ωστόσο, η θνησιμότητα καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την πρόσβαση και την ποιότητα της υγειονομικής περίθαλψης της εκάστοτε περιοχής/χώρας [40].







Μέχρι και τις αρχές Μαΐου του 2021, σύμφωνα με ο Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης, η παραγωγή και διάθεση του εμβολίου της νόσου COVID-19 σε παγκόσμιο επίπεδο έχει φτάσει σε αντιστοιχία 16 δόσεων ανά 100 άτομα. Το μέγιστο ποσοστό πλήρως εμβολιασμένου πληθυσμού ανήκει, στο Ισραήλ, με το 58.6% των κατοίκων να έχουν εμβολιαστεί. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έχει εμβολιαστεί πλήρως το 33.7%, στο Ηνωμένο Βασίλειο το 25.4%, ενώ στην Ελλάδα αντιστοιχεί το ποσοστό του 11.5%. Όσο η διάθεση του εμβολίου παραμένει σε περιορισμένα επίπεδα, οι περισσότερες χώρες έχουν εστιάσει στην παροχή προτεραιότητας σε ευπαθείς πληθυσμιακές ομάδες, όπως τους χρονίως νοσούντες, ανθρώπους που έχουν ξεπεράσει το εξηκοστό έτος της ηλικίας τους, ιατρούς και νοσοκόμους, και άτομα που εργάζονται στην ‘πρώτη γραμμή’ [40].

Για να επιτευχθεί η ‘Ανοσία της Αγέλης’ χρειάζεται περίπου να έχει εμβολιαστεί το 75% του πληθυσμού. Οι περισσότερες χώρες απέχουν αρκετά από την επίτευξη αυτού του στόχου. Μέχρι τότε, οι τρόποι αντιμετώπισης αυτής της πανδημίας περιορίζονται σε προληπτικά μέτρα και περιορισμούς, διαφορετικούς σε κάθε χώρα, με κοινό στόχο την αποφυγή της διασποράς του ιού.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, ένα βασικό μέτρο για την καταστολή της μετάδοσης είναι η χρήση μάσκας προσώπου. Οι μάσκες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως μέρος μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης, συμπεριλαμβανομένης της φυσικής απόστασης, της αποφυγής πολυπληθών συναθροίσεων σε κλειστούς χώρους και της στενής επαφής. Προτείνεται επίσης, καλός αερισμός χώρου, καθαρισμός χεριών, κάλυψη φτερνίσματος και βήχα και πολλά άλλα.

Υπάρχουν εννέα ή περισσότεροι τύποι προστατευτικών μασκών, οι οποίοι ταξινομούνται και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την αποτελεσματικότητά τους στο φιλτράρισμα μεγάλων σταγονιδίων, την αποτελεσματικότητά τους στο φιλτράρισμα αερολυμάτων και τον τύπο χώρου που μπορούν να φορεθούν (Πίνακας 1.3.1) [41].

Πίνακας 1.3.1: Είδη Καλυμμάτων Προσώπου Ταξινομημένα Με Βάση Την Αποδοτικότητα Τους Και Τους Χώρους Που Ενδείκνυνται Να Χρησιμοποιούνται. (Πηγή: www.sciencealert.com)

Best and worst face coverings			
TYPE OF COVERING	EFFICIENCY AT FILTERING LARGE DROPLETS	EFFICIENCY AT FILTERING AEROSOLS	WHERE IT CAN BE WORN
 N95 mask	99.9%	95%	Healthcare settings
 Surgical mask	98.5%	89.5%	Healthcare settings
 Hybrid mask	96%	94%	Public, indoor, and/or crowded settings
 Two-layer cotton mask	99.5%	82%	Public, indoor, and/or crowded settings
 Tea towel or dishcloth	98%	72.5%	Outdoor areas
 100% cotton t-shirt	97%	51%	Outdoor areas
 Natural silk	56%	54%	Outdoor areas
 Scarf or bandana	44%	49%	As a last resort
 Mask with built-in valve or vent	90%	90%	Never (does not protect others)

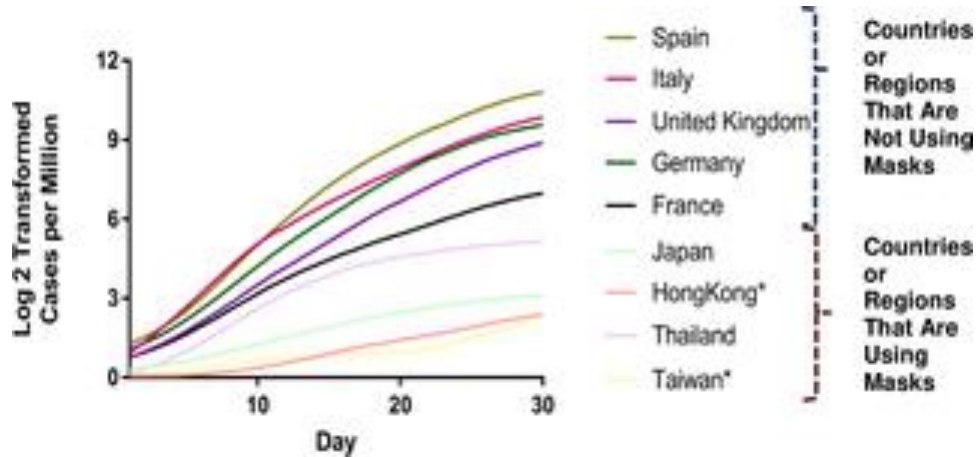
Sources: Democritus University of Thrace; Duke University; Journal of Hospital Infection; Public Health England; University of Chicago; University of Illinois at Urbana-Champaign

INSIDER

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, οι ιατρικές μάσκες προτείνονται για χρήση από ιατρικό προσωπικό, ή για άτομα που έχουν εμφανίσει ήπια συμπτώματα, όπως μυϊκούς πόνους, ελαφρύ βήχα, ξηρό λαιμό ή εξάντληση. Επίσης προτείνονται για άτομα που βρίσκονται εν αναμονή για τα αποτελέσματα του τεστ νόσου COVID-19 ή έχουν βρεθεί θετικά σε αυτό, όπως και για ανθρώπους που παρέχουν βοήθεια σε αυτά. Παράλληλα, συστήνεται ισχυρά να χρησιμοποιούν ιατρική μάσκα προσώπου άτομα που υπάρχει η υποψία ότι φέρουν τον ιό και εκτός των ιατρικών εγκαταστάσεων [41].

Συνιστώνται επίσης ιατρικές μάσκες για τις ακόλουθες ομάδες, επειδή διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο για τη ζωή τους εάν μολυνθούν με τον ιό της COVID-19 και με μεγαλύτερη πιθανότητα θανάτου: Άτομα ηλικίας 60 ετών και άνω και άτομα κάθε ηλικίας με υποκείμενες καταστάσεις υγείας, συμπεριλαμβανομένων της χρόνιας αναπνευστικής νόσου, καρδιαγγειακών παθήσεων, καρκίνου, παχυσαρκίας, ανοσοκαταστολικών ασθενειών και σακχαρώδους διαβήτη. Οι μη ιατρικές, υφασμάτινες μάσκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το ευρύ κοινό κάτω των 60 ετών και που δεν έχουν υποκείμενες παθήσεις υγείας [42]. Σύμφωνα με το Πανεπιστήμιο Jhon Hopkins [43], χώρες των οποίων οι κάτοικοι είχαν ήδη εντάξει την χρήση μάσκας προσώπου στην καθημερινότητά τους πριν από την περίοδο της

πανδημίας, εμφάνισαν λιγότερα ενεργά κρούσματα όταν ο ιός εκδηλώθηκε στις χώρες αυτές, σε σχέση με άλλες χώρες που δεν είχαν υιοθετήσει αυτή τη συνήθεια (Εικόνα 1.3.1).



Εικόνα 1.3.1: Σύγκριση κρουσμάτων COVID-19 σε πολιτισμούς που εισήγαγαν την εφαρμογή της μάσκας προσώπου πριν το ξέσπασμα της πανδημίας. (Πηγή: www.jhu.edu)

Μπορεί να συμπεράνει κανείς βάσει των παραπάνω δεδομένων, την παγκόσμια ζήτηση για μάσκες προσώπου που υπάρχει- και θα συνεχίσει να υπάρχει για τους επόμενους μήνες για την καταπολέμηση της πανδημίας του SARS-CoV-2. Η ανάγκη αυτή θα εξαλειφθεί, μόνο όταν φτάσει σε σημείο κάθε χώρα, οποιουδήποτε πληθυσμού και οικονομίας να έχει αποκτήσει την ‘ανοσία της αγέλης’ μέσω των εμβολιασμών του 70% των ανθρώπων.

1.4 Συνδυασμός τεχνολογιών για την 3D εκτύπωση μάσκας

Η έλλειψη ιατρικών προμηθειών αυξάνεται καθώς η πανδημία της COVID-19 καταπολεμά τις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού. Ερευνητικές ομάδες καθώς και ιδιώτες από όλο τον κόσμο προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν την τεχνική της μοντελοποίησης 3D σε συνδυασμό με εκτυπωτές 3D για τη δημιουργία ιατρικών συσκευών και προμηθειών παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων επιχρισμάτων βιοκυτταρίνης, μασκών προσώπου, προστατευτικών γυαλιών και προσωπίδων.

Ένα παράδειγμα αυτής της απόπειρας πραγματοποιήθηκε στην Ισπανία. όπου μια κοινοπραξία που περιλάμβανε τις εταιρίες Consorci de la Zona France (CZFB), HP, Leitat, SEAT, Consorci Sanitari de Terrassa (CST) και το Νοσοκομείο Parc Taulí στο Sabadell, σχεδίασε έναν 3D εκτυπώσιμο ιατρικό αναπνευστήρα (Εικόνα 1.4.1). Είναι μια συσκευή έκτακτης ανάγκης που υποβοηθά τους ασθενείς να αναπνέουν για μικρό χρονικό διάστημα. Έπειτα, η συσκευή αυτή εγκρίθηκε ιατρικά και ήταν ο πρώτος τρισδιάστατος τυπωμένος αναπνευστήρας που έχει τεθεί σε παραγωγή. Η συμμαχία αυτή στοχεύει στην εκβιομηχάνιση της παραγωγής της ώστε να είναι σε θέση να παράγει εκατοντάδες από αυτές τις μονάδες την ημέρα [44].



Εικόνα 1.4.1: Ο πρώτος 3D Εκτυπωμένος Αναπνευστήρας Που Τέθηκε Σε Μαζική Παραγωγή (Πηγή: www.3dnatives.com)

Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα, η κοινότητα εκτύπωσης 3D έχει κινητοποιηθεί για να αντιμετωπίσει τις ελλείψεις ιατρικού εξοπλισμού σε όλο τον κόσμο. Έχει αποδειχθεί με πολλούς τρόπους, πως η χρήση 3D εκτυπωτών μπορεί να συνεισφέρει ενεργά στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Για να προσφέρουν λύσεις σε αυτήν την κατάσταση, υπάρχουν κατασκευαστές όπως οι Carbon και Formlabs οι οποίοι παράγουν καθημερινά χιλιάδες αντιβακτηριακά επιχρίσματα βιοκυτταρίνης. Ορισμένοι ερευνητές [45,46] έχουν χειριστεί αποτελεσματικά την τεχνολογία εκτύπωσης 3D για να βοηθήσουν τους εργαζομένους στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης στην πρώτη γραμμή της αντιμετώπισης της πανδημίας COVID-19 δημιουργώντας αντιβακτηριακές μάσκες βιοκυτταρίνης.

Επιπροσθέτως, οι ψηφιακές τεχνολογίες περιλαμβάνουν, ενδεικτικά, εικονική πραγματικότητα, ολογραφία, σάρωση 3D, εκτύπωση 3D και χρήση βιοαισθητήρων. Αυτές οι σύγχρονες τεχνολογίες υποστηρίζουν την αποτελεσματική εκτύπωση πολλών και ειδικά σχεδιασμένων εξοπλισμών ατομικής προστασίας (PPE) που σχετίζονται με την καταπολέμηση της πανδημίας COVID-19, μέσα σε μικρότερο χρόνο και με χρήση λιγότερου υλικού.

Όπως προτείνει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, άλλα προϊόντα, όπως καλύμματα προσώπου (επίσης γνωστά ως "χειροτεχνικές ή "οικιακές" / "μη ιατρικές" μάσκες προσώπου) περιλαμβάνουν ποικίλες μορφές προσωπικών ή εμπορικών μασκών και προστατευτικά καλύμματα προσώπου από ύφασμα ή άλλα υφάσματα ή και άλλα υλικά όπως χαρτί. Αυτά, δεν συνιστώνται για χρησιμοποίηση σε χώρους όπου διεξάγεται υγειονομική περίθαλψη, ή από εργαζόμενους στον χώρο της υγείας.

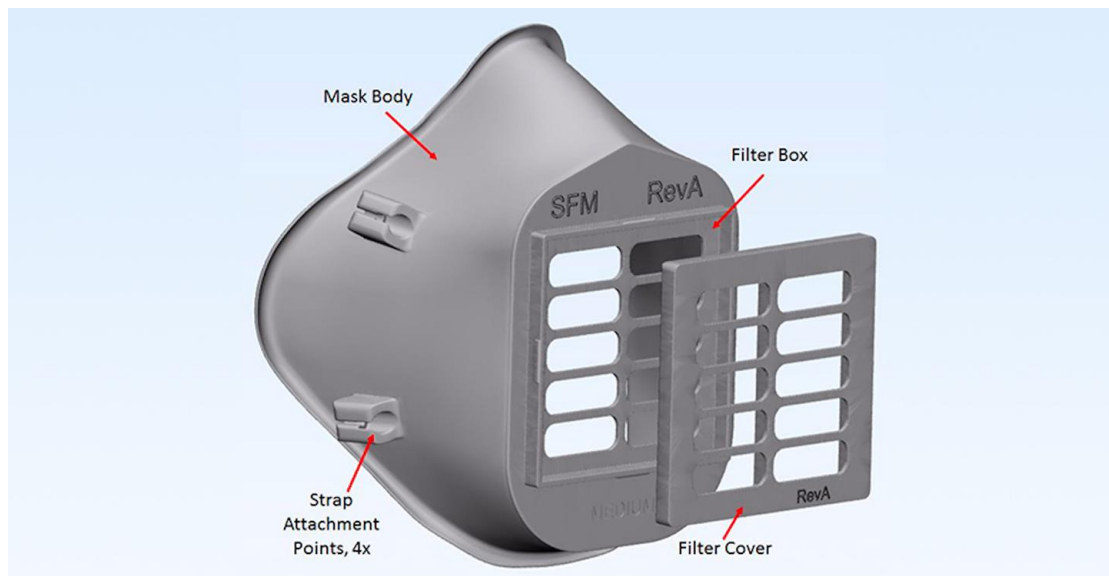
Ορισμένες πληγείσες χώρες παρουσίασαν ακόμη απώλειες, λόγω της αργής παρέμβασής τους. Αλλά για πολλές χώρες, η εξάπλωση ήταν ελάχιστη λόγω της εισαγωγής της χρήσης των Προσωπικού Προστατευτικού Εξοπλισμού (PPE), η τμήμα της οποίας μπορεί να αποδοθεί στη χρήση 3D εκτυπωμένων συσκευών.

Σύμφωνα με το 3DSYSTEMS, μια εταιρεία με υπηρεσίες πρωτοτύπων κατά παραγγελία και υπηρεσίες κατασκευής, η έως τώρα πρόοδος στον τομέα της εκτύπωσης PPE φαίνεται στον Πίνακα 1.4.1.

Πίνακας 1.4.1: Πρόοδος εγκρίσεων από τον FDA τρισδιάστατα εκτυπωμένων ιατροτεχνολογικών προϊόντων (Πηγή: www.3dsystems.com)

Category	Part	Current Activity	Status	In Clinical Use	Next Steps
PPE - Face Shield High Capacity	High capacity frame without visor	Manufacturing	<u>Released</u>	Yes	Released
PPE - Face Shield w/ visor	Frame with visor	Optimization for SLS nylon	Active	Yes	Verification
PPE - Face Mask	Stoppap Face Mask	Manufacturing	<u>Released</u>	Yes	Released
	Surgical Mask ¹	Approval	Active	No	Manufacturing
	Surgical N95 Respirator ¹	Prototyping	Active	No	Bench Testing
Ventilator Solutions	Various	Support of ventilator OEMs	Active	Yes	Continue collaborative efforts
	Splitter	HCP Evaluation	<u>Released</u>	Yes	Contact to participate in clinical validation
Diagnostics	Swabs	HCP Evaluation	<u>Released</u>	Yes	Contact to participate in clinical validation
Medical Education	Lung Ultrasound COVID-19 Training Module	Available	Active	Yes, for clinical training	Contact to participate in clinical validation

Η Stoppap Face Mask (Εικόνα 1.4.1) είναι η μόνη μάσκα εγκεκριμένη από τον FDA, επί του παρόντος, που βρίσκεται σε μαζική παραγωγή [48].



Εικόνα 1.4.1: Stoppap μάσκα προσώπου εγκεκριμένη από τον FDA (Πηγή: www.3dprint.nih.gov)

Αρκετές μάσκες προσώπου καθώς και αμέτρητα μοντέλα 3D έχουν αναρτηθεί στο NIH 3D Print Exchange, έναν ιστότοπο, μέσω του οποίου μπορεί κανείς να ανεβάσει ένα βιοϊατρικό μοντέλο για μελλοντική χρήση από την κοινότητα. Αυτή τη στιγμή, τα μοντέλα αποτελούνται από το πλαίσιο της μάσκας και μερικές φορές τους μάντες [49]. Η τρισδιάστατη εκτύπωση ενός φίλτρου αέρα όπως για παράδειγμα ένα N95 δεν είναι ακόμα δυνατή- απαιτείται η χρήση ενός φίλτρου που αποκτήθηκε από τοπικό νοσοκομείο, φαρμακείο ή διαδικτυακά. Διαφορετικά φίλτρα ιατρικής μάσκας παθογόνων παρέχουν διαφορετικά ποσοστά προστασίας.

Άλλες παράμετροι που πρέπει να εξετάσει κάποιος κατά τη μοντελοποίηση μίας εκτυπώσιμης μάσκας 3D είναι ο χρόνος εκτύπωσης, η ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιείται, ο αριθμός των τμημάτων, ο όγκος των τμημάτων και το βάρος. Καθώς τα περισσότερα σχέδια PPE δημοσιεύονται από ιδιώτες σε διάφορους ιστότοπους της κοινότητας εκτύπωσης 3D, δεν έχουν υποβληθεί σε όλες τις επίσημες λειτουργικές δοκιμές, διαδικασίες έγκρισης ή πιστοποίησης που συνήθως απαιτούνται για προϊόντα PPE και ακόμη πιο σημαντικά για ιατρικές συσκευές. Υπάρχει περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων πιστοποιημένων προϊόντων, καθώς η διαδικασία δοκιμών και πιστοποίησης είναι χρονοβόρα.

Παρά τους χρονικούς περιορισμούς, η Prusa Research έχει λάβει πιστοποίηση για το σχέδιο και τη διάταξη ασπίδας προσώπου από το Υπουργείο Υγείας της Τσεχίας [50]. Συχνά, οι κατασκευαστές ελέγχουν τα τυπωμένα προϊόντα τους σε νοσοκομεία ή γιατρούς ξεχωριστά για τις ιδιότητες εφαρμογής και αποστείρωσης. Για να αποφευχθούν νομικά ζητήματα, τα προϊόντα παραδίδονται με συνημμένη ειδοποίηση ότι αυτά δεν είναι πιστοποιημένα ιατρικά προϊόντα και συνιστάται ο έλεγχός τους εκ των προτέρων για την προβλεπόμενη χρήση τους. Κατά συνέπεια, οι κατασκευαστές πρέπει να λάβουν μια εμπειριστατωμένη απόφαση σχετικά με το ποια σχέδια θα τεθούν σε παραγωγή σε περιόδους έλλειψης εφοδιασμού. Τα σχέδια πρέπει να πληρούν ορισμένες βασικές ιδιότητες: η λειτουργικότητα όπως προορίζεται για τον συγκεκριμένο σκοπό, η αξιοπιστία/ανθεκτικότητα στη χρήση, η δυνατότητα εκτύπωσης και ο σύντομος χρόνος εκτύπωσης είναι μερικά από τα σημαντικότερα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν σκοπεύει κανείς να επιλέξει συγκεκριμένο μοντέλο.

1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία μιας μάσκας προσώπου με υποδοχή φίλτρου, καθώς και ο πειραματικός έλεγχος αποδοτικότητας και διαρροών με διαφορετικά είδη φίλτρων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων οδηγεί στην κατανόηση παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την σχεδίαση μιας μάσκας προσώπου, με σκοπό την τρισδιάστατη εκτύπωσή της. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, με όσο δυνατόν λιγότερες ατέλειες, τόσο δομικές, όσο και λειτουργικές, που θα παρέχει την απαραίτητη προστασία έναντι σε αιωρούμενα σωματίδια.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ

2.1 Υλικά

2.1.1 Εξοπλισμός

Για την δημιουργία της μάσκας, το υλικό που επιλέχθηκε είναι το Πολυγαλακτικό Οξύ (PLA). Ο Οργανισμός Τροφίμων και Φαρμάκων της Αμερικής έχει εκδώσει μια Άδεια Χρήσης Έκτακτης Ανάγκης (EUA) για ιατροτεχνολογικά προϊόντα (σύμφωνα με την ενότητα 564 του ομοσπονδιακού νόμου για τα τρόφιμα, τα φάρμακα και τα καλλυντικά), συμπεριλαμβανομένων και των αναπνευστήρων καθαρισμού αέρα NIOSH, αλλά δεν έχει επισημάνει μεμονωμένα τα τμήματα που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα προϊόντα. Ο FDA αξιολογεί και μπορεί να εγκρίνει ένα υλικό ως μέρος της τελικής συσκευής για την προβλεπόμενη χρήση της, δεν αξιολογεί το ίδιο το υλικό. Υπάρχει μια ποικιλία νημάτων 3D Εκτυπωτών που έχουν εγκριθεί από το FDA σε ιατρικές συσκευές και πιθανώς θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση αυτών των εξαρτημάτων. Χρησιμοποιείται το PLA, θερμοπλαστικό ελαστομερές (TPE), θερμοπλαστικό πολουρεθάνη (TPU), πολυκαπρολακτόνη (PCL), νάιλον, τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), τροποποιημένη με τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο γλυκόλη (PETG), τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο κοτριμεθυλένιο (PETT) και πολυαιθέρας. Ο FDA απαριθμεί μια ποικιλία υλικών ασφαλών για χρήση με τρόφιμα στον κώδικα των ομοσπονδιακών κανονισμών [51]. Αυτά τα πολυμερή έχουν εγκριθεί ως αντικείμενα ή συστατικά αντικειμένων που προορίζονται για χρήση με όλα τα τρόφιμα υπό ορισμένες προϋποθέσεις.

Τα υλικά πρέπει να είναι βιοσυμβατά, αδρανή, ανθεκτικά και εύκολα χυτεύσιμα, όπως και με τα εμφυτεύματα, [52] αυτά τα χαρακτηριστικά είναι επίσης σημαντικά για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Κατά την επιλογή του τύπου του νήματος, οι ιδιότητες του υλικού όπως η μηχανική αντοχή, η ελαστικότητα και η ικανότητα αποστείρωσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε συνδυασμό με τον τελικό σχεδιασμό και τη λειτουργικότητα.

Δύο από τα πιο συνηθισμένα νήματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή υγειονομικού εξοπλισμού είναι το PLA και το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS). Ενώ το PLA είναι κατασκευασμένο από άμυλο και είναι βιοδιασπώμενο με σημείο τήξης στους 60 βαθμούς Κελσίου, το ABS είναι κατασκευασμένο από πετρέλαιο και δεν είναι βιοδιασπώμενο.

Το PLA είναι ένα φθινό και ευέλικτο υλικό που μπορεί να αποστειρωθεί και να τροποποιηθεί με διάφορους τρόπους. Η αποστείρωσή του μπορεί να γίνει με υπεροξειδίο του υδρογόνου, οξειδίο του αιθυλενίου, ακτινοβολία γάμμα και δέσμη ηλεκτρονίων με ελάχιστες αλλαγές στις μηχανικές του ιδιότητες [53].

Επιπλέον, υπάρχουν τεχνικές επεξεργασίας μετά την δημιουργία του αντικειμένου, όπως η επίστρωση ιωδίου και η τροποποίηση της επίστρωσης για την υδροφιλία, όπου μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω τις αντιβακτηριακές ιδιότητες [54]. Αν και το PLA έχει πολλά υποσχόμενες ιδιότητες, η χρήση του για άμεση επαφή με το σώμα δεν έχει εγκριθεί από το ISO 10993 λόγω της ασυμβατότητάς του με τεχνικές

αποστείρωσης υψηλής θερμοκρασίας [55]. Ωστόσο, υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές αποστείρωσης και οι μη κυτταροτοξικές και βιοαποικοδομήσιμες ιδιότητες του PLA το καθιστούν επιθυμητό για χρήση κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19 [54]. Μία ακόμα ιδιότητα του PLA είναι να απορροφά την υγρασία κατά το πέρασμα του χρόνου, κάτι που μπορεί ενδεχομένως να επηρεάσει τη μηχανική ακεραιότητα του εκτυπωμένου αντικειμένου [56,57].

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του υλικού PLA και βάσει της διαθεσιμότητάς του από το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής κρίθηκε κατάλληλο για χρήση στην κατασκευή της μάσκας προσώπου. Επίσης, για τη συγκράτηση της μάσκας στο πρόσωπο χρησιμοποιήθηκαν κοινά λάστιχα συγκράτησης μάσκας, το υλικό των οποίων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη.

