

Κατ’ απαίτηση τρισδιάστατη εκτύπωση ιατρικού εξοπλισμού, για την ενίσχυση της υγειονομικής ετοιμότητας σε μελλοντικές πανδημίες

Κουσίδης Π., Νικολαΐδου Α.

«ΘΕΑΓΕΝΕΙΟ» Α.Ν.Θ.

Εισαγωγή

Στα αρχικά στάδια της πανδημίας COVID-19, παρουσιάστηκαν σημαντικές ελλείψεις μέσων ατομικής προστασίας (ΜΑΠ) και ιατρικών αναλωσίμων [1,2]. Η τρισδιάστατη εκτύπωση εξετάστηκε στη βιβλιογραφία ως μια ταχεία και οικονομικά αποδοτική δυνητική λύση, για την ανεξάρτητη παραγωγή ΜΑΠ και διαγνωστικού εξοπλισμού[1-3].

Σκοπός

Η ανασκόπηση των εξελίξεων της τρισδιάστατης εκτύπωσης, με έμφαση στην παραγωγή αναλωσίμων και διαγνωστικών εργαλείων, από την πανδημία COVID-19 έως σήμερα. Επιπρόσθετα, η εξέταση της δυνατότητας αυτόνομης, κατ’ απαίτηση παραγωγής λειτουργικών ΜΑΠ και ιατρικού εξοπλισμού σε πειραματικό πλαίσιο.

Υλικό και Μέθοδοι

Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση στις βάσεις δεδομένων PubMed και Google Scholar για την περίοδο 2019-2025, με στόχο τον εντοπισμό μελετών σχετικών με την τρισδιάστατη εκτύπωση διαγνωστικών εργαλείων και αναλωσίμων σε συνθήκες πανδημίας. Για τον εξοπλισμό που περιγραφόταν στις επιλεγμένες μελέτες, πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική εκτύπωση με τρισδιάστατο εκτυπωτή Bambu A1 (Bambu Lab, Shenzen, People’s Republic of China), με την τεχνική της μοντελοποίησης συντηγμένης εναπόθεσης (Fused Deposition Modelling, FDM). Διενεργήθηκε μέτρηση του χρόνου εκτύπωσης, του εκτιμώμενου κόστους καθώς και ποιοτική εκτίμηση του εξοπλισμού.

Εξοπλισμός	Χρόνος εκτύπωσης μονάδας	Κόστος μονάδας	Υλικά εκτύπωσης
Μάσκα PLA («Low poly COVID-19 face mask respirator, Thingiverse.com»)	58 λ 4 δ	0,71 €	Πολυγαλακτικό οξύ (PLA)
Στυλεός δειγματοληψίας	11 λ 43 δ	0,05 €	Τερεφθαλική γλυκόλη πολυαιθυλενίου (PETG) ιατρικών προδιαγραφών
Σωληνάριο μικροφυγοκέντρωσης	2 λ 18 δ	0,02 €	πολυπροπυλένιο (PP)
Διακλαδωτής κυκλώματος μηχανικού αερισμού με αντάπτορες (Ventsplitter)	4 ω 51 λ	10,94 €	τερεφθαλική γλυκόλη πολυαιθυλενίου (PETG) ιατρικών προδιαγραφών
Στηθοσκόπιο («Glia Stethoscope», τροποποιημένο)	2 ώ 17 λ 21 δ	3,20 €	Τερεφθαλική γλυκόλη πολυαιθυλενίου (PETG) και θερμοπλαστικό ελαστομερές (TPE)

Πίνακας 1. Ανάλυση του χρόνου εκτύπωσης, του κόστους και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τα είδη εξοπλισμού που παρήχθησαν. ώ: ώρες, λ: λεπτά, δ: δευτερόλεπτα.

Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

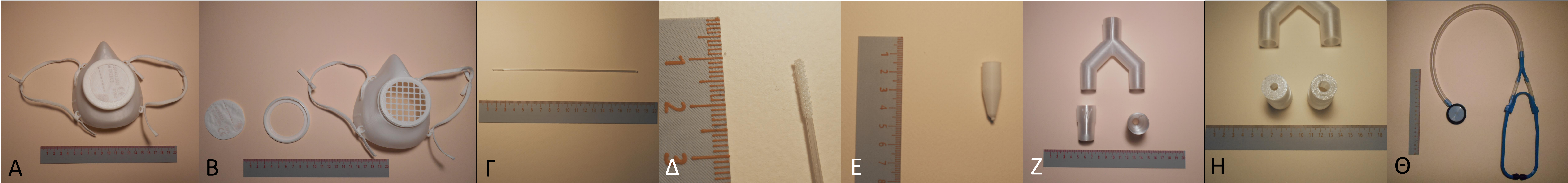
Υπάρχουν πολλαπλά διαθέσιμα τρισδιάστατα μοντέλα επαναχρησιμοποιούμενων ικριωμάτων μασκών προστασίας, με αντικατάσταση μόνο ενός τμήματος φίλτρου KN95, τα οποία επιτρέπουν την κατάτμηση και πολλαπλάσια χρήση κάθε μάσκας KN95. Μία πρόσφατη μελέτη έδωσε ενθαρρυντικά πρώτα δεδομένα για το μοντέλο της Εικόνας 1Α,Β σε πειραματική αξιολόγηση[1].