Για το φιλτράρισμα των αιωρούμενων σωματιδίων χρησιμοποιήθηκαν πέντε είδη φίλτρων, ειδικά προσαρμοσμένα στην διάμετρο των 6 εκατοστών, ώστε να εφαρμόζονται στην υποδοχή για τα φίλτρα. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν: 1) Τμήμα από 100% βαμβάκι, τμήμα από ένδυμα αποτελούμενο από πολυαμίδιο, τμήμα από 100% βαμβάκι διπλής στρώσης, φίλτρο από μάσκα υφάσματος ενεργού άνθρακα (PM2.5) και φίλτρο από χειρουργική μάσκα non-woven με εσωτερικό φύλλο τήγματος πολυμερών με BFE 98%. Τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν επίσης στους δύο πειραματικούς ελέγχους, ενώ είναι δυνατός και ο συνδυασμός τους εάν ο χρήστης το επιθυμεί.

Για την εκτύπωση της μάσκας προσώπου χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Flashforge Creator 3 του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Εικόνα 2.1.1.1).



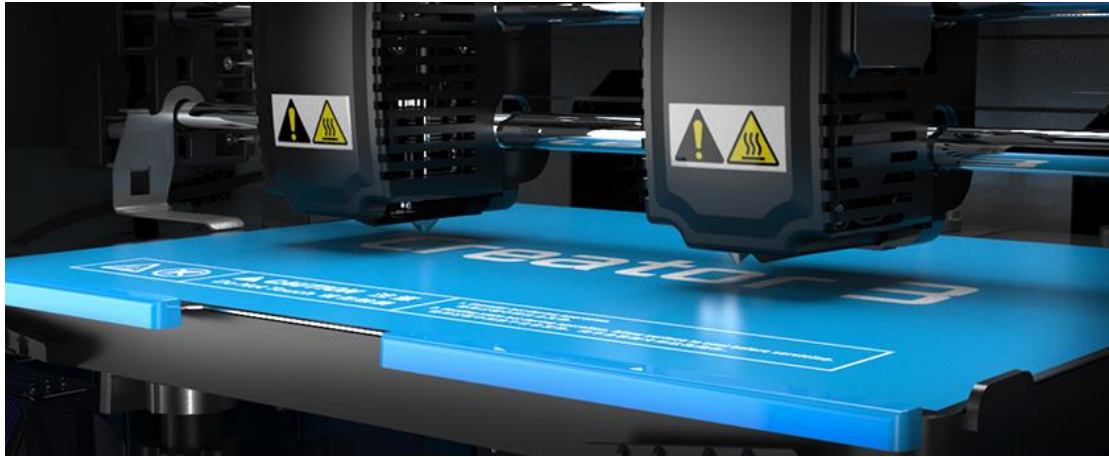
Εικόνα 2.1.1.1: Ο 3D εκτυπωτής Flashforge Creator 3 (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

Διαθέτει αποσπώμενη εύκαμπτη πλατφόρμα εκτύπωσης διαστάσεων 300mm x 250mm, θερμαινόμενη με μέγιστη δυνατότητα θέρμανσης στους 120 °C. Αυτό διευκολύνει την προσκόλληση του εναποτιθέμενου υλικού στην επιφάνεια της πλατφόρμας, ενώ η ελαστικότητα που εμφανίζει συμβάλει στην εύκολη αποκόλληση του αντικειμένου μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Το μέγιστο ύψος εκτύπωσης είναι στα 200mm, καθιστώντας με αυτό τον τρόπο τον προβλεπόμενο μέγιστο όγκο αντικειμένου στα 15 λίτρα ή 0.015 κυβικά μέτρα (Εικόνα 2.1.1.2).



Εικόνα 2.1.1.2: Πλατφόρμα εκτύπωσης του Flashforge Crator 3 (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

Για την εναπόθεση του υλικού εκτύπωσης, διαθέτει σύστημα δύο κεφαλών με ανεξάρτητη κίνηση (IDEX), με δυνατότητα θέρμανσης έως τους 300 °C. Με αυτό τον τρόπο, γίνεται εφικτή η ταυτόχρονη χρήση δύο διαφορετικών υλικών και χρωμάτων επάνω στο ίδιο αντικείμενο. Η διάμετρος των κεφαλών είναι στα 0.4mm με ακρίβεια τοποθέτησης υλικού 0.011mm στους άξονες X και Y και 0.0025mm στον κατακόρυφο άξονα Z. Κατά συνέπεια, η ανάλυση εκτυπωμένου αντικειμένου είναι στα 50μm ενώ η μέγιστη ταχύτητα εκτύπωσης φτάνει έως τα 200mm/sec. Τα ακροφύσια των κεφαλών αποτελούνται από σκληρυμένο χάλυβα, γεγονός που δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα εκτύπωσης χρησιμοποιώντας προσμίξεις όπως μέταλλα (π.χ. χαλκός, μπρούντζος), αλλά και ίνες άνθρακα, υλικά που θα προκαλούσαν διάβρωση σε άλλα συμβατικά ακροφύσια. Η συντήρηση και αντικατάσταση των κεφαλών δεν δυσκολεύει το χρήστη, αφού αφαιρούνται και επανατοποθετούνται (Εικόνα 2.1.1.3).



Εικόνα 2.1.1.3: Σύστημα δύο κεφαλών εναπόθεσης υλικού του Flashforge Creator 3 (Πηγή: www.flashforge.com)

Η τροφοδοσία των κεφαλών με υλικό γίνεται από δύο (τροχούς) που υποστηρίζουν νήματα διαμέτρου 1.75mm, ενώ γίνεται απευθείας στις κεφαλές (Direct Extruder) (Εικόνα 2.1.1.4). Έτσι, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει εύκαμπτα, ελαστομερή υλικά όπως διάφορα είδη TPE και TPU. Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία, ο Flashforge Creator 3 υποστηρίζει υλικά όπως PLA, PETG ABS, PA, PC, PA-CF, PA-GF [58].



Εικόνα 2.1.1.4: Τροχοί τροφοδοσίας υλικού του Flashforge Creator 3 (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

Ο Flashforge Creator 3 διαθέτει έγχρωμη οθόνη αφής 4,5" με πολύγλωσσο περιβάλλον χρήστη, με δυνατότητα προεπισκόπησης των 3D αντικειμένων εκτύπωσης, καθώς και των θερμοκρασιών κεφαλών και πλατφόρμας σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 2.1.1.5). Επίσης, διαθέτει ενσωματωμένη κάμερα, για την

παρακολούθηση της εκτύπωσης από συνδεδεμένες συσκευές όπως υπολογιστές και tablet. Παράλληλα, το σύστημα δοκιμής νήματος επιβάλει την διακοπή της εκτύπωσης σε περίπτωση που ανιχνεύσει μη φυσιολογική τροφοδοσία νήματος υλικού, για την εξασφάλιση επιτυχημένης εκτύπωσης. Παρέχει επίσης, μέσω της οθόνης αφής την πλήρη καθοδήγηση για αυτόματη ευθυγράμμιση της επιφάνειας εκτύπωσης (calibration) αλλά και την ρύθμιση του άξονα Z, σε συνεργασία με τους ενσωματωμένους αισθητήρες που διαθέτει. Τέλος, οι δυνατότητες συνδεσιμότητας για μεταφορά των ψηφιακών μοντέλων στον εκτυπωτή υποστηρίζουν καλώδιο USB ή κινητές μονάδες μεταφοράς, Wi-Fi, καλώδιο ethernet αλλά και πρόσβαση στο 3D Cloud, την πλατφόρμα μεταφοράς και αποθήκευσης δεδομένων σε διαδικτυακό χώρο.



Εικόνα 2.1.1.5: Έγχρωμη οθόνη αφής του Flashforge Creator 3 (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

Για τη διεξαγωγή του πειραματικού ελέγχου αποδοτικότητας φίλτρων, χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο DM2500 του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, από την εταιρεία Leica. Είναι ένα οπτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός κλινικής ή ερευνητικής κλάσης, με δυνατότητες προσαρμογής για την κάλυψη των αναγκών του χρήστη (Εικόνες 2.1.1.6, 2.1.1.7).



Εικόνα 2.1.1.6: Μικροσκόπιο DM2500 της εταιρείας Leica (πλάγια όψη) (Πηγή: www.leica-microsystems.com)

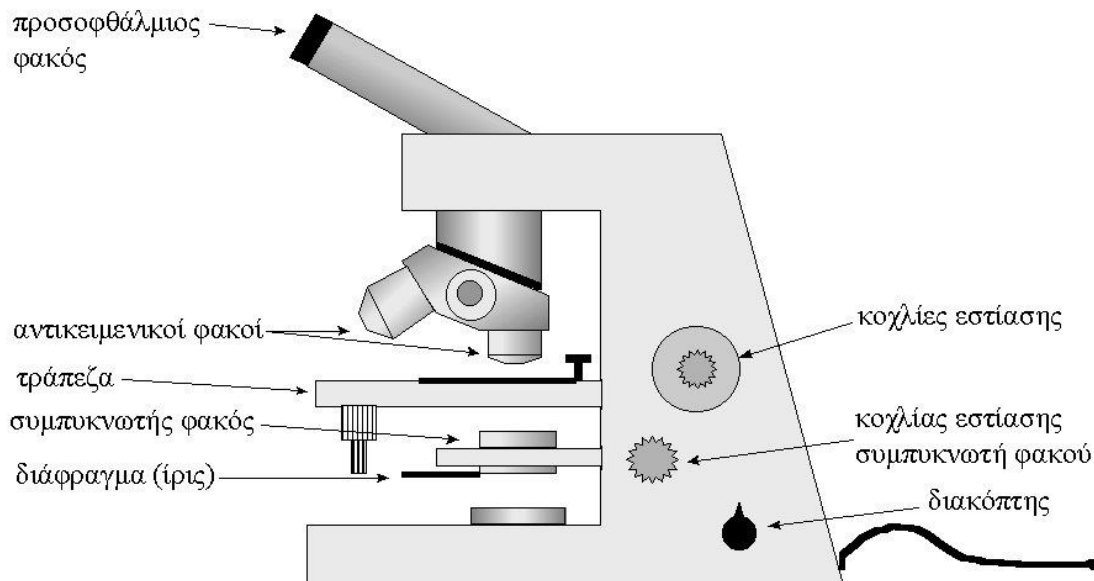


Εικόνα 2.1.1.7: Μικροσκόπιο DM2500 της εταιρείας Leica (εμπρόσθια όψη) (Πηγή: www.leica-microsystems.com)

Συνοδεύεται από μια διοφθαλμική κεφαλή θέασης, όπως και με ένα ζευγάρι προσοφθάλμιων φακών μεγέθυνσης $\times 10$ και οπτικού πεδίου 22mm. Οι φακοί αυτοί, είναι φακοί παρατήρησης και συμμετέχουν στην παραγωγή της τελικής μεγεθυμένης εικόνας. Οι αντικειμενικοί φακοί (βασικής μεγέθυνσης) που χρησιμοποιεί είναι ελαίου, με μεγέθυνση 5x, 10x, 20x και 100x. Είναι plan-achromatic, κάτι που σημαίνει ότι παρέχουν διόρθωση σε σκεδάσεις φωτός από το φαινόμενο «καμπυλότητας πεδίου». Αυτό είναι ένα φυσικό φαινόμενο, που συμβαίνει όταν το φως εστιάζεται μέσω ενός κυρτού φακού. Σε έναν μη-διορθωμένο φακό, ο χρήστης θα μπορούσε να πετύχει έντονη εστίαση γύρω από τις άκρες του οπτικού πεδίου, ή στο κέντρο του οπτικού πεδίου, αλλά όχι και στα δύο μαζί.

Όσο για την τράπεζα του δείγματος, διαθέτει τετράγωνη κεραμική επιφάνεια και εργονομικά σχεδιασμένα χειριστήρια για τη μετακίνησή της στους άξονες X και Y. Ο φωτισμός είναι εγκατεστημένος στη βάση του μικροσκοπίου, και επιτυγχάνεται μέσω ενός ρυθμιζόμενου Kohler LED των 100W. Ένας περιστρεφόμενος κοχλίας στην αριστερή όψη του μικροσκοπίου παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα ρύθμισης της εστίασης, με χαρακτηριστική κλίμακα χαραγμένη στην επιφάνειά του. Στην ουσία, είναι υπεύθυνος της κατακόρυφης μετακίνησης του αντικειμενικού φακού, με δυνατότητα χρήσης για μετρήσεις διαστάσεων του κατακόρυφου άξονα (του ύψους ή

του βάθους) ενός δείγματος. Ένα ενδεικτικό διάγραμμα των θέσεων των εξαρτημάτων του μικροσκοπίου εμφανίζεται στην Εικόνα 2.1.1.8 [59].



Εικόνα 2.1.1.8: Ενδεικτικό διάγραμμα θέσης εξαρτημάτων οπτικού μικροσκοπίου (Πηγή: Κωνσταντίνος Φασσέας, Οπτικά (Φωτονικά) Μικροσκόπια. Γενικές Αρχές)

Σε συνδυασμό με το μικροσκόπιο, χρησιμοποιήθηκε η κάμερα DFC420 C της ίδιας εταιρείας, για την απαθανάτιση των εικόνων μικροσκοπίου (Εικόνα 2.1.1.9). Είναι τεχνολογίας Διάταξης με Σύζευξη Φορτίου (Charged Couple Device) χρησιμοποιώντας αισθητήρες μετατροπής φωτεινών σημάτων σε ψηφιακά σήματα. Η ανάλυση της κάμερας είναι στα 5 megapixel ενώ διαθέτει δυνατότητα αναπαραγωγής της ανιχνεύσιμης εικόνας σε οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή, με συχνότητα ανανέωσης εικόνας στα 15 fps (καρέ ανά δευτερόλεπτο). Τέλος, η τεχνολογία Store and Recall επιτρέπει στο χρήστη να ανακτήσει παλαιότερα αποθηκευμένες ρυθμίσεις για την ανάλυση και σύγκριση δεδομένων [60].



Εικόνα 2.1.1.9: Ψηφιακή κάμερα DFC420 της εταιρείας Leica (Πηγή: www.leica-microsystems.com)

Για την υλοποίηση του δεύτερου ελέγχου, χρησιμοποιήθηκε η υπέρυθρη κάμερα FLIR Thermacam E300 του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, η οποία μετρά και απεικονίζει την εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στον επιλεγμένο χώρο (Εικόνα 2.1.1.10). Το γεγονός ότι η ακτινοβολία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της επιφάνεια αντικειμένου επιτρέπει στην κάμερα να υπολογίσει και να εμφανίσει τη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η συγκεκριμένη κάμερα διαθέτει έναν δείκτη λέιζερ, έγχρωμη LCD οθόνη 2.5", φακό ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας, αποσπώμενη μπαταρία και άλλα αξεσουάρ που καθιστούν τη χρήση της αρκετά απλή [61]. Η κάμερα βαθμονομείται χρησιμοποιώντας πηγές ακτινοβολίας που είναι ανιχνεύσιμες στα Εθνικά Πρότυπα στο Σουηδικό Εθνικό Ινστιτούτο Δοκιμών και Ερευνών [62] ή στο NIST, Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας, (ΗΠΑ) [63].



Εικόνα 2.1.1.10: Η θερμική κάμερα FLIR Thermacam E300 (Πηγή: www.elektrorevizebrno.cz)

2.1.3 Λογισμικό

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του τρισδιάστατου μοντέλου είναι το Onshape Cad Creator [64] της εταιρίας Onshape. Αποτελεί εφαρμογή βασισμένη σε cloud, σχεδιασμένη έτσι ώστε να προσφέρει ένα φιλικό ως προς τη χρήση περιβάλλον. Σύμφωνα με την εταιρία, έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιταχύνει την διαδικασία παραγωγής προϊόντων, προσφέροντας πληθώρα δυνατοτήτων, καθώς και πρόσβαση από κινητές συσκευές. Επιλέχθηκε βάσει της ευκολίας που προσφέρει στο σχεδιασμό τρισδιάστατων μοντέλων από αρχάριους χρήστες, της ασφάλειας που παρέχει στην προστασία προσωπικών δεδομένων όπως και το μηδενικό κόστος χρήσης των βασικών εργαλείων.

Για την ολοκλήρωση της εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό το οποίο συνοδεύει τον 3D εκτυπωτή FlashForge Creator 3, το Flashprint [50]. Οι επιλογές που παρέχονται εντός του συγκεκριμένου προγράμματος είναι η τμηματοποίηση του ψηφιακού μοντέλου, η αυτόματη τοποθέτηση στηριγμάτων εκτύπωσης, καθώς και ο προγραμματισμός της διαδικασίας εκτύπωσης με βάση τις προτιμήσεις του χρήστη.

Για την ζωντανή αναμετάδοση εικόνας μικροσκοπίου καθώς και για την καταγραφή στιγμιότυπων από αυτή, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό που συνοδεύει την ψηφιακή κάμερα DFC 420 της εταιρείας Leica, το Leica Application Suite [65].

Το λογισμικό ThermaCAM χρησιμοποιήθηκε στη λήψη των εικόνων από τη μνήμη της θερμοκάμερας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Παρέχει επίσης, τη δυνατότητα απομακρυσμένης σύνδεσης με την κάμερα υπερύθρων. Μπορεί να θεωρηθεί ως απλή γεννήτρια αναφορών σε μια ροή εργασίας επιθεώρησης υπερύθρων που ξεκινά με τη λήψη των εικόνων. Μπορεί, επίσης, να θεωρηθεί ως σημείο σύνδεσης μεταξύ των υπέρυθρων εικόνων και τον προηγούμενων αναφορών υπερύθρων, με τη χρήση του εργαλείου ThermaCam Reporter 7.0 [66].

2.2 Μέθοδος

2.2.1 Σχεδιασμός Μάσκας Προσώπου

Για να παρέχει αποτελεσματική προστασία, οποιαδήποτε συσκευή αναπνευστικής προστασίας (RPD) πρέπει να εφαρμόζει ακριβώς στο πρόσωπο του χρήστη. Μελέτες δείχνουν ότι διαρροές γύρω από τη μάσκα λόγω ανεπαρκούς εφαρμογής στο πρόσωπο αποτελούν και τον κυριότερο παράγοντα ελλιπούς προστασίας προς το χρήστη [60].

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, προκειμένου να αποδειχθεί η καταλληλότητα ενός συγκεκριμένου τύπου RPD για κάθε χρήστη, πρέπει να πραγματοποιηθεί δοκιμή προσαρμογής. Παρά το γεγονός ότι οι δοκιμές αυτές δεν εξασφαλίζουν την σωστή καθημερινή χρήση, σίγουρα εξασφαλίζουν τη σωστή εφαρμογή της μάσκας στο πρόσωπο του χρήστη. Ωστόσο, θα υπάρχουν πάντα μερικά άτομα που δεν μπορεί να επιτύχει την επαρκή εφαρμογή με κάποιο συγκεκριμένο RPD. Παρ' όλα αυτά, η διαδικασία ελέγχου εφαρμογής μπορεί να παρέχει μια τυποποιημένη προσέγγιση για τον προσδιορισμό οποιουδήποτε εργατικού δυναμικού για το οποίο η συγκεκριμένη συσκευή είναι κατάλληλη, σύμφωνα και με τις συνθήκες εργασίας του [61].

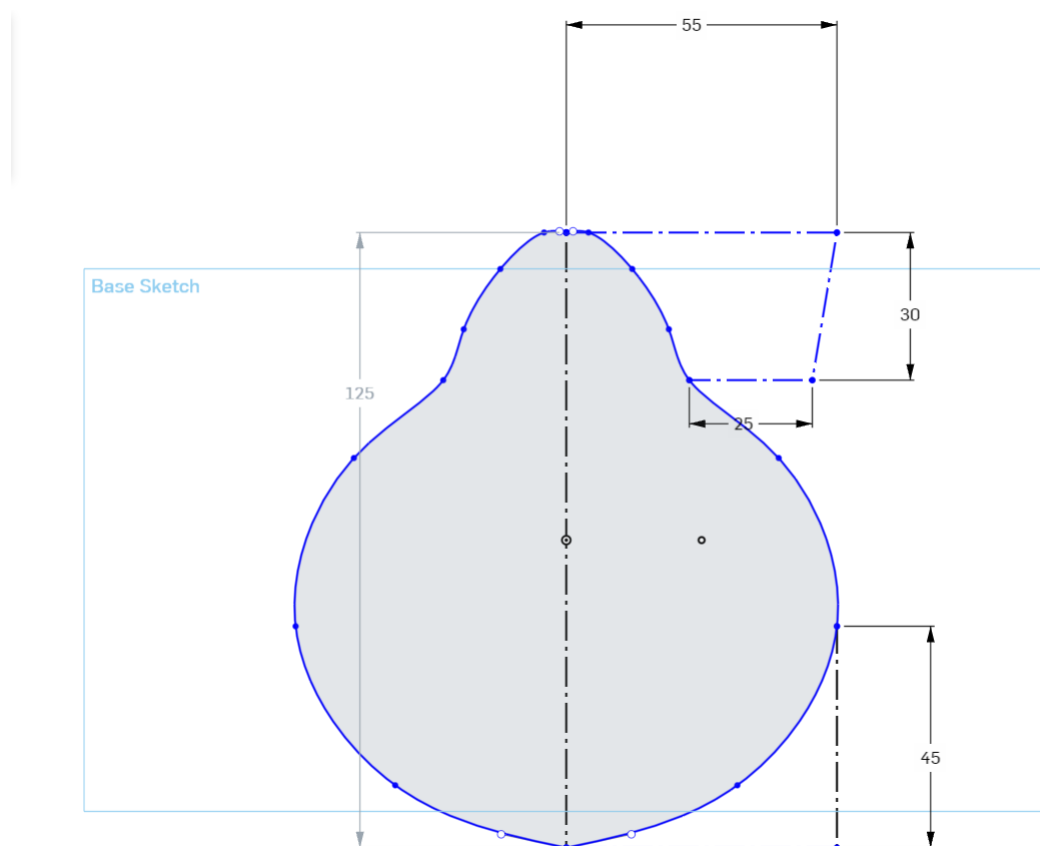
Ορισμένες μελέτες έχουν διερευνήσει τη σχέση μεταξύ της αναπνευστικής ικανότητας και των χαρακτηριστικών του προσώπου εξετάζοντας τα ανθρωπομετρικά δεδομένα ή την ηλικία των δεδομένων [62]. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ 18 διαφορετικών RPD και 12 διαστάσεων του προσώπου και διακρίθηκε μια σειρά στατιστικών ομάδων διαστάσεων προσώπου, οι

οποίες συσχετίστηκαν με την απόδοση του κάθε RPD [63]. Παρά την εμφάνιση αυτών των πρόσθετων μέτρων, οι συγγραφείς υποστήριξαν τη χρήση του μήκους του προσώπου και του πλάτους του προσώπου (σε αντίθεση με το πλάτος του στόματος) ως χαρακτηριστικά αναφοράς για το σχεδιασμό μίας μάσκας προσώπου.

Τα τελικά χαρακτηριστικά, ωστόσο, που λαμβάνονται υπόψη από τους κατασκευαστές για το σχεδιασμό συσκευών αναπνευστικής προστασίας είναι τελικώς στη δική τους ευχέρεια [64].

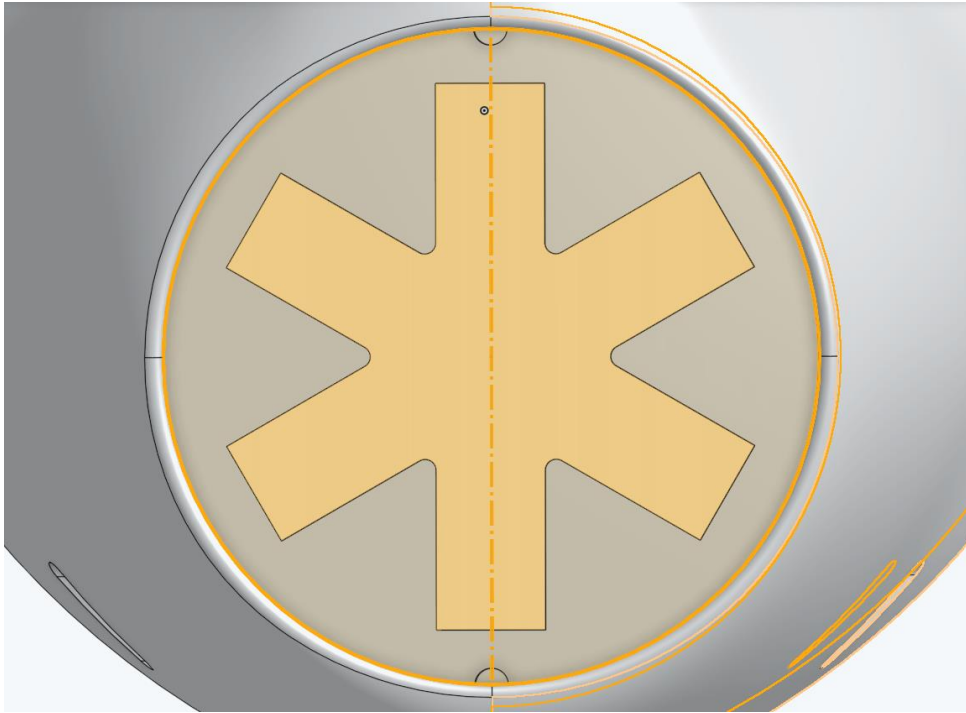
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι διαστάσεις της μάσκας προσώπου ορίστηκαν με βάση τις διαστάσεις της Stopgar, το σχέδιο της οποίας έχει λάβει έγκριση για μαζική παραγωγή και κλινική χρήση [48].

Αρχικά, στην εφαρμογή Onshape σχεδιάστηκε η επιφάνεια της βάσης της μάσκας προσώπου, το τμήμα που εφάπτεται στο πρόσωπο (Εικόνα 2.1.3.1).



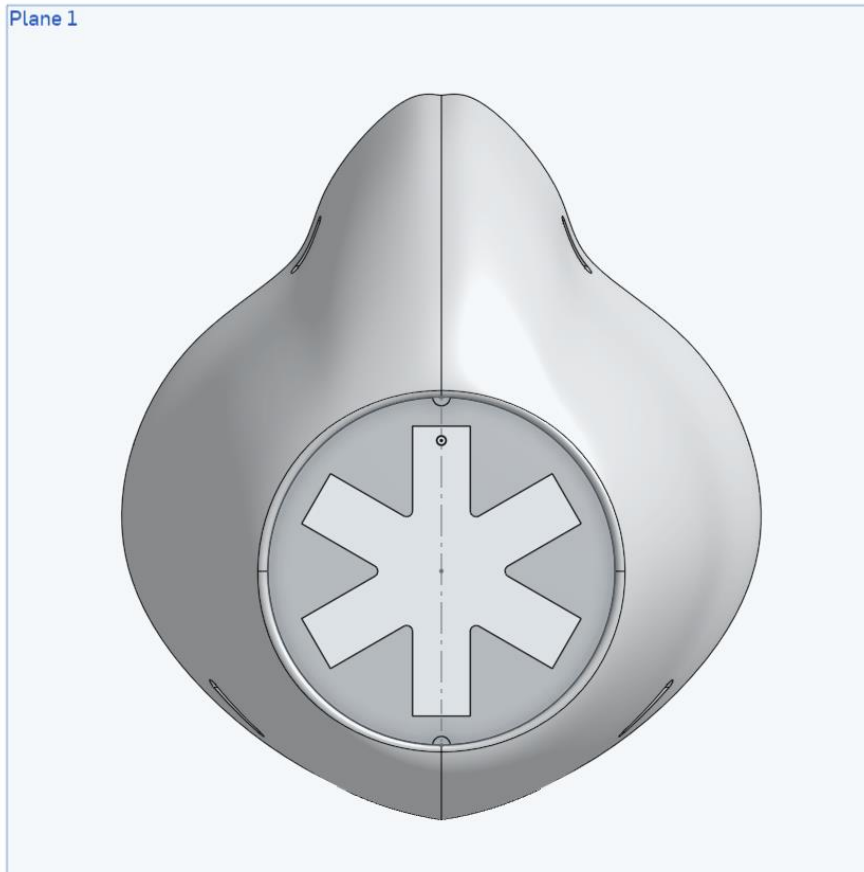
Εικόνα 2.1.3.1: Διαστάσεις επιφάνειας βάσης της μάσκας προσώπου (Πηγή: www.onshape.com)

Έπειτα, σχεδιάστηκε η όψη υποδοχής του φίλτρου με διάμετρο 60 χιλιοστών. Επιλέχθηκε το εξής σχέδιο ώστε να συγκρατείται επαρκώς το εκάστοτε φίλτρο, διατηρώντας παράλληλα τη δομή του (Εικόνα 2.1.3.2).



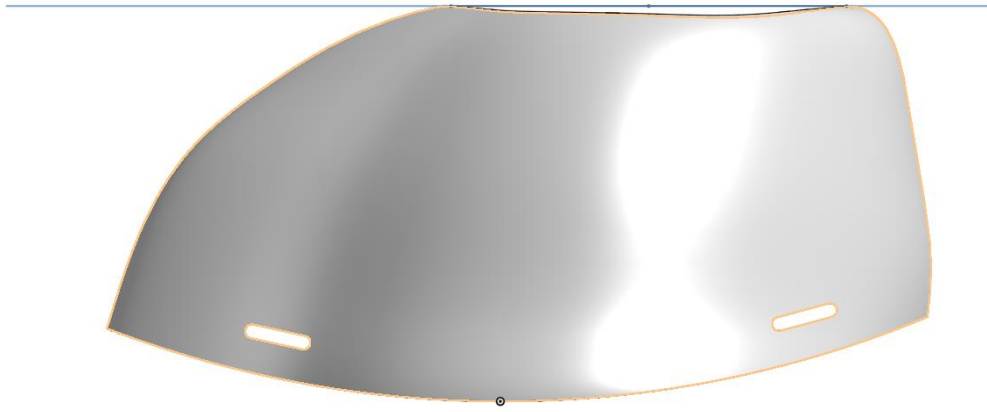
Εικόνα 2.1.3.2: Άνω όψη υποδοχής φίλτρου (Πηγή: www.onshape.com)

Επόμενο βήμα είναι η ένωση της βάσης με την κορυφή με υλικό. Το πάχος του υλικού επιλέχθηκε στα 2 χιλιοστά, έτσι ώστε η μάσκα προσώπου να είναι συμπαγής, αλλά και με μία μικρή ελαστικότητα για καλύτερη εφαρμογή (Εικόνα 2.1.3.3).



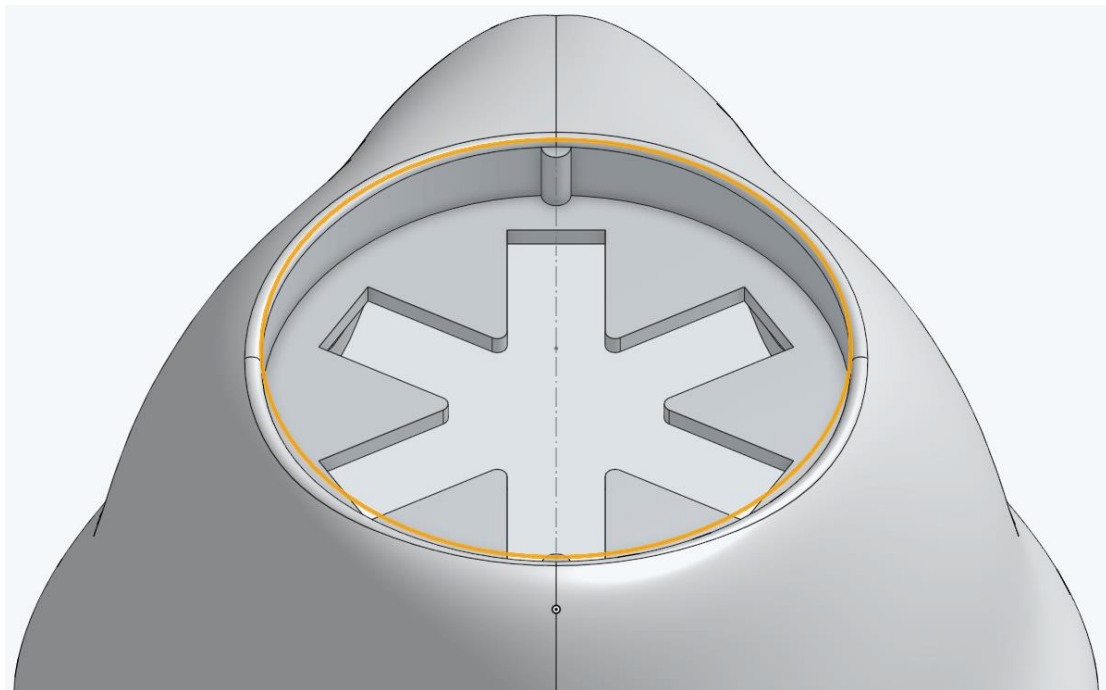
Εικόνα 2.1.3.3: Άνω όψη μάσκας προσώπου σε συνδυασμό με την υποδοχή φίλτρου (Πηγή: www.onshape.com)

Επόμενο βήμα μετά τη συγκράτηση των δύο όψεων, είναι ο σχεδιασμός κυρτώσεων για την καλύτερη εφαρμογή της μάσκας στο πρόσωπο αλλά και η δημιουργία μικρών συμμετρικών κενών στην πλάγια όψη της μάσκας. Αυτά τα κενά προορίζονται για την υποδοχή ελαστικών ή υφασμάτινων στηριγμάτων για την συγκράτηση της μάσκας στην επιφάνεια του προσώπου (Εικόνα 2.1.3.4).



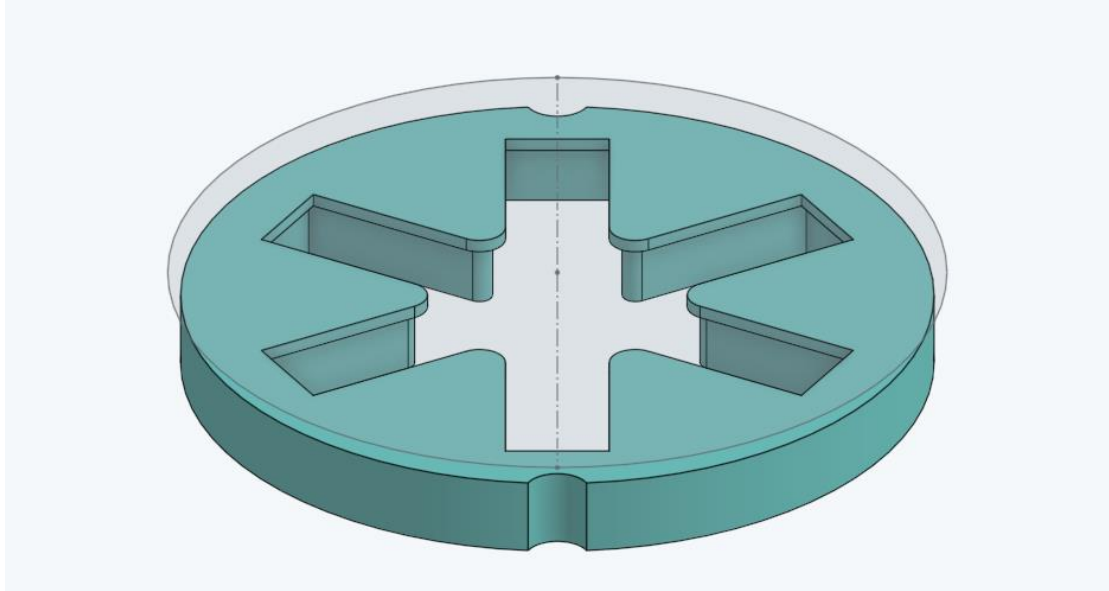
Εικόνα 2.1.3.4: Πλάγια όψη μάσκας προσώπου (Πηγή: www.onshape.com)

Τελικό στάδιο του σχεδιασμού του μοντέλου αποτελεί η δημιουργία του καλύμματος, το οποίο εφαρμόζει στην άνω όψη της μάσκας όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.1.3.5).



Εικόνα 2.1.3.5: Τελικό σχέδιο υποδοχής φίλτρου (Πηγή: www.onshape.com)

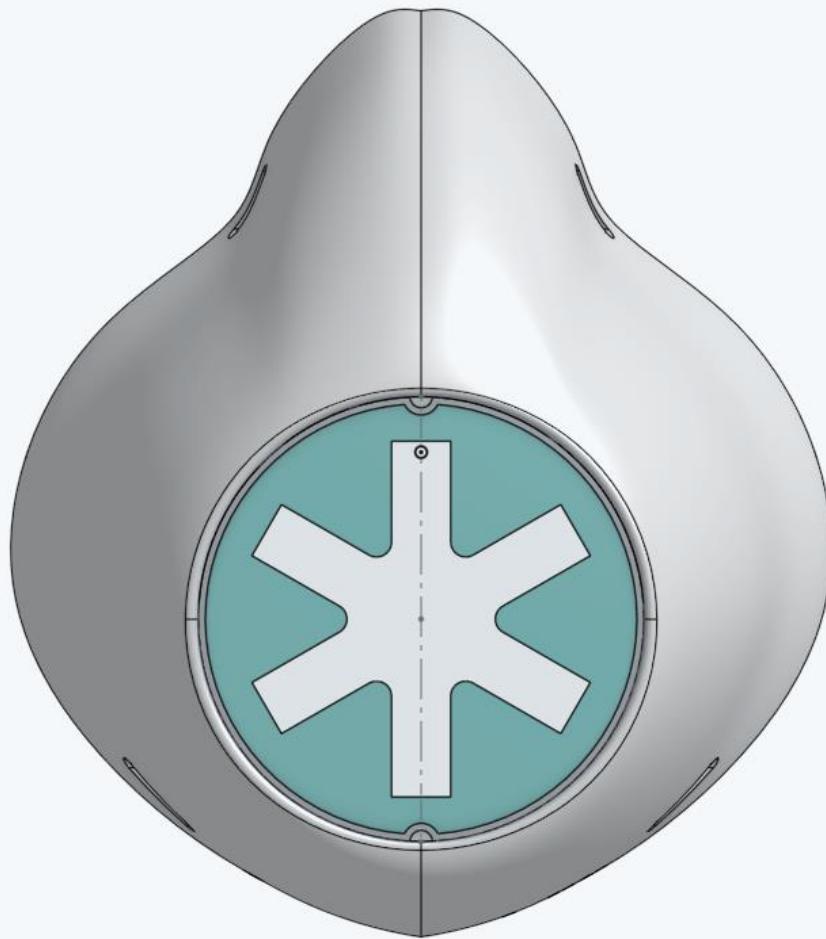
Η διάμετρος του καλύμματος διαφέρει κατά ένα χιλιοστό από τη διάμετρο υποδοχής του φίλτρου, έτσι ώστε να εφαρμόζει σωστά όσο θα υπάρχει κάποιο φίλτρο σε αυτή (Εικόνα 2.1.3.6).



Εικόνα 2.1.3.6: Τελικό σχέδιο καλύμματος συγκράτησης φίλτρου (Πηγή: www.onshape.com)

Το τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου της μάσκας προσώπου σε συνδυασμό με το κάλυμμα του φίλτρου παρουσιάζεται στην (Εικόνα 2.1.3.7).

Plane 1

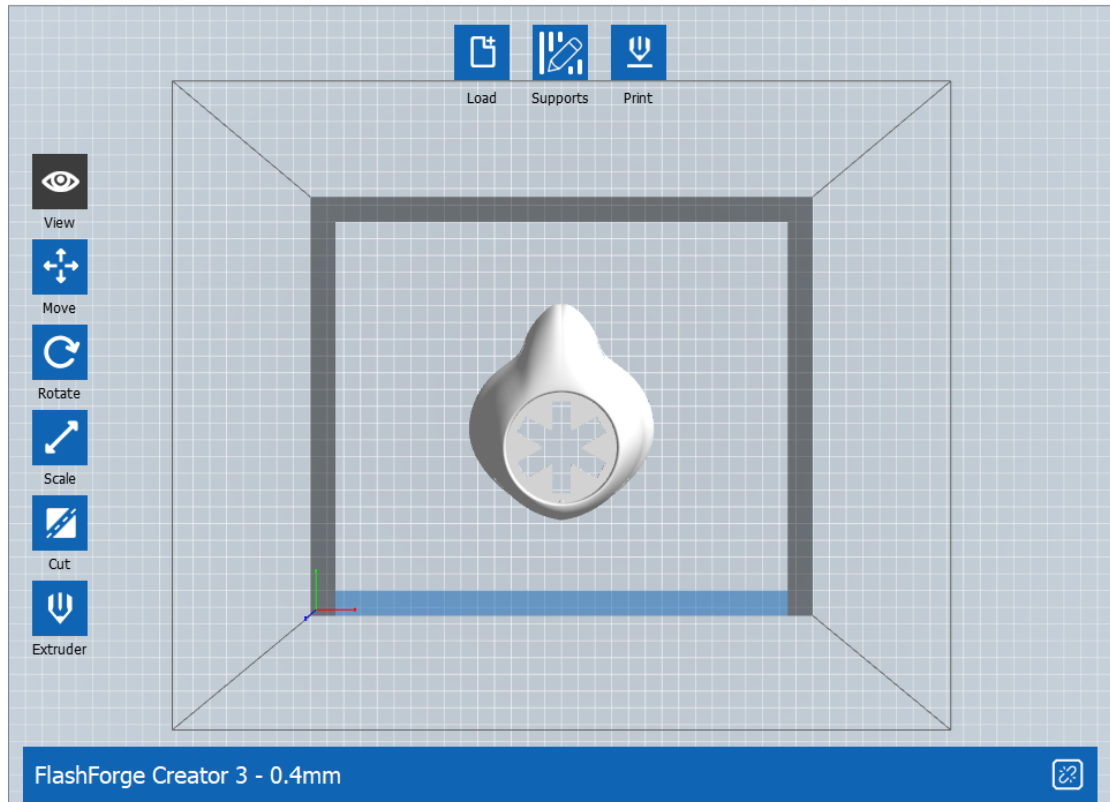


Εικόνα 2.1.3.7: Ψηφιακό μοντέλο μάσκας προσώπου σε συνδυασμό με το κάλυμμα φίλτρου (Πηγή: www.onshape.com)

2.2.2 Προετοιμασία Εκτύπωσης

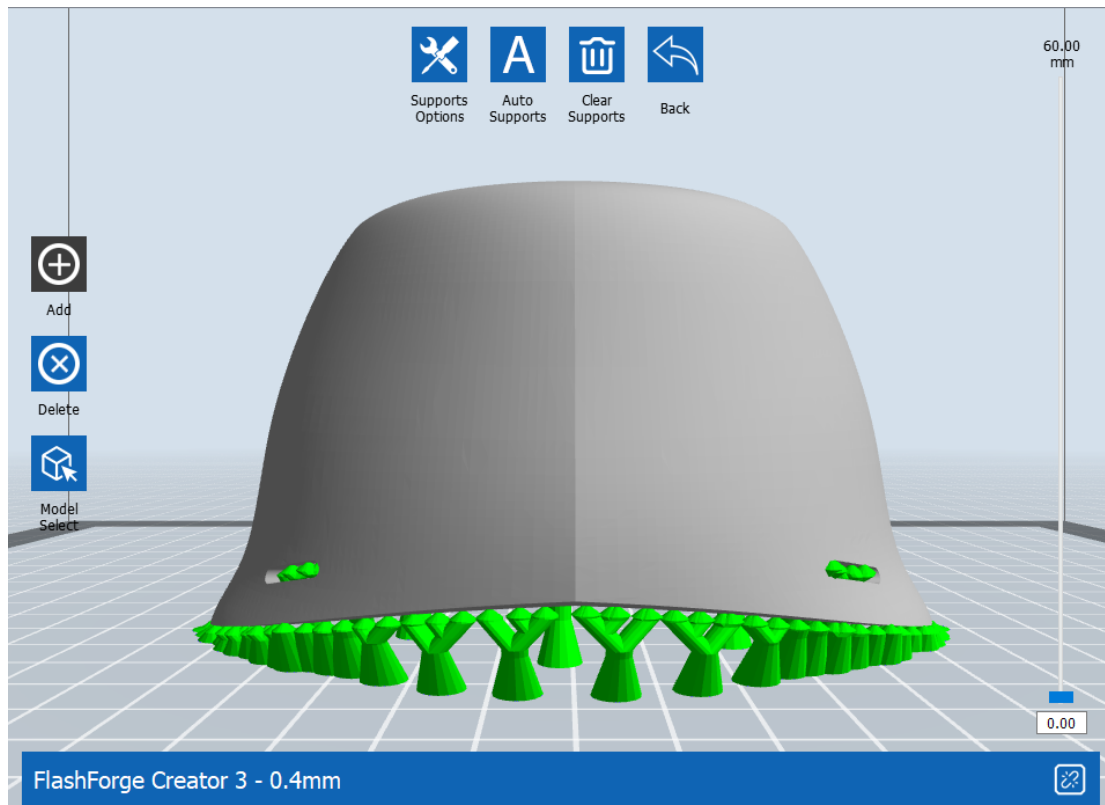
Επόμενο βήμα μετά το σχεδιασμό του ψηφιακού μοντέλου, αποτελεί η τμηματοποίηση και ο καθορισμός των παραμέτρων εκτύπωσης. Αυτά επιτεύχθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Flashprint [58] που συνοδεύει τον εκτυπωτή Flashforge Creator 3.

Μετά τη φόρτωση του ψηφιακού μοντέλου στο Flashprint (Load) εμφανίζονται οι επιλογές Supports και Print στο περιβάλλον του προγράμματος (Εικόνα 2.2.2.1).

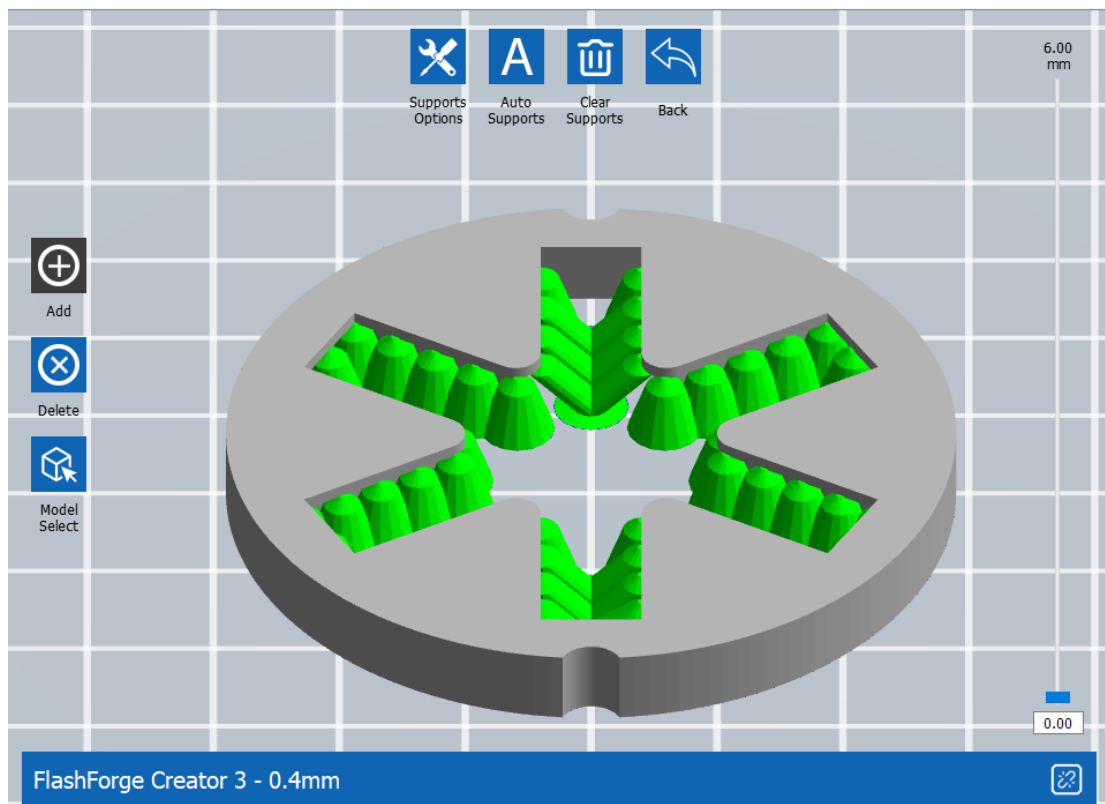


Εικόνα 2.2.2.1: Περιβάλλον του λογισμικού Flashprint (Πηγή: Flashprint)

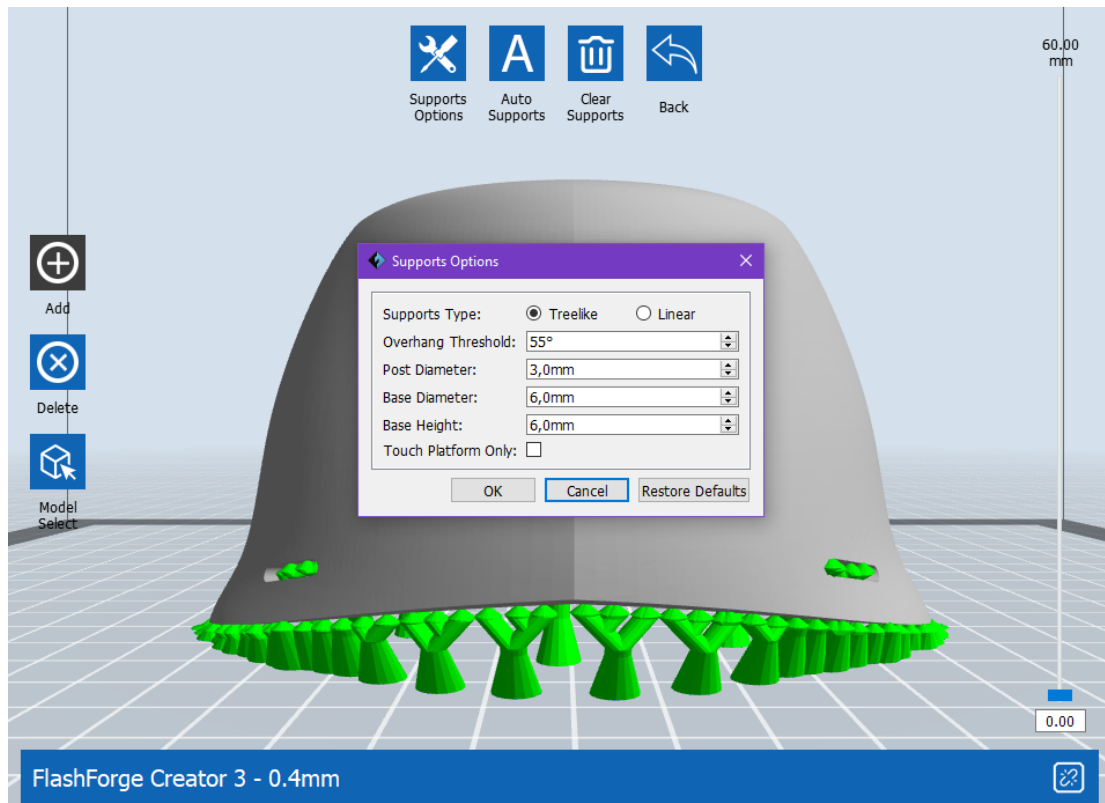
Αρχικά, επιλέχθηκε η επιλογή Supports και έπειτα Auto Supports. Κατά τη διεργασία αυτή, το λογισμικό αυτόματα υπολογίζει και τοποθετεί στο ψηφιακό μοντέλο στηρίγματα, που θα οδηγήσουν τον εκτυπωτή στην ομαλή εκτύπωση του, χωρίς κενά (Εικόνες 2.2.2.2, 2.2.2.3). Αυτά τα στηρίγματα αποτελούνται από το ίδιο υλικό εκτύπωσης (PLA), ενώ τελικώς προορίζονται για την χειροκίνητη αφαίρεση τους όταν τελειώσει η διαδικασία εκτύπωσης. Ρυθμίστηκε η δημιουργία τους σε μορφή δέντρου (Treelike), κάτι που ωφελεί στη κατανάλωση λιγότερου υλικού και γρηγορότερης συνολικής διαδικασίας εκτύπωσης, σε σύγκριση με τα στηρίγματα γραμμικού τύπου (Linear). Η διάμετρος τους στη βάση του σχεδίου ρυθμίστηκε στα 6mm ενώ στα σημεία όπου εφάπτονται με το αρχικό ψηφιακό σχέδιο ρυθμίστηκε στα 3mm (Εικόνα 2.2.2.4). Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη της εύκολης αφαίρεσής τους ακόμα και με το χέρι.



Εικόνα 2.2.2.2: Αυτόματη τοποθέτηση στηριγμάτων από το λογισμικό στο σώμα της μάσκας προσώπου (Πηγή: Flashprint)



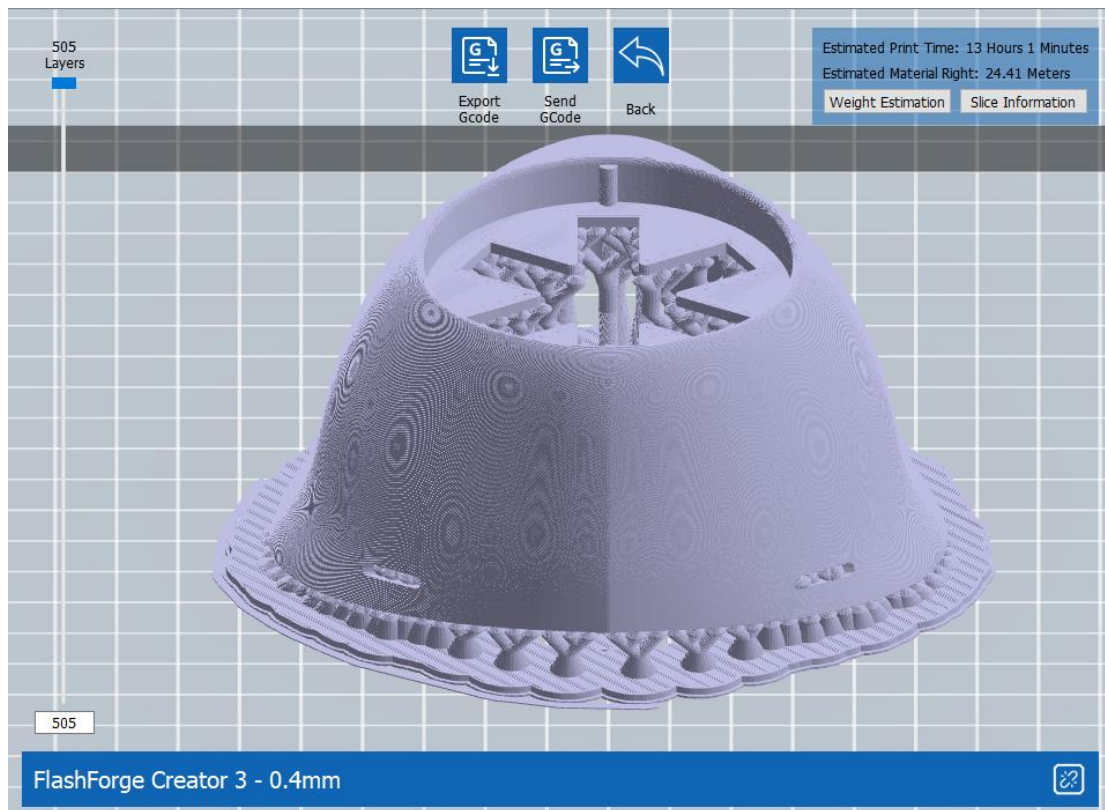
Εικόνα 2.2.2.3: Αυτόματη τοποθέτηση στηριγμάτων από το λογισμικό στο κάλυμμα φίλτρου της μάσκας προσώπου (Πηγή: Flashprint)



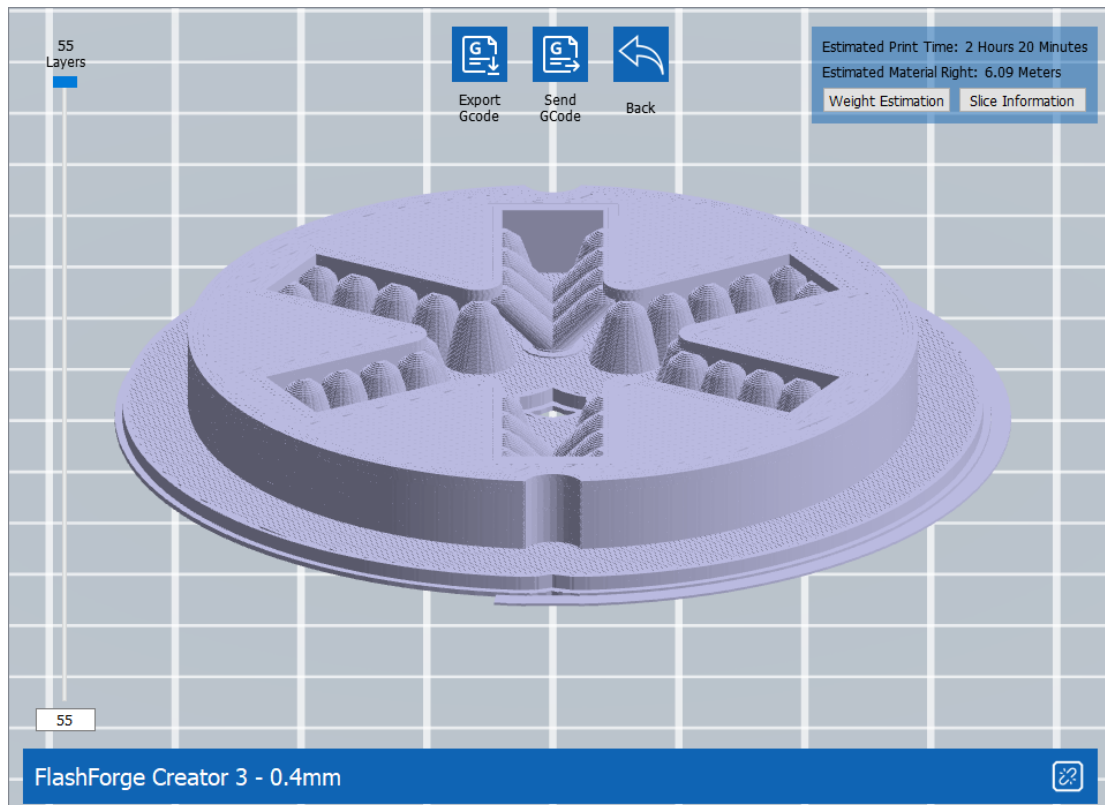
Εικόνα 2.2.2.4: Επιλογή παραμέτρων αυτόματων στηριγμάτων (Πηγή: Flashprint)

Αφού έχουν τοποθετηθεί τα στηρίγματα, επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των παραμέτρων εκτύπωσης, οι εντολές δηλαδή που θα δοθούν στον εκτυπωτή ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στο μενού Print, γίνεται επιλογή του υλικού εκτύπωσης (PLA) όπως και το ύψος τοποθέτησης στρώσεων. Τέθηκε στα 0.12mm, κάτι που θα προσφέρει υψηλή ανάλυση στο εκτυπωμένο μοντέλο χωρίς να συμπιέζονται οι στρώσεις υλικού όσο εκείνο θα προστίθεται κατά την εκτύπωση από την κεφαλή. Η πυκνότητα εναποτιθέμενου υλικού τέθηκε στο 100% για να επιτευχθεί ένα συμπαγές αποτέλεσμα χωρίς τυχόν κενά, ενώ η πορεία της κεφαλής καθορίστηκε σε γραμμική. Η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής κατά την εναπόθεση υλικού τέθηκε στα 50mm/s ενώ κατά την μετακίνηση της κεφαλής χωρίς εναπόθεση υλικού στα 150mm/s. Η θερμοκρασία της κεφαλής καθορίστηκε στους 210°C, μια θερμοκρασία κατά την οποία το συγκεκριμένο υλικό διατηρεί την ελαστικότητά του, παραμένοντας συμπαγές [65]. Η θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης ορίστηκε στους 50°C έτσι ώστε να επιτευχθεί η προσκόλληση του εναποτιθέμενου υλικού σε αυτή, χωρίς επίσης να εμφανίζει παραμορφώσεις λόγω απότομων συστολών από μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας. Επικυρώνοντας τις παραπάνω ρυθμίσεις και για τα δύο τμήματα που αποτελούν τη μάσκα προσώπου, το λογισμικό προχωρά στην τμηματοποίηση (Slicing) των μοντέλων. Ουσιαστικά, τα χωρίζει σε 'φέτες', με κάθε μια από αυτές να καθορίζει την πορεία που θα ακολουθήσει η κεφαλή καθώς θα εναποθέτει υλικό. Παράλληλα, βάσει των παραπάνω ρυθμίσεων, υπολογίζεται από το λογισμικό το μήκος νήματος που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εκτύπωση, όπως και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωσή του. Στην προκειμένη περίπτωση, το σώμα της μάσκας χωρίστηκε σε 505 στρώσεις υλικού και το κάλυμμα του φίλτρου σε 55 στρώσεις. Για το σώμα της μάσκας προσώπου θα χρειαστούν 13 ώρες και 1 λεπτό ενώ το μήκος νήματος που θα χρησιμοποιηθεί φτάνει τα 24.41 μέτρα. Αντίστοιχα, για

το κάλυμμα του φίλτρου θα χρειαστούν 2 ώρες και 20 λεπτά και 6.09 μέτρα νήματος PLA (Εικόνες 2.2.2.5, 2.2.2.6).



Εικόνα 2.2.2.5: Slicing και υπολογισμός χρόνου εκτύπωσης και υλικού για το μοντέλο του σώματος μάσκας προσώπου (Πηγή: Flashprint)

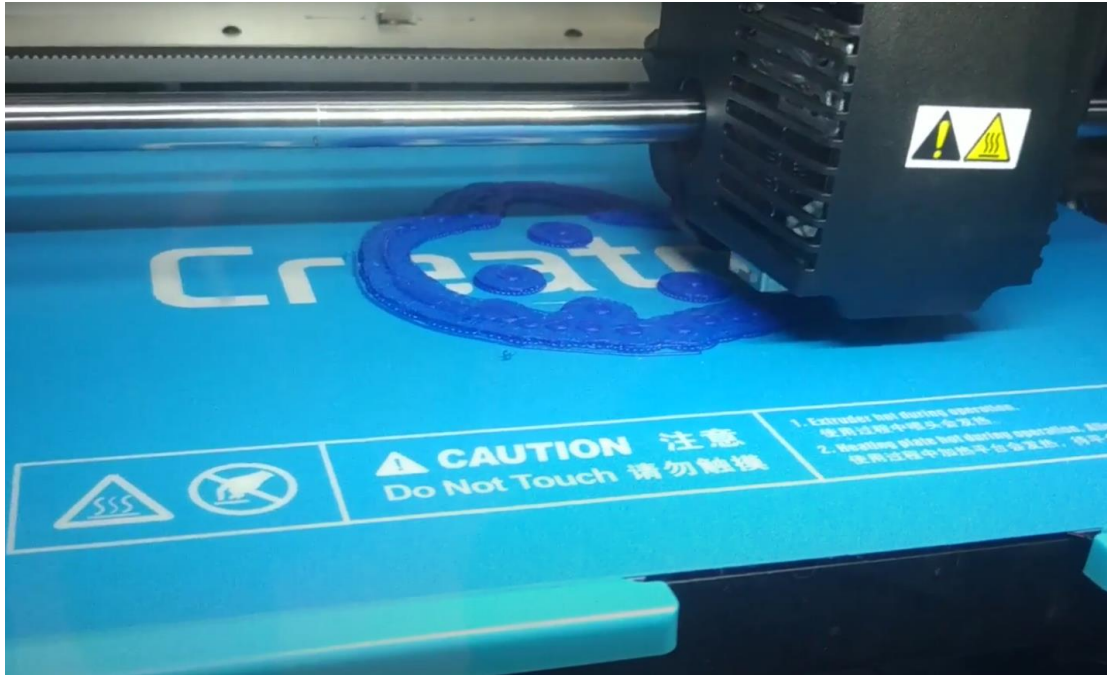


Εικόνα 2.2.2.6: Slicing και υπολογισμός χρόνου εκτύπωσης και υλικού για το μοντέλο του καλύμματος φίλτρου μάσκας προσώπου (Πηγή: Flashprint)

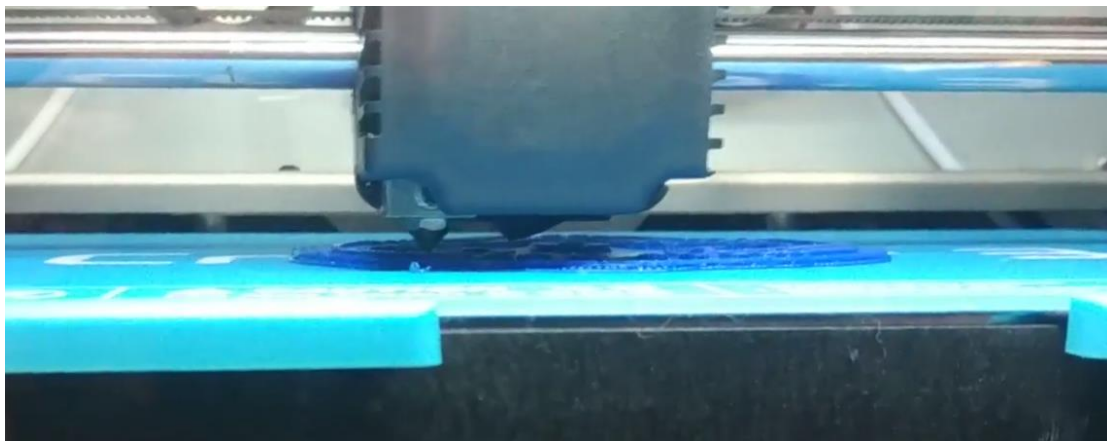
Συνολικά, χρειάστηκαν 13 ώρες και 21 λεπτά λειτουργίας του 3D εκτυπωτή και 30,5 μέτρα νήματος PLA για την υλοποίηση της μάσκας προσώπου και του καλύμματος φίλτρου που την συνοδεύει.

2.2.3 Εκτύπωση

Έχοντας καθορίσει όλες τις παραμέτρους εκτύπωσης, το ψηφιακό σχέδιο είναι πλέον έτοιμο για εκτύπωση. Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή, αποστέλλεται το τελικό ψηφιακό μοντέλο όπως και οι ρυθμίσεις εκτύπωσης στον εκτυπωτή. Έπειτα, η κεφαλή που επιλέχθηκε για την εκτύπωση ξεκινά την διαδικασία θέρμανσης, όπως και η τράπεζα εκτύπωσης. Η διαδικασία αυτή απαιτεί περίπου 2 με 3 λεπτά, μετά τα οποία ο εκτυπωτής ξεκινά την εκτύπωση. Στις Εικόνες 2.2.3.1, 2.2.3.2, απεικονίζεται η πρόοδος της εκτύπωσης, 20 λεπτά μετά την εκκίνησή της. Σε αυτό το σημείο, ο εκτυπωτής έχει ήδη τοποθετήσει το περίγραμμα της βάσης (τμήμα που εφάπτεται στο πρόσωπο) όπως και τα στηρίγματα υποβοήθησης εκτύπωσης (κεντρικά κυκλικά αντικείμενα). Κατά προσέγγιση, σε αυτό το διάστημα έχουν τυπωθεί 10 στρώσεις υλικού.



Εικόνα 2.2.3.1: Πρόοδος εκτύπωσης σε διάστημα 20 λεπτών (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



Εικόνα 2.2.3.2: Πρόοδος εκτύπωσης σε διάστημα 20 λεπτών (πλάγια όψη) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

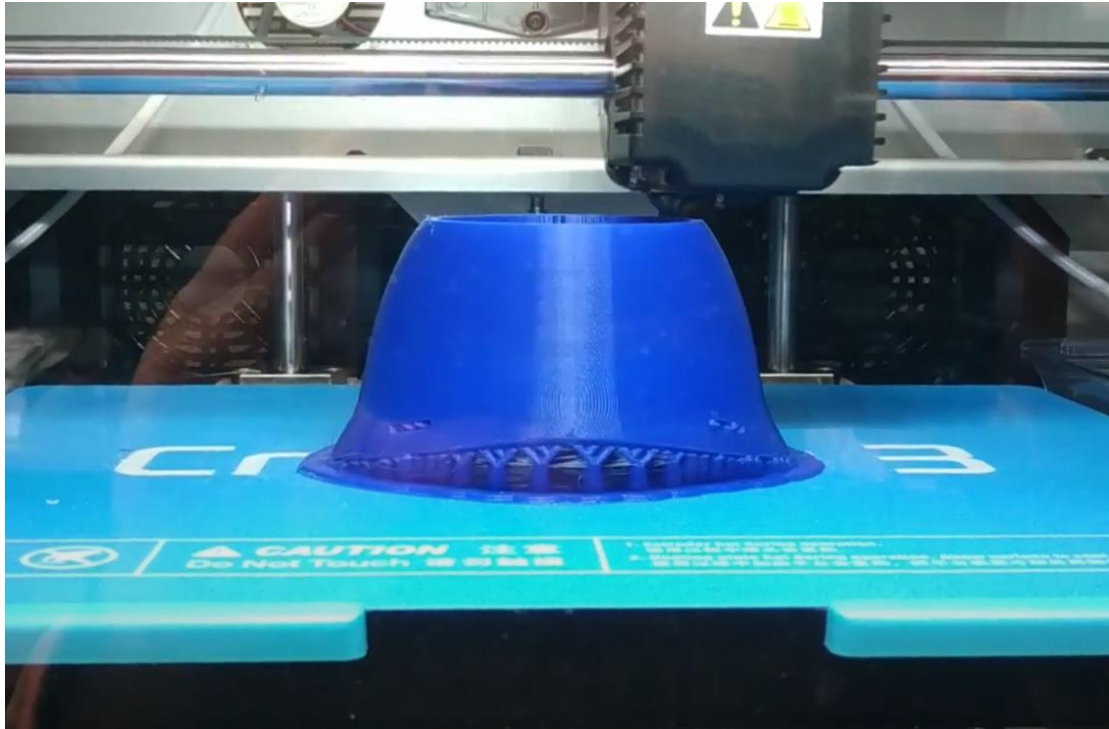
Η πρόοδος της εκτύπωσης 12 λεπτά πριν το τέλος της διαδικασίας (Εικόνα 2.2.3.3) εμφανίζεται στις Εικόνες 2.2.3.4 και 2.2.3.5. Η μάσκα προσώπου σε αυτό το σημείο έχει λάβει μορφή, όμοια με του ψηφιακού μοντέλου.



Εικόνα 2.2.3.3: Ενδείξεις από την οθόνη του εκτυπωτή σε πραγματικό χρόνο (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



Εικόνα 2.2.3.4: Πρόοδος της εκτύπωσης 12 λεπτά πριν το τέλος (άνω-πλάγια όψη) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



Εικόνα 2.2.3.4: Πρόοδος της εκτύπωσης 12 λεπτά πριν το τέλος (πλάγια όψη) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

Το τελικό αποτέλεσμα από την εκτύπωση των δύο μοντέλων μετά και την αφαίρεση των στηριγμάτων εμφανίζεται στις Εικόνες 2.2.3.5 έως 2.2.3.10 που ακολουθούν.



Εικόνα 2.2.3.5: Τελικό αποτέλεσμα εκτύπωσης σώματος μάσκας προσώπου (άνω όψη) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



Εικόνα 2.2.3.6: Τελικό αποτέλεσμα εκτύπωσης σώματος μάσκας προσώπου (πλάγια όψη)



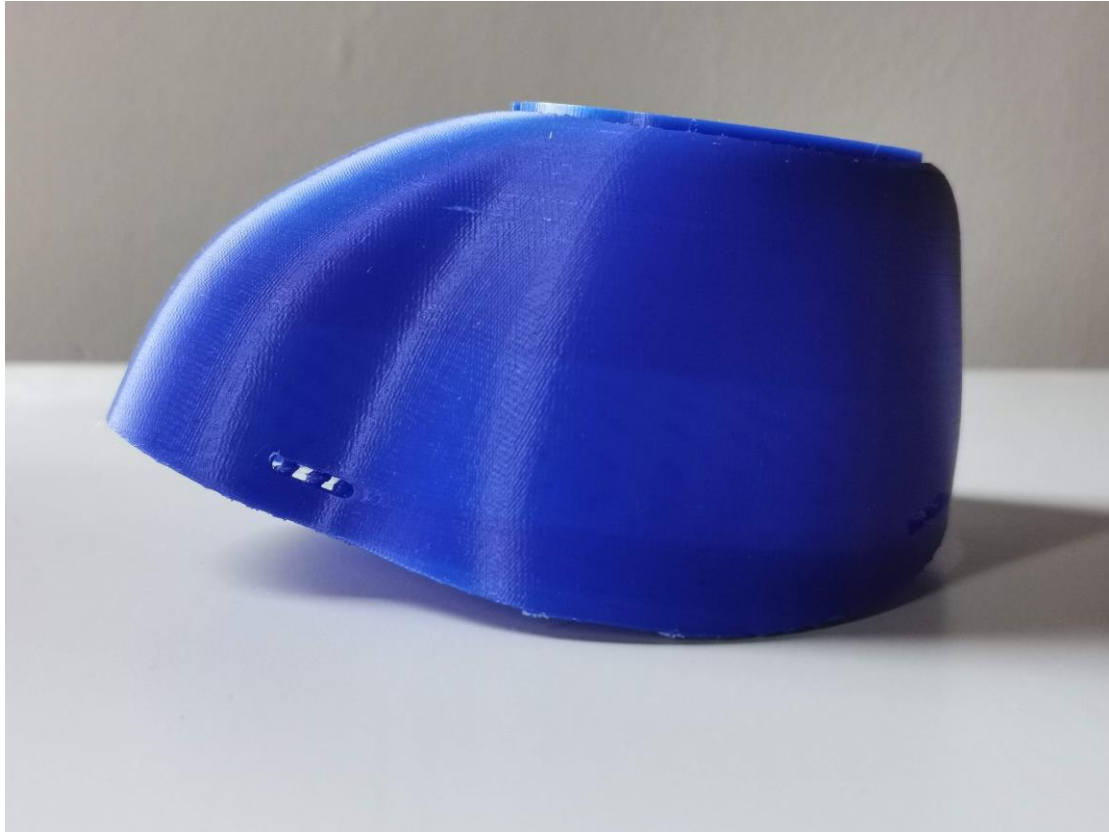
Εικόνα 2.2.3.7: Τελικό αποτέλεσμα εκτύπωσης καλύμματος φίλτρου μάσκας προσώπου (άνω όψη)



Εικόνα 2.2.3.8: Τελικό αποτέλεσμα εκτύπωσης καλύμματος φίλτρου μάσκας προσώπου (πλάγια όψη)

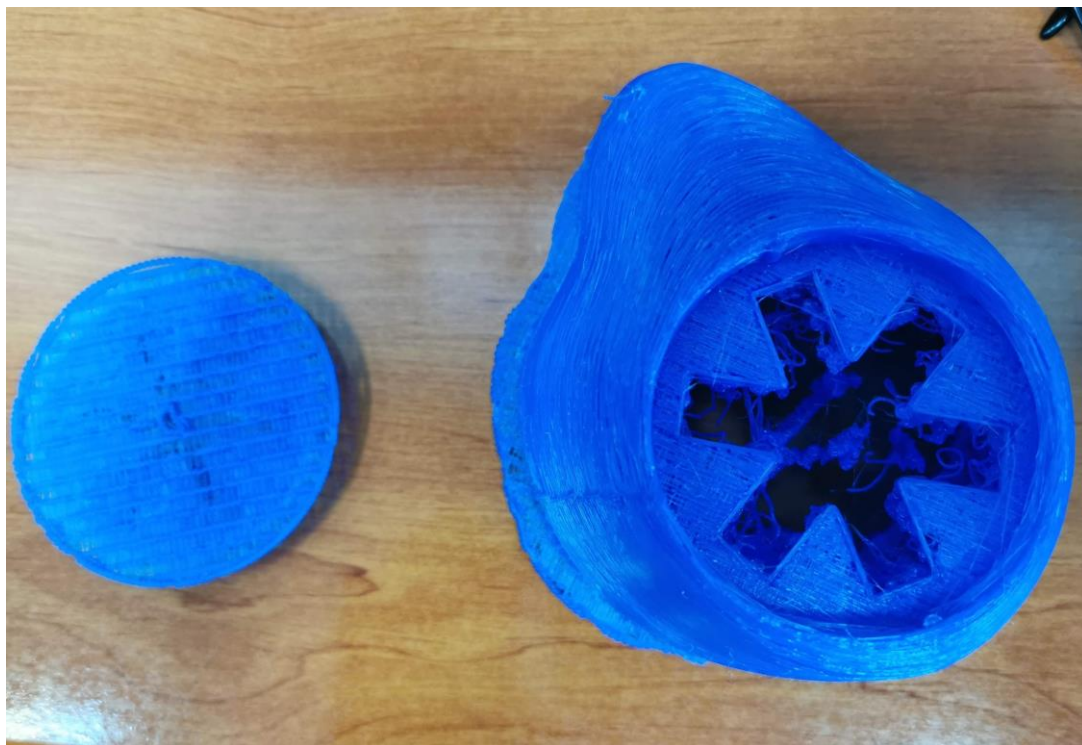


Εικόνα 2.2.3.9: Τελικό αποτέλεσμα εκτύπωσης μάσκας προσώπου με εφαρμοσμένο κάλυμμα φίλτρου (άνω όψη)

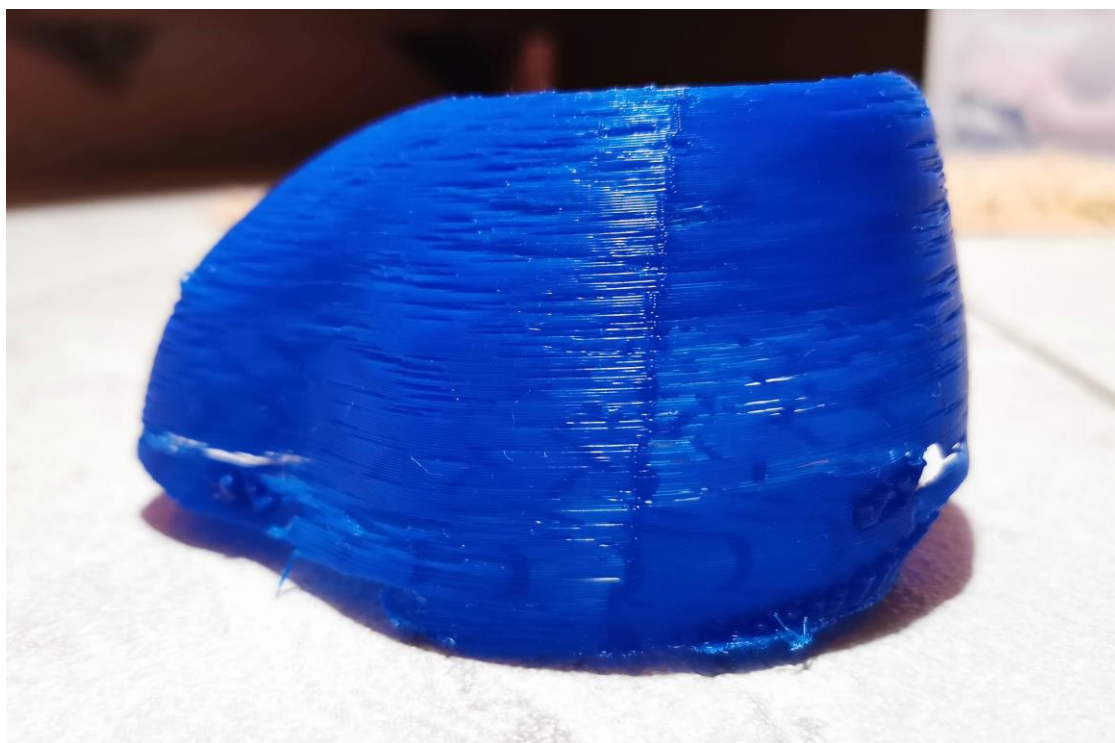


Εικόνα 2.2.3.10: Τελικό αποτέλεσμα εκτύπωσης μάσκας προσώπου με εφαρμοσμένο κάλυμμα φίλτρου (πλάγια όψη)

Τα αποτελέσματα ανταπεξέρχονται πλήρως του αρχικού ψηφιακού μοντέλου, το οποίο και χρησιμοποιείται μετέπειτα για τους πειραματικούς ελέγχους αποδοτικότητας. Πριν τη συγκεκριμένη διαδικασία εκτύπωσης είχε προηγηθεί μία ακόμα, το αποτέλεσμα της οποίας δεν ήταν ικανοποιητικό. Η παραπάνω μάσκα προσώπου απεικονίζεται στις Εικόνες 2.2.3.11, 2.2.3.12.



Εικόνα 2.2.3.11: Μάσκα προσώπου και κάλυμμα φίλτρου με πάχος υλικού 1mm (άνω όψεις)



Εικόνα 2.2.3.12: Μάσκα προσώπου με πάχος υλικού 1mm (πλάγια όψη)

Παρατηρώντας το εκτυπωμένο μοντέλο, μπορεί να διακρίνει κανείς κενά στην επιφάνεια της μάσκας. Κατά συνέπεια δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αφού σκοπός κάθε προστατευτικής μάσκας προσώπου είναι το φιλτράρισμα του εισπνεόμενου και εκπνεόμενου αέρα για την αποφυγή μολύνσεων από και προς τον περιβάλλοντα χώρο

του ατόμου. Για τη διόρθωση του σφάλματος αυτού, το πάχος υλικού της μάσκας καθορίστηκε στα 3mm από τα 1mm. Έτσι εξασφαλίζεται και η στεγανότητα και μια μικρή ελαστικότητα για την καλύτερη εφαρμογή της μάσκας προσώπου στο πρόσωπο του χρήστη.

2.3 Πειραματικός Έλεγχος

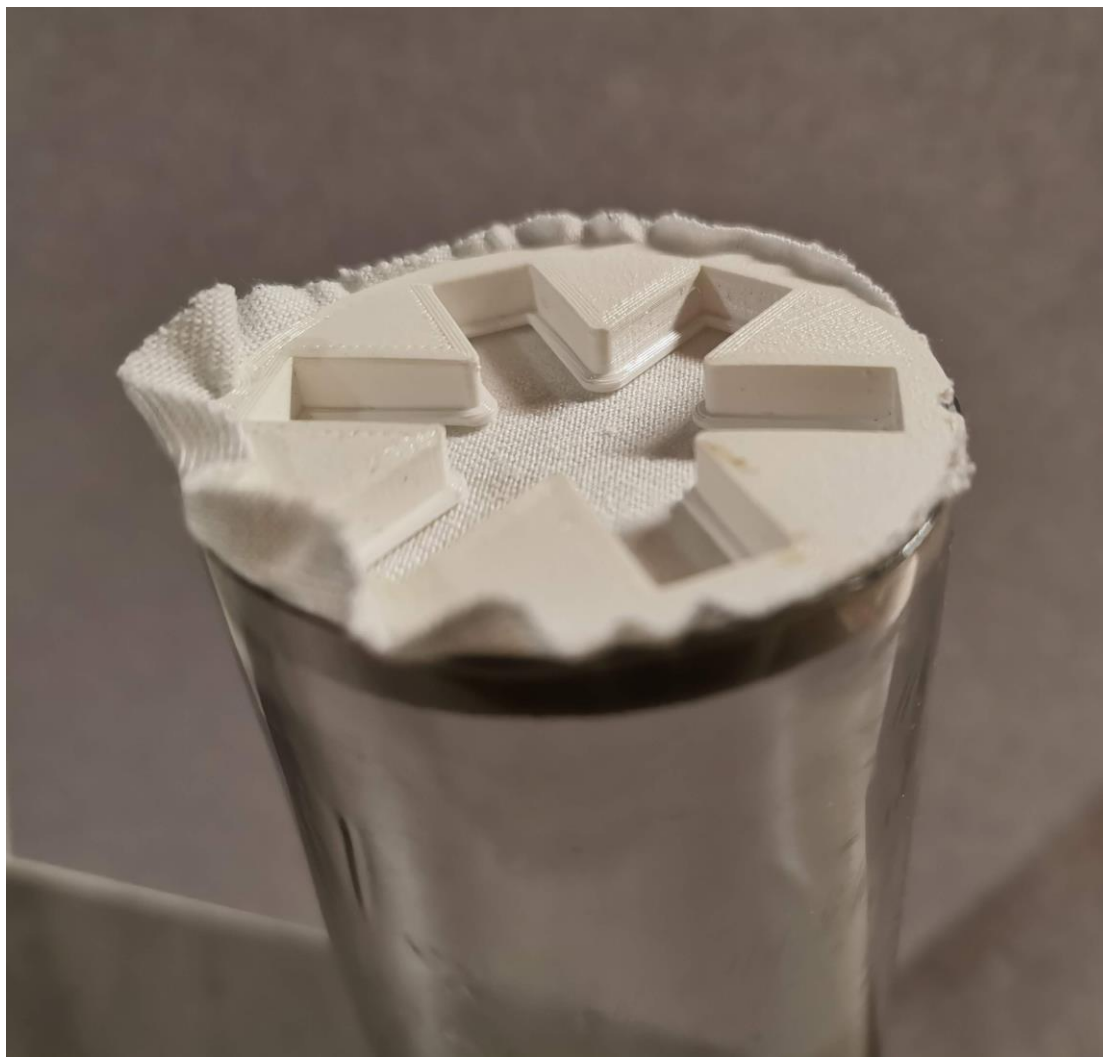
2.3.1 Έλεγχος Αποδοτικότητας Φίλτρων

Για τον συγκεκριμένο έλεγχο, χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά είδη φίλτρων. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν:

- 1) Τμήμα από 100% βαμβάκι,
- 2) Τμήμα από ένδυμα αποτελούμενο από πολυαμίδιο,
- 3) Τμήμα από 100% βαμβάκι διπλής στρώσης,
- 4) Φίλτρο από μάσκα ενεργού άνθρακα (PM2.5) με πιστοποίηση FFP2,
- 5) Φίλτρο από χειρουργική μάσκα non-woven με εσωτερικό φύλλο τήγματος πολυμερών με Ευρωπαϊκή Πιστοποίηση BFE (Bacterial Filtration Efficiency) 98%.

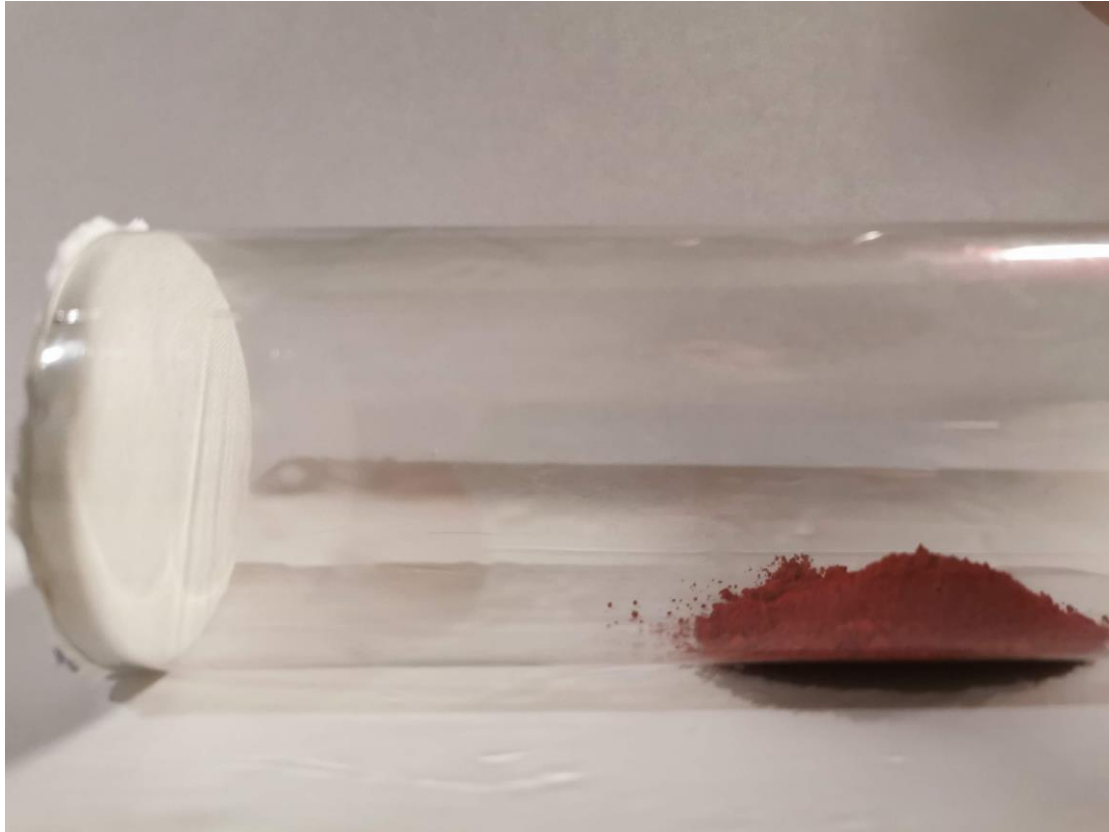
Λαμβάνοντας ως πρότυπο τα σωματίδια του ιού SARS-CoV-2 που έχουν μέγεθος 0.07μm [66] καθώς και τα εκπνεόμενα σταγονίδια που φέρουν τον ιό με μέσο όρο μεγέθους τα 4.7μm [67], επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος η χρήση σκόνης από μελάνι toner κόκκινου χρώματος. Η σκόνη αυτή αποτελείται κατά κύριο λόγο από αιθάλη και συνθετική ρητίνη ενώ το μέγεθος κόκκου κυμαίνεται από 5μm έως και 30μm [68]. Η επιλογή αυτού του υλικού έγινε λόγω του μικρού μεγέθους κόκκου, που θα μπορούσε κατά προσέγγιση να παρομοιαστεί με εκπεμπόμενα σταγονίδια από φορέα του SARS-CoV-2. Παράλληλα, το κόκκινο χρώμα της σκόνης γίνεται εύκολα διακριτό κατά την παρατήρηση με μικροσκόπιο και την μετέπειτα επεξεργασία εικόνας. Για τη διεξαγωγή του ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν 25g σκόνης toner της εταιρείας ASC [69], καθώς και ένας κοινός διαφανής σωλήνας μήκους 30cm και διαμέτρου 6.5cm.

Αρχικά, εφαρμόστηκε το εκάστοτε φίλτρο στην άκρη του σωλήνα, και σταθεροποιήθηκε με τη χρήση του εκτυπωμένου καλύμματος φίλτρου (Εικόνα 2.3.1.1). Με αυτό τον τρόπο προσομοιάζεται η εφαρμογή του φίλτρου στην υποδοχή της μάσκας προσώπου.



Εικόνα 2.3.1.1: Ενδεικτική εφαρμογή του εκάστοτε φίλτρου στον γυάλινο σωλήνα

Έπειτα, τοποθετήθηκαν 5g σκόνης toner εντός του σωλήνα σε απόσταση 6 εκατοστών από το φίλτρο και χρησιμοποιήθηκε ανθρώπινη εκπνοή τριών δευτερολέπτων, αεροστεγώς περιορισμένη προς αυτό (Εικόνα 2.3.1.2). Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε υπό της ίδιες συνθήκες για όλα τα διαθέσιμα είδη φίλτρων.

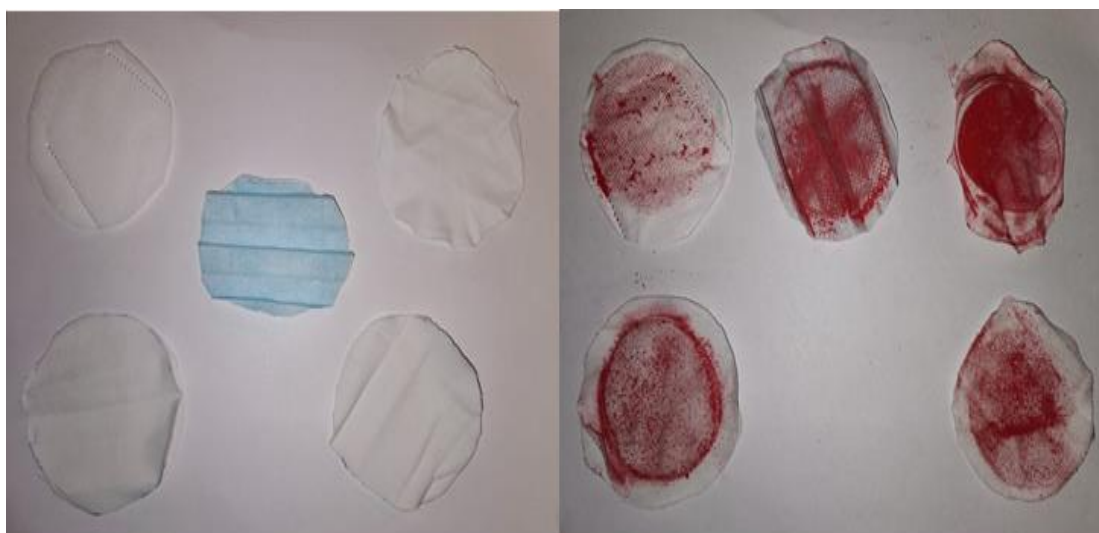


Εικόνα 2.3.1.2: Τοποθέτηση σκόνης toner εντός του γυάλινου σωλήνα (πλάγια όψη)



Εικόνα 2.3.1.2: Τοποθέτηση σκόνης toner εντός του γυάλινου σωλήνα (εσωτερική όψη)

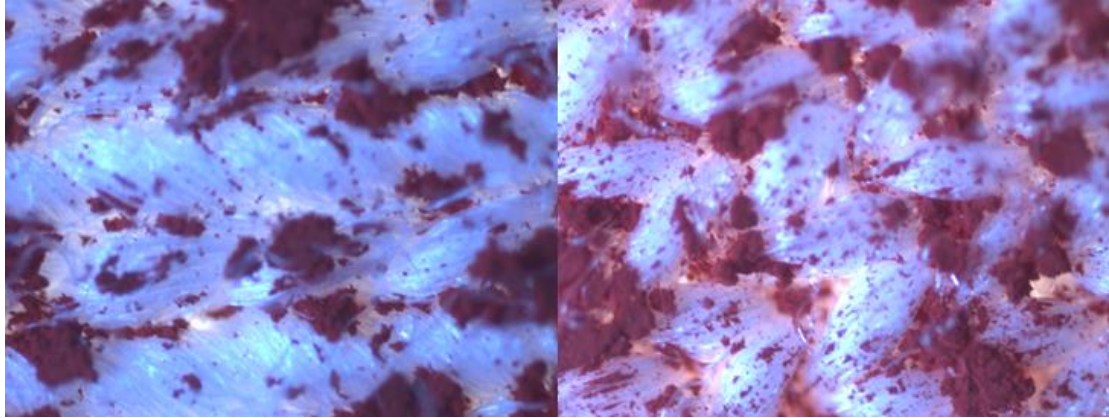
Τα δείγματα πριν και μετά την προώθηση της σκόνης toner απεικονίζονται στην Εικόνα 2.3.1.3.



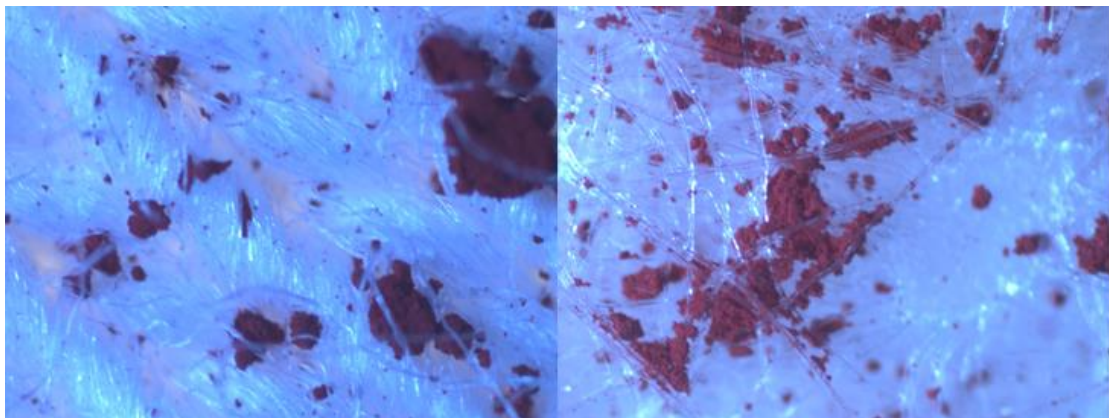
Εικόνα 2.3.1.3: Δείγματα φίλτρων πριν και μετά την εναπόθεση σκόνης toner

Για την ολοκλήρωση του ελέγχου, παρατηρήθηκαν υπό το μικροσκόπιο τα 5 δείγματα στις επιφάνειες που δέχθηκαν τη σκόνη toner και στις επιφάνειες από τις οποίες την απέβαλαν.

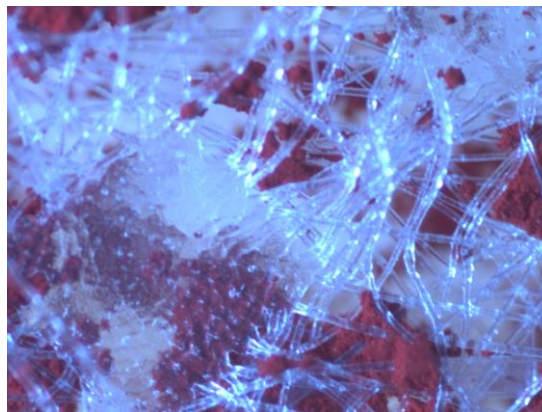
Οι εικόνες μικροσκοπίου από τις άνω όψεις οι οποίες δέχθηκαν τη ρίψη σκόνης των 5 φίλτρων απεικονίζονται στις Εικόνες 2.3.1.4 - 2.3.1.9.



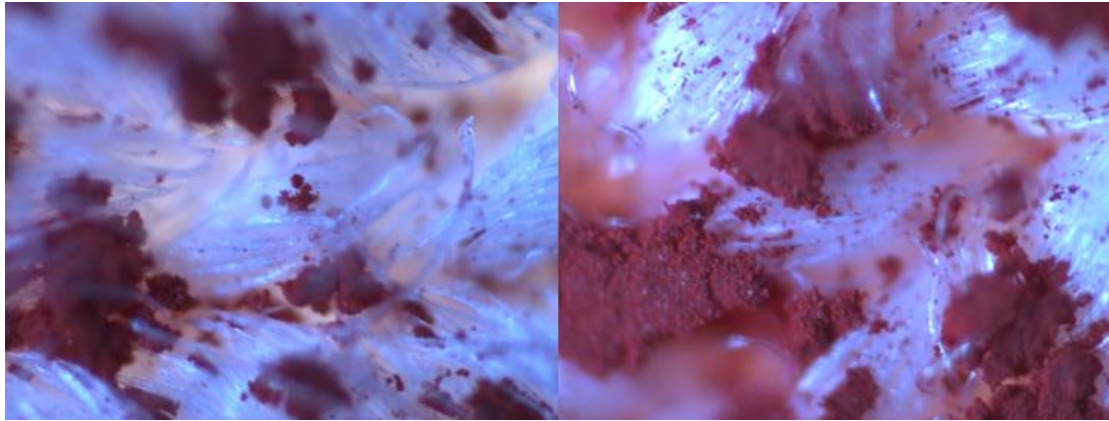
Εικόνα 2.3.1.4: Εικόνα μεγέθυνσης x50 φίλτρων από 100% βαμβάκι (αριστερά) και πολυαμίδιο (δεξιά)



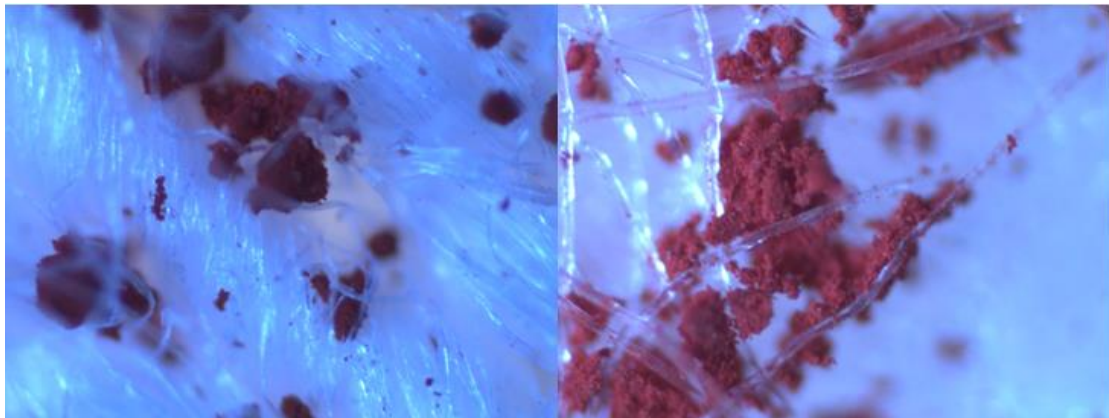
Εικόνα 2.3.1.5: Εικόνα μεγέθυνσης x50 φίλτρων από διπλή στρώση 100% βαμβάκι (αριστερά) και πιστοποίησης FFP2 (δεξιά)



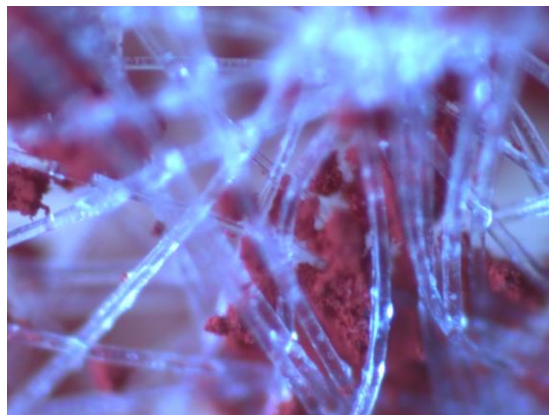
Εικόνα 2.3.1.6: Εικόνα μεγέθυνσης x50 φίλτρου από υλικό non-woven πιστοποίησης BFE 98%



Εικόνα 2.3.1.7: Εικόνα μεγέθυνσης x100 φίλτρων από 100% βαμβάκι (αριστερά) και πολυαμίδιο (δεξιά)

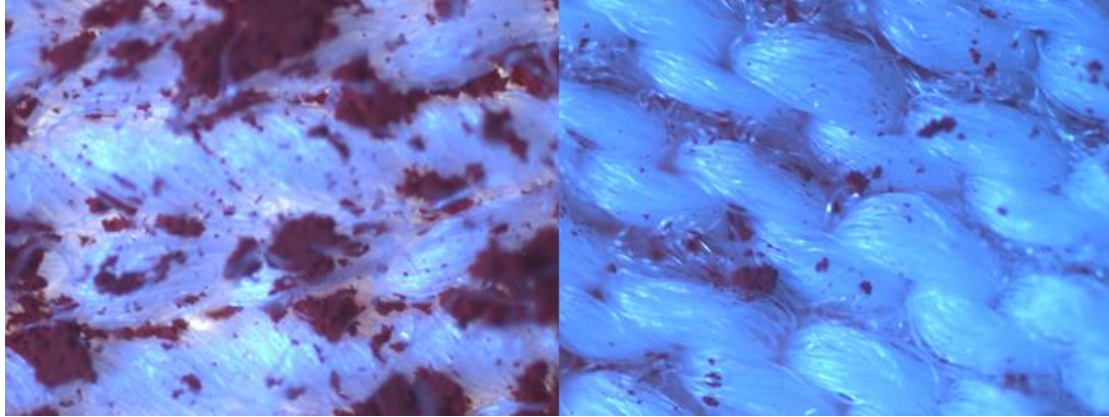


Εικόνα 2.3.1.8: Εικόνα μεγέθυνσης x100 φίλτρων από διπλή στρώση 100% βαμβάκι (αριστερά) και πιστοποίησης FFP2 (δεξιά)

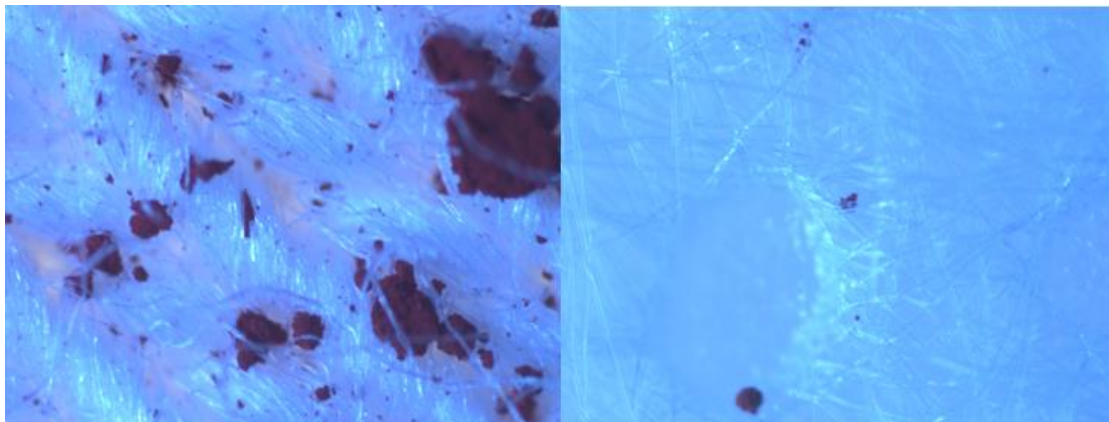


Εικόνα 2.3.1.9: Εικόνα μεγέθυνσης x100 φίλτρου από υλικό non-woven πιστοποίησης BFE 98%

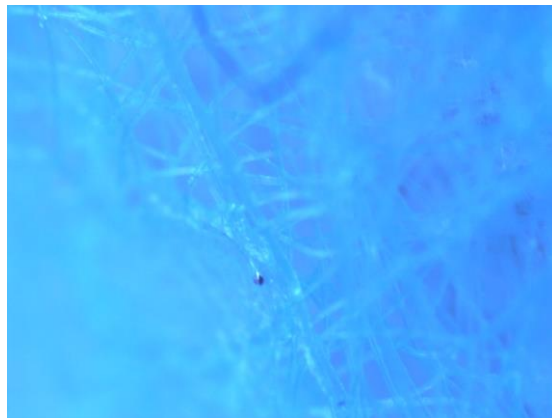
Οι εικόνες μικροσκοπίου από τις κάτω όψεις οι οποίες απέβαλαν τη σκόνη toner των 5 φίλτρων απεικονίζονται στις Εικόνες 2.3.1.10 – 2.3.1.15.



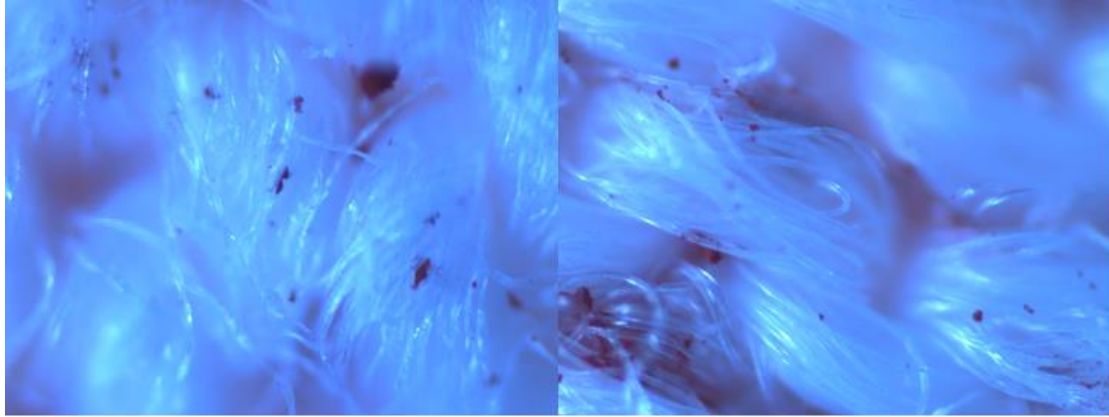
Εικόνα 2.3.1.10: Εικόνα μεγέθυνσης x50 φίλτρων από 100% βαμβάκι (αριστερά) και πολυαμίδιο (δεξιά)



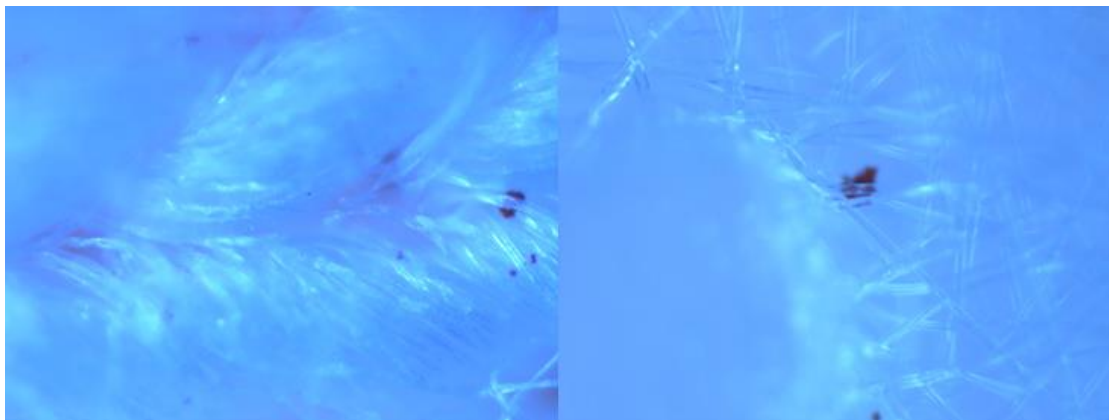
Εικόνα 2.3.1.11: Εικόνα μεγέθυνσης x50 φίλτρων από διπλή στρώση 100% βαμβάκι (αριστερά) και πιστοποίησης FFP2 (δεξιά)



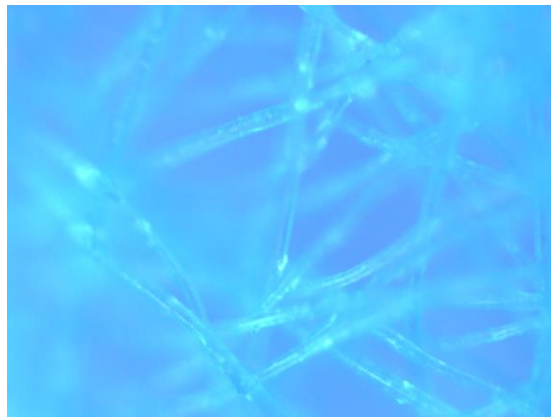
Εικόνα 2.3.1.12: Εικόνα μεγέθυνσης x50 φίλτρου από υλικό non-woven πιστοποίησης BFE 98%



Εικόνα 2.3.1.13: Εικόνα μεγέθυνσης x100 φίλτρων από 100% βαμβάκι (αριστερά) και πολυαμίδιο (δεξιά)



Εικόνα 2.3.1.14: Εικόνα μεγέθυνσης x100 φίλτρων από διπλή στρώση 100% βαμβάκι (αριστερά) και πιστοποίησης FFP2 (δεξιά)

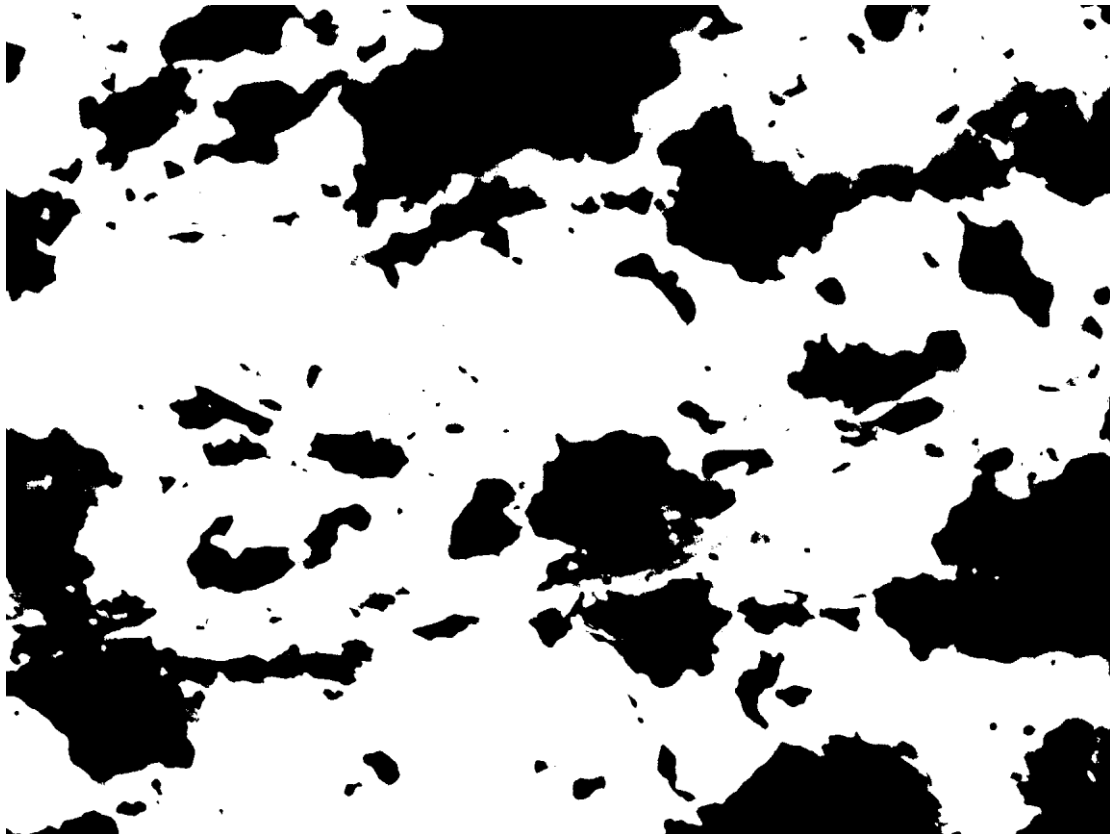


Εικόνα 2.3.1.15: Εικόνα μεγέθυνσης x100 φίλτρου από υλικό non-woven πιστοποίησης BFE 98%

Επόμενο βήμα μετά την απόκτηση των εικόνων μικροσκοπίου, αποτελεί η ανάλυσή τους ως προς την επιφάνεια που καταλαμβάνει το κόκκινο χρώμα σε σχέση με το χρώμα υποβάθρου του εκάστοτε φίλτρου. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ανάλυσης και επεξεργασίας ImageJ [70].

Αρχικά, κάθε εικόνα μετατράπηκε μέσω του λογισμικού σε εικόνα 8 τόνων του γκρι. Έπειτα εφαρμόστηκε η μέθοδος αυτόματου καθορισμού κατωφλιού (Auto Threshold)

Intermodes. Με αυτό τον τρόπο, το ιστόγραμμα της εικόνας λειαίνεται επαναληπτικά έως ότου παραμείνουν μόνο δύο κορυφές. Έτσι, η εικόνα καταλήγει να περιέχει 2 μόνο χρώματα, το άσπρο και το μαύρο. Επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή της εντολής ανάλυσης σωματιδίων (Analyze Particles) βάσει της οποίας το λογισμικό αυτόματα μετρά αντικείμενα σε εικόνες δυαδικής μορφής. Λειτουργεί με σάρωση της εικόνας μέχρι τον εντοπισμό της περιμέτρου ενός αντικειμένου. Τότε καταγράφει το μέγεθος του αντικειμένου και συνεχίζει τη σάρωση έως το τέλος της εικόνας. Ενδεικτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας εικόνων οπτικού μικροσκοπίου εμφανίζονται στις Εικόνες 2.3.1.16 και 2.3.1.17. Με μαύρο χρώμα απεικονίζονται οι κόκκοι της σκόνης toner και με άσπρο το ύφασμα της μάσκας.



Εικόνα 2.3.1.16: Επεξεργασμένη εικόνα μικροσκοπίου από φίλτρο 100% βαμβακερό, από την οπτική ρίψης της σκόνης toner



Εικόνα 2.3.1.17: Επεξεργασμένη εικόνα μικροσκοπίου από φίλτρο 100% βαμβακερό, από την οπτική αποβολής της σκόνης toner

Επόμενο βήμα μετά την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων, αποτελεί η εξαγωγή των ποσοστών επιφάνειας σκόνης ανά επιφάνεια υποβάθρου. Τα δεδομένα, όπως αυτά εξάγονται από το λογισμικό ImageJ παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.1.1.

Πίνακας 2.3.1.1: Ποσοστά καλυμμένης από σκόνη toner επιφάνειας των πέντε φίλτρων, υπό μεγέθυνση x50 και x100, στις άνω και κάτω όψεις τους.

Τύπος Φίλτρου	Άνω Όψη x50	Κάτω όψη x50	Άνω Όψη x100	Κάτω Όψη x100
Μονή στρώση 100% βαμβάκι	65.89%	1.74%	71.49%	2.09%
Πολυαμίδιο	59.53%	0.25%	57.71%	17.03%
Διπλή στρώση 100% βαμβάκι	84.94%	0.06%	82.63%	0.12%
Ενεργού άνθρακα FFP2	79.09%	0.25%	65.58%	0.39%
Non-Woven BFE 98%	60.07%	0.01%	31.06%	0.24%

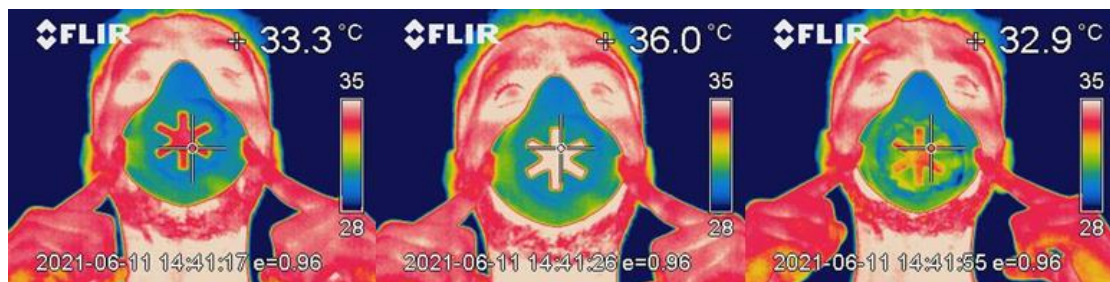
Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τον έλεγχο αποδοτικότητας φίλτρων παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.3.3.

2.3.2 Έλεγχος Διαρροών

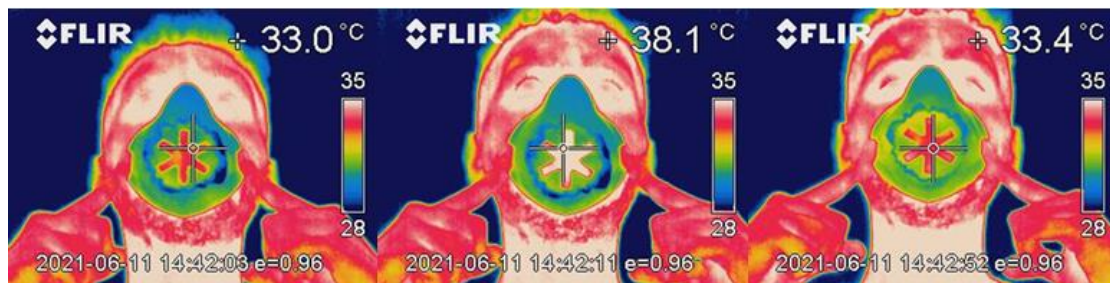
Σκοπός του ελέγχου διαρροών, είναι ο εντοπισμός διαρροών θερμοκρασίας από το σώμα της εκτυπωμένης μάσκας προσώπου, καθώς και η παρατήρηση της διαχείρισης θερμότητας κατά τη χρήση των πέντε διαφορετικών τύπων φίλτρων. Για την

υλοποίηση, χρησιμοποιήθηκε η FLIR Thermaxcam E300, θερμική κάμερα από την οποία συλλέχθηκαν εικόνες θερμικής εκπομπής.

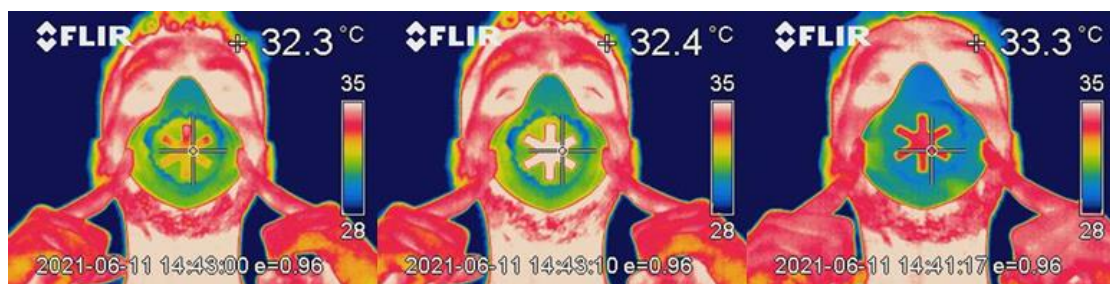
Ο χρήστης της μάσκας προσώπου, σύμφωνα με τον έλεγχο, εκτέλεσε τρία στάδια διαχείρισης αέρα με κάθε φίλτρο. Πρώτον εκτέλεσε την απλή αναπνοή, δηλαδή εισπνοή και εκπνοή χωρίς να ασκήσει επιπλέον πίεση. Δεύτερον, ακολούθησε τη διαδικασία της ομιλίας, και τρίτον εξέπνευσε με πίεση για διάστημα τριών δευτερολέπτων, ως προσπάθεια προσομοίωσης του συνεχούς βήχα ή ενός φτερνίσματος. Αυτές είναι τρεις φάσεις που προσομοιάζουν τις συνήθεις κινήσεις του χρήστη μάσκας προσώπου στην καθημερινότητά του. Σε κάθε εικόνα εμφανίζεται η θερμική απεικόνιση, το διάγραμμα ερμηνείας χρωμάτων-θερμοκρασίας όπως και η θερμοκρασία του κέντρου της εικόνας. Οι εξαγόμενες εικόνες από τη θερμική κάμερα, χωρισμένες ανά τύπο φίλτρου παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.3.2.1 έως 2.3.2.5.



Εικόνα 2.3.2.1: Θερμική απεικόνιση μάσκας προσώπου με φίλτρο από 100% βαμβάκι (αναπνοή, ομιλία, έντονη εμφύσηση) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



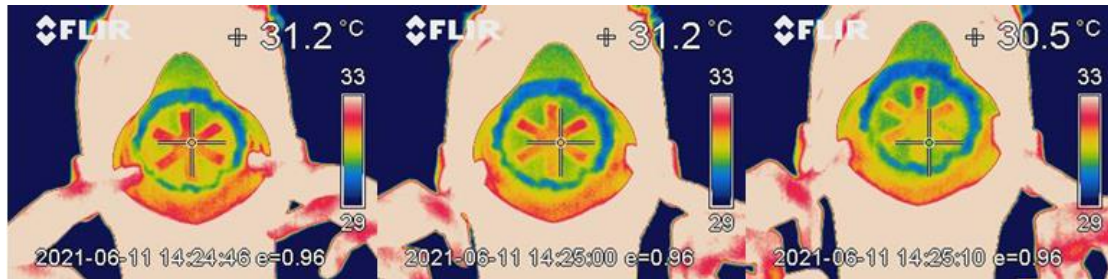
Εικόνα 2.3.2.2: Θερμική απεικόνιση μάσκας προσώπου με φίλτρο από πολυαμίδιο (αναπνοή, ομιλία, έντονη εμφύσηση) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



Εικόνα 2.3.2.3: Θερμική απεικόνιση μάσκας προσώπου με φίλτρο από 100% βαμβάκι διπλής στρώσης (αναπνοή, ομιλία, έντονη εμφύσηση) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



Εικόνα 2.3.2.4: Θερμική απεικόνιση μάσκας προσώπου με φίλτρο ενεργού άνθρακα (αναπνοή, ομιλία, έντονη εμφύσηση) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)



Εικόνα 2.3.2.5: Θερμική απεικόνιση μάσκας προσώπου με φίλτρο από υλικό non-woven (αναπνοή, ομιλία, έντονη εμφύσηση) (Πηγή: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

Οι εξωτερικές θερμοκρασίες των φίλτρων κατά τον έλεγχο συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.2.1.

Πίνακας 2.3.2.1: Εξωτερικές θερμοκρασίες φίλτρων μάσκας προσώπου

Τύπος Φίλτρου	Αναπνοή	Ομιλία	Εμφύσηση
Μονή στρώση 100% βαμβάκι	33.3°C	36.0°C	32.9°C
Πολυαμίδιο	33.0°C	38.1°C	33.4°C
Διπλή στρώση 100% βαμβάκι	32.3°C	32.4°C	33.3°C
Ενεργού άνθρακα FFP2	31.0°C	31.2°C	32.6°C
Non-Woven BFE 98%	31.2°C	31.2°C	30.5°C

Η ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τον συγκεκριμένο έλεγχο παρουσιάζεται στην ενότητα 2.3.3.

2.3.3 Αποτελέσματα

Από τον έλεγχο αποδοτικότητας φίλτρων και τον Πίνακα 2.3.1.1 υπολογίστηκε το ποσοστό φιλτραρίσματος της σκόνης toner. Αυτό έγινε λαμβάνοντας την απόλυτη τιμή της διαφοράς των άνω και κάτω καλυμμένων με σκόνη επιφανειών, και διαιρώντας έπειτα με τα αρχικά ποσοστά καλυμμένης επιφάνειας. Πολλαπλασιάζοντας έπειτα με 100, προκύπτει το ποσοστό φιλτραρίσματος. Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

$$\text{Ποσοστό συγκράτησης σωματιδίων} = \frac{|\text{Ποσοστό κάλυψης άνω επιφάνειας} - \text{Ποσοστό κάλυψης κάτω επιφάνειας}|}{\text{Ποσοστό κάλυψης άνω επιφάνειας}} * 100$$

Από την παραπάνω σχέση, αντικαθιστώντας τα ποσοστά προέκυψαν οι τιμές του Πίνακα 2.3.3.1, για τα πέντε είδη φίλτρων και τις δύο μεγεθύνσεις μικροσκοπίου.

Πίνακας 2.3.3.1: Ποσοστά απόδοσης φίλτρων

Τύπος Φίλτρου	Μεγέθυνση x50	Μεγέθυνση x100
Μονή στρώση 100% βαμβάκι	97.35%	97.07%
Πολυαμίδιο	99.58%	70.49%
Διπλή στρώση 100% βαμβάκι	99.92%	99.85%
Ενεργού άνθρακα FFP2	99.68%	99.40%
Non-Woven BFE 98%	99.98%	99.22%

Όσο για τον έλεγχο διαρροών, αρχικά επιβεβαιώθηκε οπτικά η στεγανότητα του σώματος της μάσκας, σε συνεργασία με την εφαρμογή των πέντε ειδών φίλτρου. Οι θερμοκρασίες των φίλτρων κατά τη διάρκεια του ελέγχου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.3.2.

Πίνακας 2.3.2.1: Εξωτερικές θερμοκρασίες φίλτρων μάσκας προσώπου

Τύπος Φίλτρου	Αναπνοή	Ομιλία	Εμφύσηση
Μονή στρώση 100% βαμβάκι	33.3°C	36.0°C	32.9°C
Πολυαμίδιο	33.0°C	38.1°C	33.4°C
Διπλή στρώση 100% βαμβάκι	32.3°C	32.4°C	33.3°C
Ενεργού άνθρακα FFP2	31.0°C	31.2°C	32.6°C
Non-Woven BFE 98%	31.2°C	31.2°C	30.5°C

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Συμπεράσματα Εκτύπωσης Μάσκας Προσώπου

Η πρώτη, ανεπιτυχής προσπάθεια εκτύπωσης οδήγησε σε αναζήτηση για την επίλυση του προβλήματος, απόκτηση βαθύτερων γνώσεων στο θέμα της τρισδιάστατης εκτύπωσης και τον τρόπο λειτουργίας των 3D εκτυπωτών. Ο σχεδιασμός της (βασισμένος στη Stopgar Face Mask [48]) είναι προσαρμοσμένος σε παγκόσμια πρότυπα και χαρακτηριστικά προσώπου, καθιστώντας την εφαρμόσιμη στο πρόσωπο του “μέσου” ενήλικα. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση ανταποκρίθηκε πλήρως στις προσδοκίες που είχαν δημιουργηθεί λόγω έρευνας στη βιβλιογραφία, παρέχοντας την απαραίτητη αντοχή και ελαστικότητα για το σκοπό της διπλωματικής εργασίας. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί η λεπτομέρεια ότι ένα μήνα μετά την εκτύπωση της μάσκας προσώπου, έχει απολυμανθεί για λόγους παρατήρησης με ψεκασμό διαλύματος υποχλωριόδου νατρίου (4.5%) και με αντιβακτηριδιακό σπρέι καθαρισμού επιφανειών με χλωριούχο βενζαλκόνιο (0.96%). Το σώμα της μάσκας προσώπου όπως και το κάλυμμα του φίλτρου δεν εμφάνισαν καμία αλλοίωση ή παραμόρφωση στην επιφάνεια και τη δομή τους. Συνεπώς, η δημιουργία της μάσκας προσώπου, από τον ψηφιακό σχεδιασμό έως και την εκτύπωση και τη χρήση ορίστηκε ως επιτυχής.

3.2 Συμπεράσματα Ελέγχου Αποδοτικότητας Φίλτρων

Για τον έλεγχο αποδοτικότητας φίλτρων, η σκόνη που χρησιμοποιήθηκε είχε εύρος διαμέτρων από 5 μm έως 30 μm [68]. Αυτό σίγουρα απέχει από το μέσο μέγεθος σταγονιδίου από φορέα του COVID-19 με μέσο μέγεθος τα 4.7 μm [67], όμως η σκόνη toner διαθέτει το μικρότερο μέγεθος κόκκου από κάθε προσβάσιμη σκόνη, προσφέροντας μεγάλη αντίθεση κατά την μικροσκοπική και ψηφιακή ανάλυση. Κατά συνέπεια, ο έλεγχος δεν μπορεί να είναι απολύτως αντιπροσωπευτικός στο φιλτράρισμα του ιού COVID-19, παρά μόνο για μεγαλύτερα σωματίδια του υπάρχοντος εύρους, όπως μεγαλύτερων σταγονιδίων φορέα του ιού ή της αιωρούμενης σκόνης (1-100 μm)[79].

Αναλύοντας τον Πίνακα 2.3.2.1 των αποτελεσμάτων, συμπεραίνει κανείς ότι τα ποσοστά φιλτραρίσματος είναι ενδεικτικά, και μπορεί να διαφέρουν ανάλογα την περιοχή ανάλυσης του φίλτρου, αν και υπήρξε προσπάθεια εστίασης στο κέντρο το φίλτρου ως σημείο αναφοράς για όλα τα φίλτρα. Άλλος ένας παράγοντας που ίσως έχει επηρεάσει τις εικόνες μικροσκοπίου και κατά συνέπεια τα ποσοστά συγκράτησης, είναι η μετακίνηση που δέχτηκαν τα φίλτρα από το χώρο ελέγχου στο χώρο του μικροσκοπίου.

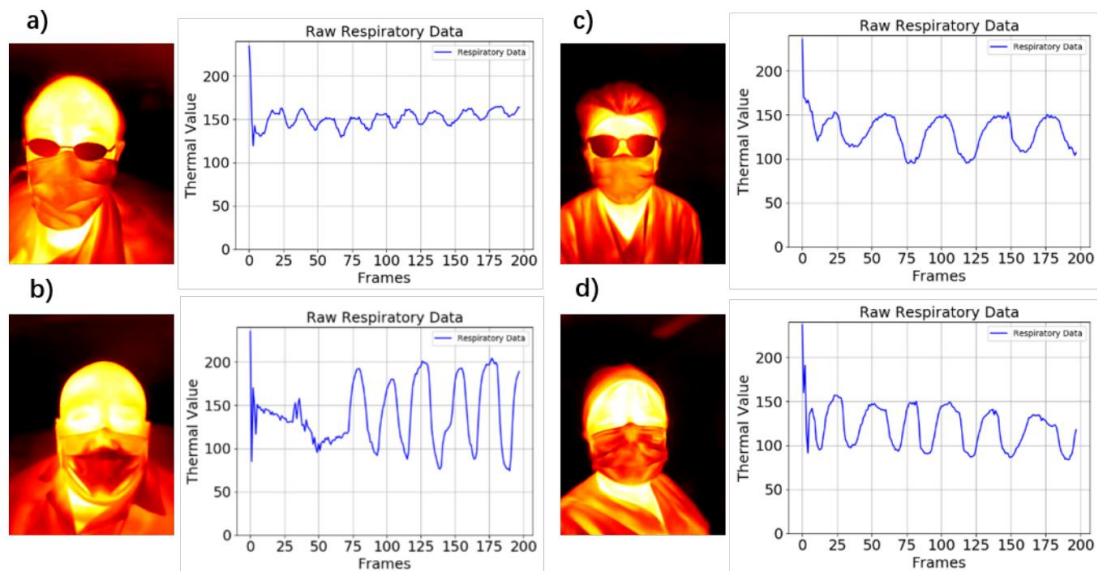
Οι συνήθεις έλεγχοι που γίνονται για την αποδοτικότητα ενός φίλτρου, είναι οι BFE (Bacterial Filtering Efficiency) , VFE (Viral Filtration Efficiency), PFE (Particle Filtration Efficiency). Αφορούν συγκράτηση βακτηρίων, ιών και σωματιδίων αντίστοιχα. Ο έλεγχος BFE αφορά το ποσοστό φιλτραρίσματος σταγονιδίων που περιέχουν βακτήρια ή ιούς, με μέγεθος 3 μm ή μεγαλύτερα. Ο έλεγχος VFE αφορά τη συγκράτηση σταγονιδίων, επίσης με μέγεθος 3 μm ή μεγαλύτερα, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί βακτηριοφάγους, μια ειδική κατηγορία ιών που προσβάλλουν βακτήρια, σε αντίθεση με τον έλεγχο BFE που χρησιμοποιεί βακτήρια. Όσο για τον έλεγχο PFE, αφορά τη συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων όπως η γύρη ή η σκόνη. Το

προβλεπόμενο μέγεθος αυτών των σωματιδίων είναι περίπου 0.1 μ m. Για παράδειγμα, μια μάσκα προσώπου με PFE 95% φιλτράρει το 95 τοις εκατό των αιωρούμενων σωματιδίων στα οποία εκτίθεται [80]. Παράλληλα, οι τρεις προαναφερθέντες έλεγχοι χρησιμοποιούν προωθητές αέρος συνεχόμενης ροής, η διάρκεια της οποίας κυμαίνεται από 1 έως 15 λεπτά [81]. Αυτό σημαίνει, ότι το υπό έλεγχο υλικό βρίσκεται υπό συνεχή ρίψη σωματιδίων.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες του ελέγχου αποδοτικότητας φίλτρων της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας (μέγεθος σωματιδίου, χρόνος ρίψης σκόνης toner), θα μπορούσε κανείς να τον κατηγοριοποιήσει ως έλεγχο PFE, με μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων τα 5 μ m έως 30 μ m. Το γεγονός αυτό, τον καθιστά ως έλεγχο χαμηλότερης ποιότητας των προβλεπόμενων για εμπορική χρήση, ή αλλιώς μια “επαλήθευση” των ήδη γνωστών ελέγχων (Πίνακας 1.3.1) για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, μικρότερης κλίμακας.

3.3 Συμπεράσματα Ελέγχου Διαρροών

Η χρήση θερμικής κάμερας συνήθως εφαρμόζεται για την αναγνώριση νοσούντων ατόμων από τον ιό του COVID-19 σε χώρους νοσοκομείων, όπου διέρχονται μεγάλα τμήματα πληθυσμού ή ακόμα και στο χώρο εργασίας τους. Το άτομο διέρχεται από το σημείο προβολής της κάμερας, όπου με τη χρήση ειδικού λογισμικού αναγνώρισης αρχικά καθορίζεται εάν φοράει κάποιου είδους μάσκα, και έπειτα προσδιορίζεται ο ρυθμός αναπνοής του (Εικόνα 3.3.1). Εάν ο ρυθμός αυτός ταιριάζει με τα πειραματικά πρότυπα από ήδη γνωστές περιπτώσεις νόσησης, τότε εμφανίζεται στην οθόνη του επιβλέποντος ειδικό μήνυμα προειδοποίησης [82,83].

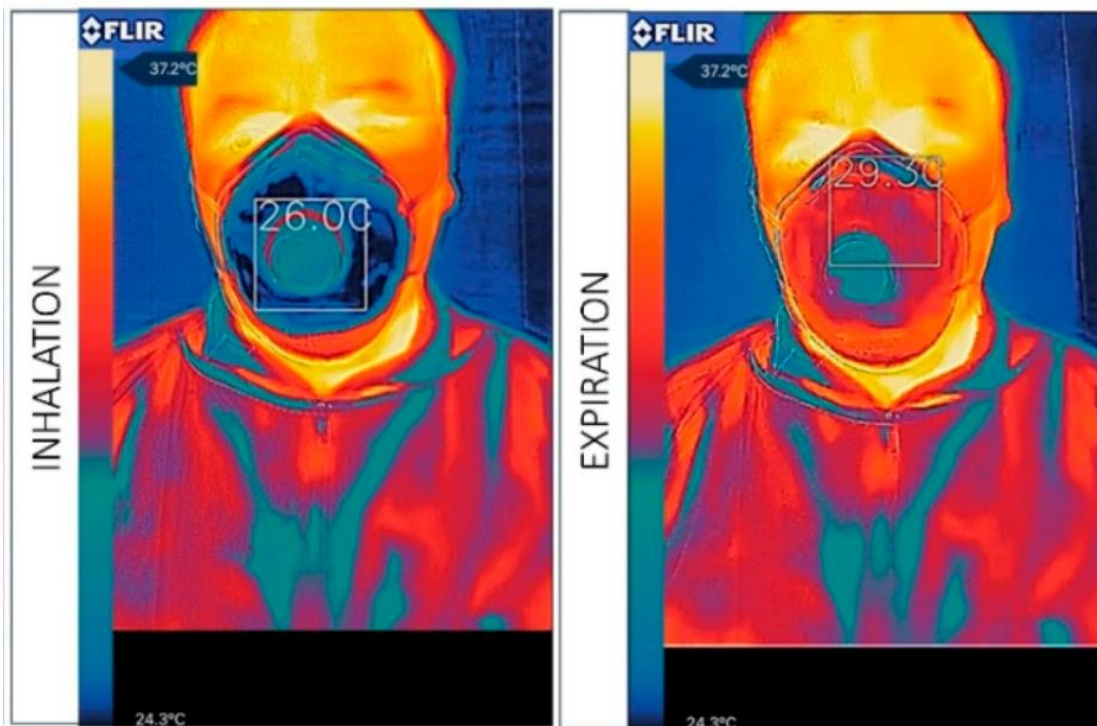


Εικόνα 3.3.1: Σύγκριση υγιούς και μη φυσιολογικού ρυθμού αναπνοής: a), b) αναπαριστούν το μη φυσιολογικό ρυθμό αναπνοής ατόμου που νοσεί στην Γενική Πτέρυγα του Πανεπιστημιακού Νοσοκομείου Ruijin c) και d) αναπαριστούν το φυσιολογικό ρυθμό αναπνοής εθελοντών. (Πηγή: <https://www.shsmu.edu.cn/>)

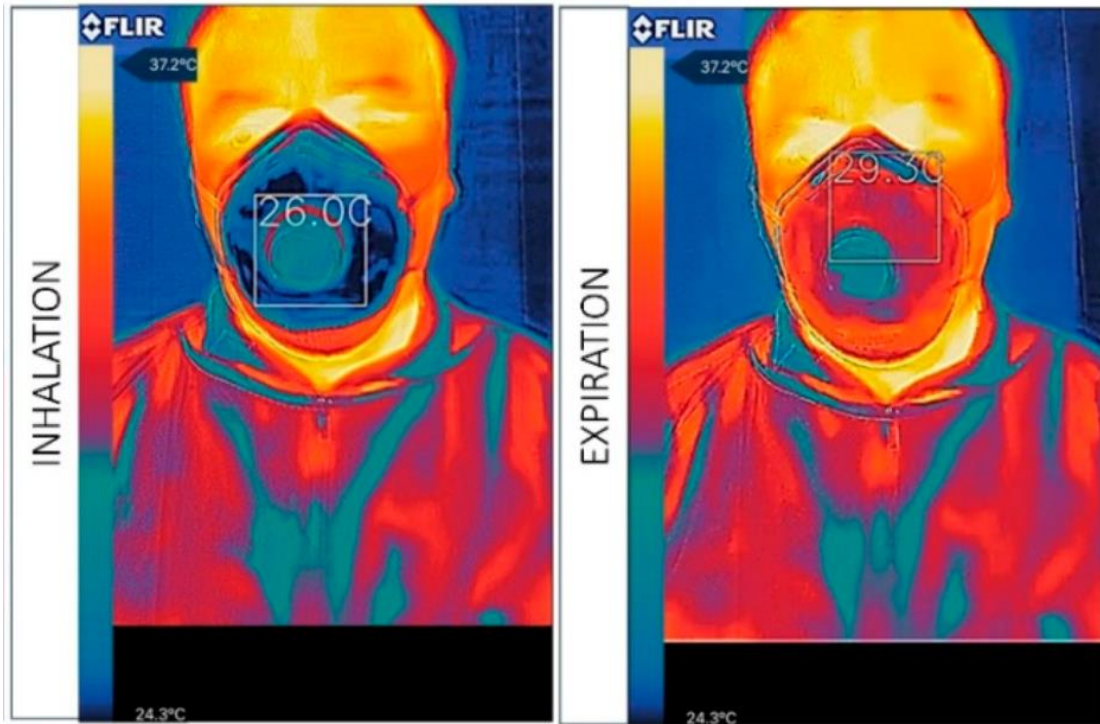
Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιεί λογισμικό βαθιάς μάθησης, με δυνατότητα συνεχούς προσαρμογής για την αυτοβελτίωση της απόδοσής του, ενώ έχει φτάσει σε

σημείο να αναγνωρίζει εάν το άτομο χρησιμοποιεί σωστά τη μάσκα προστασίας ακόμα και αν φοράει γυαλιά ή άλλα αντικείμενα προσώπου [84].

Σε σύγκριση με τον έλεγχο διαρροών που διεξήχθη στα πλαίσια της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας, οι παραπάνω τεχνικές διαφέρουν, εν μέρει, ως προς το σκοπό. Βασικός στόχος του ελέγχου ήταν η οπτική παρατήρηση των εικόνων για την ανίχνευση διαρροών από το κύριο σώμα της μάσκας προσώπου, σε συνεργασία με τα προβλεπόμενα είδη φίλτρων. Παράλληλα, συγκρίθηκαν οι θερμοκρασίες του Πίνακα 2.3.2.1 με αυτές της βιβλιογραφίας, για την εξακρίβωση των θερμοκρασιών, όπως και για την παρατήρηση της θερμοκρασίας που ίσως προσθέτει η συγχώνευση του αέρα μέσα από τη μάσκα προσώπου. Τα δύο φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση είναι αυτό της χειρουργικής μάσκας, και της μάσκας ενεργού άνθρακα. Η επιλογή αυτή έγινε διότι οι μάσκες αυτές κατέχουν τα μεγαλύτερα πιστοποιημένα ποσοστά φιλτραρίσματος, ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως από εργαζόμενους σε κέντρα υγείας, ευπαθείς ομάδες και νοσούντες του ιού της COVID-19. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των A. Scarano, F. Inchingolo και F. Lorusso, οι χειρουργικές μάσκες από υλικό non-woven φτάνουν τους 28.9 ± 3.1 °C κατά την εισπνοή και τους 31.4 ± 3.6 °C κατά την εκπνοή. Οι μάσκες προσώπου με ποσοστό συγκράτησης αιωρούμενων σωματιδίων βακτηρίων N95, φτάνουν τους 26.0 ± 3.6 °C κατά την εισπνοή και τους 29.3 ± 3.8 °C κατά την εκπνοή (Εικόνες 3.3.1,3.3.2) [85].



Εικόνα 3.3.1: Θερμική απεικόνιση εισπνοής (αριστερά) και εκπνοής (δεξιά) με τη χρήση χειρουργικής μάσκας (Πηγή: A. Scarano, F. Inchingolo, F. Lorusso, Facial Skin Temperature and Discomfort When Wearing Protective Face Masks: Thermal Infrared Imaging Evaluation and Hands Moving the Mask)



Εικόνα 3.3.1: Θερμική απεικόνιση εισπνοής (αριστερά) και εκπνοής (δεξιά) με τη χρήση μάσκας πιστοποίησης N95 (Πηγή: A. Scarano, F. Inchingolo, F. Lorusso, Facial Skin Temperature and Discomfort When Wearing Protective Face Masks: Thermal Infrared Imaging Evaluation and Hands Moving the Mask)

Το φίλτρο από χειρουργική μάσκα υλικού non-woven, κατά τη διάρκεια του ελέγχου με τη χρήση θερμικής κάμερας εμφάνισε τις εξής θερμοκρασίες: 31.2 °C κατά την αναπνοή, 31.2 °C κατά την ομιλία και 30.5 °C κατά την εμφύσηση. Όσο για το φίλτρο ενεργού άνθρακα με πιστοποίηση N95 εμφάνισε 31.0 °C κατά την αναπνοή, 31.2 °C κατά την ομιλία και 32.6 °C κατά την εμφύσηση.

Λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις θερμοκρασίες αναπνοής για την ισάξια σύγκριση με το προβλεπόμενο πείραμα, οι 31.2 °C ανήκουν στο προβλεπόμενο φάσμα θερμοκρασιών για τη χειρουργική μάσκα (28.9 ± 3.1 °C και 31.4 ± 3.6 °C).

Για το φίλτρο πιστοποίησης N95, οι 31.0 °C ξεπερνούν για 1.4 °C το μέγιστο θερμοκρασίας τις αντίστοιχες μάσκας προσώπου για την εισπνοή, αλλά εμπεριέχονται στο φάσμα θερμοκρασιών για την εκπνοή (26.0 ± 3.6 °C και 29.3 ± 3.8 °C).

Το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από αυτή τη σύγκριση είναι ότι οι θερμοκρασίες των δύο φίλτρων της διπλωματικής εμφανίζονται λίγο μεγαλύτερες από το μέσο όρο θερμοκρασιών του ελέγχου της βιβλιογραφίας. Αυτό, πιθανώς οφείλεται στην συγκέντρωση του αναπνεόμενου αέρα διαμέσου του φίλτρου των 60mm. Πιθανός λόγος διαφοράς των αποτελεσμάτων ίσως είναι οι διαφορετικές συνθήκες πειράματος, είτε αυτές είναι περιβαλλοντικές είτε υποκειμενικές.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω σύγκρισης είναι ικανοποιητικά, αν παρατηρήσει κανείς τις μικρές διαφορές θερμοκρασίας, αλλά και τις γενικώς χαμηλές θερμοκρασίες του Πίνακα 2.3.2.1. Ταυτόχρονα, δεν εμφανίζονται οπτικά διαρροές από το σώμα της μάσκας προσώπου, ούτε σημαντικές απώλειες από την εφαρμογή της στο πρόσωπο του χρήστη. Οι παραπάνω παράγοντες καθιστούν τον έλεγχο

διαρροών επιτυχή, με επιπλέον επιβεβαίωση των θερμοκρασιών των δύο αποτελεσματικότερων φίλτρων.

Συμπεράσματα

Η πανδημία της νόσου COVID-19 που συνδέεται με τον κορονοϊό σοβαρού οξέος αναπνευστικού συνδρόμου τύπου 2 (SARS-CoV-2) έχει οδηγήσει τον πληθυσμό όλου του κόσμου στην λήψη μέτρων προστασίας. Όσο ο ιατροτεχνολογικός εξοπλισμός εξελίσσεται και κινείται γύρω από την προστασία από τον ιό, αναπτύσσονται τεχνικές και μέθοδοι για την παραγωγή με γρηγορότερες ταχύτητες, λιγότερα και φθηνότερα υλικά, με μεγαλύτερη προσβασιμότητα προς όλους. Η κοινότητα της 3D εκτύπωσης έχει κινηθεί αναλόγως, για την κάλυψη αναγκών, και την παροχή προσιτότητας ιατροτεχνολογικού εξοπλισμού όπου είναι απαραίτητο. Μία τέτοια προσπάθεια διεξάγεται στα πλαίσια της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία της μάσκας προσώπου, αποτελεί συνδυασμό θεωρητικής μελέτης, ψηφιακού σχεδιασμού, και πρακτικής εξοικείωσης στον τομέα των 3D εκτυπωτών.

Θετικός παράγοντας, η συμβατότητα του εκτυπωτή Flashforge Creator 3 του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με μεγάλη ποικιλία αναλώσιμων υλικών. Η οθόνη στην επιφάνεια του κατέστησε την ρύθμιση και διαχείριση των ψηφιακών μοντέλων εύκολη, ενώ πραγματοποιήθηκε μέσω αυτής μια αυτόματη βαθμονόμηση των αξόνων X, Y και Z πριν την εκκίνηση εκτύπωσης των μοντέλων. Κατά την πλοήγηση στο περιβάλλον της οθόνης οι επιλογές είναι πολλές, χωρίς να απαιτείται μεγάλη εμπειρία για την κατανόησή τους, με ζωντανή παρακολούθηση του ποσοστού ολοκληρωμένης εκτύπωσης, και των θερμοκρασιών των κεφαλών εξώθησης και πλατφόρμας.

Το κόστος του υλικού εκτύπωσης, αν αναλογιστεί κανείς ότι χρησιμοποιήθηκαν 30.5 μέτρα νήματος PLA διαμέτρου 1.75mm, με την τιμή ~20€ ανά 335m της Ελληνικής αγοράς, υπολογίζεται περίπου στα 1.82€ για την εκτύπωση της μάσκας προσώπου και του καλύμματος φίλτρου. Για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνεται υπόψη η ισχύς του εκτυπωτή (500W), ο χρόνος εκτύπωσης (13 ώρες και 21 λεπτά) καθώς και η κοστολόγηση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των 0.10500 €/kWh (μέση χρέωση οικιακού συμβολαίου Δημόσιας Εταιρείας Ηλεκτρισμού) [86]. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, προστέθηκαν 0.73€ στο συνολικό κόστος κατασκευής της μάσκας, ορίζοντάς το στα 2.55€. Ωστόσο, η χρέωση αυτή ενδεχομένως διαφέρει, αναλόγως της κοστολόγησης ηλεκτρικού ρεύματος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, όπου και λειτούργησε ο τρισδιάστατος εκτυπωτής. Το κόστος αυτό θα μπορούσε να πει κανείς ότι καταλογίζεται στα θετικά χαρακτηριστικά της μάσκας προσώπου, αν αναλογιστεί κανείς τα κόστη των αναλώσιμων, που θα ήταν ακριβότερα με χρήση άλλων τεχνολογιών [87]. Η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της μάσκας, χωρίς ιδιαίτερη φθορά κάθε φορά, επίσης δικαιολογεί το κόστος της έναντι άλλων μασκών προστασίας μιας χρήσης.

Οι δυσκολίες που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της δημιουργίας αλλά και η ανεπιτυχής προσπάθεια, οδήγησαν σε περισσότερη αναζήτηση και πρακτικές δοκιμές, μέχρι την τελική εκτύπωση του πρωτοτύπου. Αρχικά, ο σχεδιασμός του ψηφιακού μοντέλου ήταν αποτέλεσμα πολυήμερης έρευνας στους τομείς και τεχνικές της ψηφιακής μοντελοποίησης CAD, μέχρι να υπάρξει εξοικείωση με τα προγράμματα αυτά. Συνέπεια της έλλειψης εμπειρίας, αποτέλεσε η πρώτη, ανεπιτυχής προσπάθεια, κατά την οποία η μάσκα προσώπου εμφάνιζε κενά στην επιφάνειά της, χωρίς την απαραίτητη στεγανότητα και σταθερότητα. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται σε δύο σφάλματα: α) Στην υπερβολικά γρήγορη κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης, με

συνέπεια να μην προλαβαίνουν να ενωθούν οι στρώσεις μεταξύ τους, και β) στο υπερβολικά μικρό πάχος του ψηφιακού μοντέλου, και αντίστοιχα και στο εκτυπωμένο. Έπειτα από έρευνα, αποδείχθηκε ότι η ταχύτητα της κεφαλής ήταν ικανοποιητική για τη στοχευμένη δομή, όμως το μικρό πάχος του ενός χιλιοστού του σώματος της μάσκας υποβάθμιζε στο μέγιστο τη στερεότητα και στεγανότητά της. Η διόρθωση του πάχους του ψηφιακού μοντέλου στα τρία χιλιοστά, οδήγησε στην δημιουργία του παρόντος πρωτοτύπου, που διαθέτει πλέον τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά της θεωρητικής μελέτης και του ψηφιακού μοντέλου αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας την προσπάθεια της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας με αντίστοιχη τρισδιάστατη εκτύπωση που δημοσιεύτηκε στο Διεθνές Περιοδικό Στοματικής και Γναθοπροσωπικής Χειρουργικής [88] παρατηρεί κανείς πολλαπλές διαφορές αλλά και ομοιότητες. Κυριότερη διαφορά αποτελεί η τεχνολογία εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε, αυτή της Επιλεκτικής Σύντηξης με Λείζερ (SLS). Σε αντίθεση με την τεχνολογία του εκτυπωτή Flashforge Creator 3 την FDM, η SLS προορίζεται για την εκτύπωση περισσότερο σύνθετων μοντέλων, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, όμως με μεγαλύτερο χρόνο μετά-επεξεργασίας. Στην τεχνολογία SLS οι στρώσεις εκτύπωσης δεν είναι εμφανείς. Πλεονέκτημα της μεθόδου FDM αποτελεί η ευρεία ποικιλία διαθέσιμων υλικών, με διαφορετικές ιδιότητες, χρώματα και υφές το κάθε ένα. Ακόμη μια διαφορά της μεθοδολογίας της πτυχιακής εργασίας με αυτή της βιβλιογραφίας είναι η χρήση λογισμικού αναγνώρισης προσώπου, για την δημιουργία της μάσκας, βάσει των χαρακτηριστικών προσώπου του χρήστη. Αυτό σίγουρα υπερέχει της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στη διπλωματική εργασία (βάσει μέσω των διαστάσεων προσώπου ενήλικα) για την καλύτερη εφαρμογή της μάσκας στο πρόσωπο. Ωστόσο, δεν εξασφαλίζεται με αυτό τον τρόπο η προσαρμογή σε ευρύτερο κοινό χρηστών. Όμοιο χαρακτηριστικό των δύο προσπαθειών, είναι η εκτύπωση του μοντέλου σε δύο ξεχωριστά τμήματα, το κύριο σώμα της μάσκας και το κάλυμμα του φίλτρου [89]. Παρά ταύτα, η εκτυπωμένη μάσκα προσώπου αντεπεξήλθε ικανοποιητικά κατά τον έλεγχο διαρροών, και τη μετέπειτα προσωπική χρήση.

Είναι ένα πρωτότυπο μοντέλο, βασισμένο στην μάσκα Stopgar [48], το οποίο σίγουρα επιδέχεται βελτιώσεις. Σε μία δεύτερη, βελτιωμένη έκδοση της ίδιας μάσκας προσώπου, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν δύο είδη υλικών, όπως ελαστική σιλικόνη και PLA. Η ελαστική σιλικόνη, εάν εφαρμοστεί στη βάση της μάσκας, δηλαδή στο πλαίσιο που εφάπτεται στο πρόσωπο του χρήστη, θα εξασφαλίσει σαφώς μια στεγανότερη μάσκα, και γενικά μια φιλικότερη προς το πρόσωπο δομή. Μια ακόμα βελτίωση που θα μπορούσε να εφαρμοστεί, είναι η χρήση ενός κινητού τηλεφώνου για την αναγνώριση χαρακτηριστικών προσώπου. Η συγχώνευση των χαρακτηριστικών αυτών με το ψηφιακό μοντέλο, θα προσέφερε μια πιο εξατομικευμένη και φιλική προς το χρήστη προσαρμογή. Τέλος, ένα στοιχείο που δεν αξιοποιήθηκε κατά τη διπλωματική εργασία, είναι η δεύτερη κεφαλή εξώθησης υλικού του εκτυπωτή Flashforge Creator 3. Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της όλης διαδικασίας, θα μπορούσε να ανατεθεί η εκτύπωση και στις δύο κεφαλές, με τη μια να εκτυπώνει το πρώτο υλικό (π.χ. σιλικόνη) και τη δεύτερη το άλλο υλικό (π.χ. PLA). Ένα σενάριο για την αξιοποίηση των δύο κεφαλών θα ήταν η ανάθεση εκτύπωσης των στηριγμάτων στην μια κεφαλή και του προβλεπόμενου αντικειμένου στην δεύτερη κεφαλή.

Οι έλεγχοι αποδοτικότητας φίλτρων και διαρροών βασίστηκαν σε θεωρητικές και πρακτικές μελέτες. Να σημειωθεί, ότι για την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος από τους παραπάνω ελέγχους είναι αναγκαία η χρήσης μεγαλύτερου αριθμού δειγμάτων. Κατά συνέπεια επιτελούν κυρίως ρόλους εξακρίβωσης και επαλήθευσης, έχοντας συμβάλει στο μέγιστο για την κατανόηση στοιχείων όπως τα αιωρούμενα

σωματίδια και τις ιδιότητες των φίλτρων προστασίας, αλλά και στη λειτουργία του οπτικού μικροσκοπίου και της θερμικής κάμερας. Ο συνδυασμός των παραπάνω, μπορεί να οδηγήσει το χρήστη στην ορθότερη κατασκευή και χρήση μιας μάσκας προσώπου, με τα επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Αναφορές - Πηγές

- [1] Pearson, A., 2021. The history of 3D printing. [online] Stratasys. Available at: <<https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history>> [Accessed 1 July 2021].
- [2] Brown, M., 2021. *A Brief History of 3D Printing | Cad Crowd*. [online] Cadcrowd.com. Available at: <<https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/>> [Accessed 3 May 2021].
- [3] Επαγγελματική 3D Εκτύπωση. 2021. SLS vs SLA vs FFF - Επαγγελματική 3D Εκτύπωση. [online] Available at: <<https://thes3d.gr/2018/07/13/sls-vs-sla-vs-fff/>> [Accessed 1 July 2021].
- [4] additive3d.com. 2021. Laser Powder Forming (LPF) and Laminated Object Manufacturing (LOM) 3D Additive technologies - additive3d.com. [online] Available at: <<https://additive3d.com/laser-powder-forming-lpf-laminated-object-manufacturing-lom-3d-additive-technologies/>> [Accessed 1 July 2021].
- [5] Monroe Engineering. 2021. An Introduction to Laminated Object Manufacturing (LOM) - Monroe Engineering. [online] Available at: <<https://monroengineering.com/blog/an-introduction-to-laminated-object-manufacturing-lom/>> [Accessed 1 July 2021].
- [6] Greguric, L., 2021. What Is Material Jetting? – 3D Printing Simply Explained. [online] Available at: <<https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>> [Accessed 1 July 2021].
- [7] Fried, S., 2021. The 3D Inkjet Printing Process Explained. [online] Nano-di.com. Available at: <<https://www.nano-di.com/blog/2019-the-3d-inkjet-printing-process-explained>> [Accessed 1 July 2021].
- [8] Manufacturingguide.com. 2021. Solid Ground Curing, SGC. [online] Available at: <<https://www.manufacturingguide.com/en/solid-ground-curing-sgc>> [Accessed 1 July 2021].
- [9] 3D Print Expo 2019. 2021. What does Solid Ground Curing (SGC) mean? | 3D Print Expo. [online] Available at: <<https://3d-expo.ru/en/article/chto-takoe-masochnaya-stereolitografiya-sgc-79117>> [Accessed 1 July 2021].
- [10] Handal, Raed. (2017). Additive Manufacturing As A Manufacturing Method. 10.13140/RG.2.2.35883.90406.
- [11] Trantzas, G., 2021. Τι είναι Τρισδιάστατη Εκτύπωση και Ποιες οι Εφαρμογές της | PCsteps.gr. [online] PCsteps.gr. Available at: <https://www.pcsteps.gr/100046-%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%B7%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%8D%CF%80%CF%89%CF%83%CE%B7-3d-printing/#Fused_Deposition_Modelling_FDM_Fused_Filament_Fabrication_FFF> [Accessed 2 April 2021]
- [12] Chocholata, P.; Kulda, V.; Babuska, V. Fabrication of Scaffolds for Bone-Tissue Regeneration. *Materials* 2019, 12, 568.
- [13] Zhu, L.Y.; Li, L.; Shi, J.P.; Li, Z.A.; Yang, J.Q. Mechanical characterization of 3D printed multi-morphology porous Ti6Al4V scaffolds based on triply periodic minimal surface architectures. *Am. J. Transl. Res.* 2018, 10, 3443–3454
- [14] Ma, Y.; Hu, N.; Liu, J.; Zhai, X.; Wu, M.; Hu, C.; Li, L.; Lai, Y.; Pan, H.; Lu, W.W.; et al. Three-Dimensional Printing of Biodegradable Piperazine-Based Polyurethane-Urea Scaffolds with Enhanced Osteogenesis for Bone Regeneration. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 9.
- [15] Zhao, H.; Chen, Y.; Shao, L.; Xie, M.; Nie, J.; Qiu, J.; Zhao, P.; Ramezani, H.; Fu, J.; Ouyang, H.; et al. Airflow-Assisted 3D Bioprinting of Human Heterogeneous Microspheroidal Organoids with Microfluidic Nozzle. *Small* 2018, 14, e1802630.
- [16] Kim, Y.; Kang, K.; Yoon, S.; Kim, J.S.; Park, S.A.; Kim, W.D.; Lee, S.B.; Ryu, K.Y.; Jeong, J.; Choi, D. Prolongation of liver-specific function for primary hepatocytes maintenance in 3D printed architectures. *Organogenesis* 2018, 14, 1–12.
- [17] Grix, T.; Ruppelt, A.; Thomas, A.; Amler, A.K.; Noichl, B.P.; Lauster, R.; Kloke, L. Bioprinting Perfusion-Enabled Liver Equivalents for Advanced Organ-on-a-Chip Applications. *Genes* 2018, 9, 176.
- [18] Skardal, A.; Devarasetty, M.; Kang, H.W.; Seol, Y.J.; Forsythe, S.D.; Bishop, C.; Shupe, T.; Soker, S.; Atala, A. Bioprinting Cellularized Constructs Using a Tissue-specific Hydrogel Bioink. *J. Vis. Exp.* 2016, e53606.
- [19] Reid, J.A.; Mollica, P.A.; Bruno, R.D.; Sachs, P.C. Consistent and reproducible cultures of large-scale 3D mammary epithelial structures using an accessible bioprinting platform. *Breast Cancer Res.* 2018, 20, 122.

- [20] Zhang, Y.S.; Arneri, A.; Bersini, S.; Shin, S.R.; Zhu, K.; Goli-Malekabadi, Z.; Aleman, J.; Colosi, C.; Busignani, F.; Dell’Erba, V.; et al. Bioprinting 3D microfibrinous scaffolds for engineering endothelialized myocardium and heart-on-a-chip. *Biomaterials* 2016, 110, 45–59.
- [21] Kim, J.H.; Seol, Y.-J.; Ko, I.K.; Kang, H.-W.; Lee, Y.K.; Yoo, J.J.; Atala, A.; Lee, S.J. 3D Bioprinted Human Skeletal Muscle Constructs for Muscle Function Restoration. *Sci. Rep.* 2018, 8, 1–5.
- [22] Ali, M.; Yoo, J.J.; Zahran, F.; Atala, A.; Lee, S.J. A Photo—Crosslinkable Kidney ECM—Derived Bioink Accelerates Renal Tissue Formation. *Adv. Healthc. Mater.* 2019, 8, 1800992
- [23] Cubo, N.; Garcia, M.; Del Canizo, J.F.; Velasco, D.; Jorcano, J.L. 3D bioprinting of functional human skin: Production and in vivo analysis. *Biofabrication* 2016, 9, 015006
- [24] Lee, W.; Pinckney, J.; Lee, V.; Lee, J.H.; Fischer, K.; Polio, S.; Park, J.K.; Yoo, S.S. Three-dimensional bioprinting of rat embryonic neural cells. *Neuroreport* 2009, 20, 798–803.
- [25] Dai, X.; Liu, L.; Ouyang, J.; Li, X.; Zhang, X.; Lan, Q.; Xu, T. Coaxial 3D bioprinting of self-assembled multicellular heterogeneous tumor fibers. *Sci. Rep.* 2017, 7, 1457.
- [26] Vignesh, U.; Mehrotra, D.; Vaibhav Anand, D.; Howlader, D. Three dimensional reconstruction of late post traumatic orbital wall defects by customized implants using CAD-CAM, 3D stereolithographic models: A case report. *J. Oral Biol. Craniofacial Res.* 2017, 7, 212–218
- [27] Kazzazi, S.M.; Kranioti, E.F. Applicability of 3D-dental reconstruction in cervical odontometrics. *Am. J. Phys. Anthr.* 2018, 165, 370–377.
- [28] Wang, Y.; Wu, L.; Guo, H.; Qiu, T.; Huang, Y.; Lin, B.; Wang, L. Computation of tooth axes of existent and missing teeth from 3D CT images. *Biomed. Eng.* 2015, 60, 623–632
- [29] Oberoi, G.; Nitsch, S.; Edelmayer, M.; Janjic, K.; Muller, A.S.; Agis, H. 3D Printing—Encompassing the Facets of Dentistry. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2018, 6, 172
- [30] Haglin, J.M.; Etorai, A.E.; Gil, J.A.; Marcaccio, S.E.; Botero-Hincapie, J.; Daniels, A.H. Patient-Specific Orthopaedic Implants. *Orthop. Surg.* 2016, 8, 417–424.
- [31] Arabnejad, S.; Johnston, B.; Tanzer, M.; Pasini, D. Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty. *J. Orthop. Res.* 2017, 35, 1774–1783.
- [32] Barba, A.; Diez-Escudero, A.; Maazouz, Y.; Rappe, K.; Espanol, M.; Montufar, E.B.; Bonany, M.; Sadowska, J.M.; Guillem-Marti, J.; Ohman-Magi, C.; et al. Osteoinduction by Foamed and 3D-Printed Calcium Phosphate Scaffolds: Effect of Nanostructure and Pore Architecture. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9, 41722–41736.
- [33] Ahangar, P.; Akoury, E.; Ramirez Garcia Luna, A.; Nour, A.; Weber, M.; Rosenzweig, D. Nanoporous 3D-Printed Scaffolds for Local Doxorubicin Delivery in Bone Metastases Secondary to Prostate Cancer. *Materials* 2018, 11, 1485.
- [34] Fitzpatrick, P.A. Design of a Patient Specific, 3D printed Arm Cast. *KNE Eng.* 2017, 2, 135.
- [35] George, M.; Aroom, K.R.; Hawes, H.G.; Gill, B.S.; Love, J. 3D Printed Surgical Instruments: The Design and Fabrication Process. *World J. Surg.* 2017, 41, 314–319.
- [36] Guo, F.; Dai, J.; Zhang, J.; Ma, Y.; Zhu, G.; Shen, J.; Niu, G. Individualized 3D printing navigation template for pedicle screw fixation in upper cervical spine. *PLoS ONE* 2017, 12, e0171509.
- [37] Rankin, T.M.; Giovinco, N.A.; Cucher, D.J.; Watts, G.; Hurwitz, B.; Armstrong, D.G. Three-dimensional printing surgical instruments: Are we there yet? *J. Surg. Res.* 2014, 189, 193–197.
- [38] Novak, J. and Loy, J., 2020. A quantitative analysis of 3D printed face shields and masks during COVID-19. *Emerald Open Research*, 2, p.42.
- [39] Who.int. 2021. World Health Organization Emergencies Programme. [online] Available at: <<https://www.who.int/emergencies>> [Accessed 16 May 2021].
- [40] Our World in Data. 2021. Coronavirus (COVID-19) Vaccinations - Statistics and Research. [online] Available at: <<https://ourworldindata.org/covid-vaccinations>> [Accessed 16 May 2021].
- [41] Aria Bendix, B., 2021. One Chart Shows The Best And Worst Face Mask Types, Based on The Latest Research. [online] ScienceAlert. Available at: <<https://www.sciencealert.com/this-chart-shows-the-best-and-worst-face-masks-for-each-situation>> [Accessed 16 May 2021].
- [42] Who.int. 2021. Advice for the public on COVID-19 – World Health Organization. [online] Available at: <<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>> [Accessed 16 May 2021].
- [43] Johns Hopkins University. 2021. Home | Johns Hopkins University. [online] Available at: <<https://www.jhu.edu/>> [Accessed 16 May 2021].

- [44] <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-respirator-230320205/>
- [45] R.M. Elavarasan, R. Pugazhendhi, Restructured society and environment: A review on potential technological strategies to control the COVID-19 pandemic, *Sci. Total Environ.* 72510 (2020) 138858
- [46] M. Acuto, COVID-19: Lessons for an urban(izing) world, *One Earth* 2 (2020) 317–319.
- [47] Guidance on regulatory requirements for medical face masks. Options for supporting production and/or placing on the market of medical face masks in the context of COVID-19 pandemic, EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR HEALTH AND FOOD SAFETY Health systems, medical products and innovation Medical Devices, p1.
- [48] 3D Systems. 2021. COVID-19 Call to Action | 3D Systems. [online] Available at: <<https://www.3dsystems.com/covid-19-response>> [Accessed 17 May 2021].
- [49] NIH 3D PRINT EXCHANGE. 2021. NIH 3D PRINT EXCHANGE. [online] Available at: <<https://3dprint.nih.gov/discover>> [Accessed 17 May 2021].
- [50] Goehrke, S., 2021. Making Made Right: This Czech Company Guides Global 3-D Printing Pandemic Response. [online] Forbes. Available at: <<https://www.forbes.com/sites/sarahgoehrke/2020/03/28/making-made-right-this-czech-company-guides-global-3-d-printing-pandemic-response/>> [Accessed 17 May 2021].
- [51] Accessdata.fda.gov. 2021. CFR - Code of Federal Regulations Title 21. [online] Available at: <<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=177>> [Accessed 23 May 2021].
- [52] Tappa, K. and Jammalamadaka, U., 2018. Novel Biomaterials Used in Medical 3D Printing Techniques. *Journal of Functional Biomaterials*, 9(1), pp.1-17.
- [53] Oth, O., Dauchot, C., Orellana, M. and Glineur, R., 2019. How to Sterilize 3D Printed Objects for Surgical Use? An Evaluation of the Volumetric Deformation of 3D-Printed Genioplasty Guide in PLA and PETG after Sterilization by Low-Temperature Hydrogen Peroxide Gas Plasma. *The Open Dentistry Journal*, 13(1), pp.410-417.
- [54] Arany, P., Róka, E., Mollet, L., Coleman, A., Perret, F., Kim, B., Kovács, R., Kazsoki, A., Zelkó, R., Gesztelyi, R., Ujhelyi, Z., Fehér, P., Váradi, J., Fenyvesi, F., Vecsernyés, M. and Bácskay, I., 2019. Fused Deposition Modeling 3D Printing: Test Platforms for Evaluating Post-Fabrication Chemical Modifications and In-Vitro Biological Properties. *Pharmaceutics*, 11(6), p.277.
- [55] Otero, J., Vijverman, A. and Mommaerts, M., 2017. Use of fused deposit modeling for additive manufacturing in hospital facilities: European certification directives. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 45(9), pp.1542-1546.
- [56] Fischer, R., Morris, D., van Doremalen, N., Sarchette, S., Matson, M., Bushmaker, T., Yinda, C., Seifert, S., Gamble, A., Williamson, B., Judson, S., de Wit, E., Lloyd-Smith, J. and Munster, V., 2020. Effectiveness of N95 Respirator Decontamination and Reuse against SARS-CoV-2 Virus. *Emerging Infectious Diseases*, 26(9), pp.2253-2255.
- [57] Yew, G., Mohd Yusof, A., Mohd Ishak, Z. and Ishiaku, U., 2005. Water absorption and enzymatic degradation of poly(lactic acid)/rice starch composites. *Polymer Degradation and Stability*, 90(3), pp.488-500.
- [58] Flashforge.com. 2021. Flashforge Professional 3D Printer Manufacture - FlashForge. [online] Available at: <<https://www.flashforge.com/>> [Accessed 23 May 2021].
- [59] Leica-microsystems.com. 2021. Leica DM2500 & DM2500 LED Optical microscope. [online] Available at: <<https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/p/leica-dm2500/>> [Accessed 1 July 2021].
- [60] Leica-microsystems.com. 2021. Leica DFC420. [online] Available at: <<https://www.leica-microsystems.com/products/microscope-cameras/p/leica-dfc420/>> [Accessed 1 July 2021].
- [61] Flir.com. 2021. How Do Thermal Cameras Work?. [online] Available at: <<https://www.flir.com/discover/rd-science/how-do-thermal-cameras-work/>> [Accessed 1 July 2021].
- [62] Roxtec Global. 2021. SP Swedish National Testing and Research Institute | Roxtec Global. [online] Available at: <https://www.roxtec.com/en/products/certificates/sp-swedish-national-testing-and-research-institute/?gclid=CjwKCAjwz_WGBhA1EiwAUAXIcWERFo41Pylio_IO-laHpQXt1cHEII2zhFDEiOKnIYpy1NJvp7KIQhOC41YQAvD_BwE> [Accessed 1 July 2021].
- [63] NIST. 2021. National Institute of Standards and Technology | NIST. [online] Available at: <<https://www.nist.gov/>> [Accessed 1 July 2021].

- [64] Onshape, a., 2021. Onshape | Product Development Platform. [online] Onshape.com. Available at: <<https://www.onshape.com/en/>> [Accessed 23 May 2021].
- [65] Leica-microsystems.com. 2021. Leica Application Suite. [online] Available at: <<https://www.leica-microsystems.com/products/microscope-software/p/leica-application-suite/>> [Accessed 1 July 2021].
- [66] Flir.com. 2021. Thermal Studio Suite | Teledyne FLIR. [online] Available at: <<https://www.flir.com/products/flir-thermal-studio-suite/>> [Accessed 1 July 2021].
- [67] Grinshpun, S., Haruta, H., Eninger, R., Reponen, T., McKay, R. and Lee, S., 2009. Performance of an N95 Filtering Facepiece Particulate Respirator and a Surgical Mask During Human Breathing: Two Pathways for Particle Penetration. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(10), pp.593-603.
- [68] Bolsover, S.M., 1992. Leakage measurements on wearers of respiratory protective equipment with facial hair/beards/spectacles: summary of a literature search. *J. Int. Soc. Respirat. Protect.* 10, pp.15–22.
- [69] Zhuang, Z., Groce, D., Ahlers, H., Iskander, W., Landsittel, D., Guffey, S., Benson, S., Viscusi, D. and Shaffer, R., 2008. Correlation Between Respirator Fit and Respirator Fit Test Panel Cells by Respirator Size. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(10), pp.617-628.
- [70] Zhuang, Z., Bradtmiller, B. and Shaffer, R., 2007. New Respirator Fit Test Panels Representing the Current U.S. Civilian Work Force. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(9), pp.647-659.
- [71] Winski, T., Mueller, W. and Graveling, R., 2019. If the mask fits: Facial dimensions and mask performance. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 72, pp.308-310.
- [72] Hay, Z., 2021. Best 3D printing temperature for PLA. [online] All3dp. Available at: <<https://all3dp.com/2/the-best-printing-temperature-for-different-filaments/>> [Accessed 24 June 2021].
- [73] Kim, J., Chung, Y., Jo, H., Lee, N., Kim, M., Woo, S., Park, S., Kim, J., Kim, H. and Han, M., 2020. Identification of Coronavirus Isolated from a Patient in Korea with COVID-19. *Osong Public Health and Research Perspectives*, 11(1), pp.3-7.
- [74] Jayaweera, M., Perera, H., Gunawardana, B. and Manatunge, J., 2020. Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. *Environmental Research*, 188, pp.61-62.
- [75] Microtrac.com. 2021. Toner Particles: Size and Shape Analysis :: Microtrac.com. [online] Available at: <<https://www.microtrac.com/knowledge/toner-particles/>> [Accessed 24 June 2021].
- [76] Asctoner8.en.made-in-china.com. 2021. China Toner manufacturer, Toner Cartridge, Toner Powder supplier - Cangzhou ASC Toner Production Ltd.. [online] Available at: <<https://asctoner8.en.made-in-china.com/>> [Accessed 24 June 2021].
- [77] Leica-microsystems.com. 2021. Leica DM2500 & DM2500 LED Optical microscope. [online] Available at: <<https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/p/leica-dm2500/>> [Accessed 24 June 2021].
- [78] 2021. ImageJ. [online] Available at: <<https://imagej.nih.gov/ij/>> [Accessed 28 June 2021].
- [79] Johnston, J., 2000. Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust. *Protection of the Human Environment Occupational Health and Environmental Health Series*, Geneva, 1999, World Health Organization WHO/SDE/OEH/99.14: English only. *The Annals of Occupational Hygiene*, 44(5), pp.1-4.
- [80] 00. A*STAR HQ Corporate Website. 2021. Explainer: Testing the Efficacy of Protective Face Masks. [online] Available at: <<https://www.a-star.edu.sg/News-and-Events/a-star-news/news/covid-19/explainer-testing-the-efficacy-of-protective-face-masks>> [Accessed 3 July 2021].
- [81] Rengasamy, S., Shaffer, R., Williams, B. and Smit, S., 2016. A comparison of facemask and respirator filtration test methods. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(2), pp.92-103.
- [82] Jiang, Z., Hu, M., Fan, L., Pan, Y., Tang, W., Zhai, G. and Lu, Y., 2021. COMBINING VISIBLE LIGHT AND INFRARED IMAGING FOR EFFICIENT DETECTION OF RESPIRATORY INFECTIONS SUCH AS COVID-19 ON PORTABLE DEVICE. *arXiv:2004.06912v1*, pp.1-9.
- [83] Surveillance Secure. 2021. Detecting People Not Wearing Masks with Thermal Cameras and Face Mask Detection Analytics - Surveillance Secure. [online] Available at:

- <<https://surveillancesecure.com/detecting-people-not-wearing-masks-with-thermal-cameras-and-face-mask-detection-analytics/>> [Accessed 4 July 2021].
- [84] Flir.com. 2021. Developing a Deep Learning Facemask Detection Prototype in Two Days. [online] Available at: <<https://www.flir.com/discover/iis/flir-deep-learning-solutions-enable-facemask-and-ppe-detection/>> [Accessed 4 July 2021].
- [85] Scarano, A., Inchingolo, F. and Lorusso, F., 2020. Facial Skin Temperature and Discomfort When Wearing Protective Face Masks: Thermal Infrared Imaging Evaluation and Hands Moving the Mask. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), pp.1-4.
- [86] Dei.gr. 2021. ΔΕΗ MyHome Enter | ΔΕΗ Α.Ε.. [online] Available at: <<https://www.dei.gr/el/oikiakoi-pelates/myhomeenter>> [Accessed 5 July 2021].
- [87] Pick 3D Printer. 2021. 3D Printer Material Cost: Ultimate Price Comparison - Pick 3D Printer. [online] Available at: <<https://pick3dprinter.com/3d-printer-material-cost/>> [Accessed 5 July 2021].
- [88] Ijoms.com. 2021. Home Page: International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. [online] Available at: <<https://www.ijoms.com/home>> [Accessed 5 July 2021].
- [89] Swennen, G., Pottel, L. and Haers, P., 2020. Custom-made 3D-printed face masks in case of pandemic crisis situations with a lack of commercially available FFP2/3 masks. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 49(5), pp.673-677.