Η παραγωγή εύκαμπτων στυλεών δειγματοληψίας είναι εφικτή, με χαμηλό κόστος και υψηλή διαγνωστική συμφωνία με εμπορικά προϊόντα σε πειραματικό ωστόσο πλαίσιο[2-4]. Η παραγωγή από εκτυπωτές στερεολιθογραφίας (Stereolithography, SLA) ενδέχεται να υπερέχει από άποψη χρόνου εκτύπωσης και δυνατότητας μαζικής παραγωγής.

Οι διακλαδωτές κυκλώματος μηχανικού αερισμού εξετάστηκαν στη βιβλιογραφία για τον παράλληλο αερισμό περισσότερων του ενός ασθενών σε επείγουσες συνθήκες[5]. Η πιθανή εφαρμογή τους ωστόσο εμφανίζει σημαντικές τεχνικές δυσκολίες[6] καθώς και σημαντικά ζητήματα ασφαλείας. Ορισμένα μοντέλα είχαν αδειοδοτηθεί από τον Αμερικανικό Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων (U.S. Food and Drug Administration, FDA) με άδεια για επείγουσα χρήση (Emergency Use Authorization, EUA) την περίοδο της πανδημίας COVID-19[7].

Τρισδιάστατα μοντέλα στηθοσκοπίων είναι διαθέσιμα για εκτύπωση. Το μοντέλο της Glia (Glia Inc., Ontario, Canada) παρουσιάζει χαμηλό κόστος και συγκρίσιμες ακουστικές επιδόσεις με εμπορικά διαθέσιμα στηθοσκόπια σε μια μελέτη ωστόσο του κατασκευαστή[8].

Συμπερασματικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια δυνητικά αποτελεσματική μέθοδο ανεξάρτητης παραγωγής κρίσιμων αναλωσίμων. Η αποθήκευση υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης έναντι τελικού εξοπλισμού προσφέρει σημαντικό πλεονέκτημα κόστους και ευελιξίας. Μια ενιαία, διεθνής πλατφόρμα τρισδιάστατων μοντέλων, σε συνδυασμό με τεκμηριωμένες διαδικασίες ανεξάρτητης παραγωγής θα μπορούσε να ενισχύσει την παγκόσμια ετοιμότητα για μελλοντικές πανδημίες.



Εικόνα 1. Ιατρικός εξοπλισμός που παρήχθη με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης. **Α** Ικρίωμα μάσκας ατομικής προστασίας, συναρμολογημένο **Β** Ικρίωμα μάσκας ατομικής προστασίας, προ της συναρμολόγησης **Γ** Στυλεός δειγματοληψίας **Δ** Στυλεός δειγματοληψίας, άκρο **Ε** Σωληνάριο μικροφυγοκέντρωσης **Ζ**, **Η** Διακλαδωτής κυκλώματος μηχανικού αερισμού με αντάπτορες διαφόρων μεγεθών (Ventsplitter) **Θ** Στηθοσκόπιο («Glia Stethoscope», τροποποιημένο)

Σημείωση: Η παρούσα μελέτη είναι πειραματική. Η χρήση τρισδιάστατα εκτυπωμένου ιατρικού εξοπλισμού ο οποίος δεν είναι ρητά εγκεκριμένος από τις αρμόδιες αρχές δεν συνιστάται και μπορεί να ενέχει σημαντικούς κινδύνους. Συνιστάται η αποκλειστική χρήση πιστοποιημένου ιατρικού εξοπλισμού. Η τρισδιάστατη εκτύπωση απαιτεί πλήρη εναρμόνιση με τις οδηγίες χρήσης (IFUs) των κατασκευαστών και εφαρμογή των ενδεδειγμένων μέτρων προστασίας.

1. Levine M, Levine L, Xun H, et al. Face Off: 3D-Printed Masks as a Cost-Effective and Reusable Alternative to N95 Respirators: A Feasibility Study. *Am J Med.* 2022;135(9):1109-1115. doi:10.1016/j.amjmed.2022.04.026

2. Ford J, Goldstein T, Trahan S, Neuwirth A, Tatoris K, Decker S. A 3D-printed nasopharyngeal swab for COVID-19 diagnostic testing. *3D Print Med.* 2020;6(1):21. Published 2020 Aug 15. doi:10.1186/s41205-020-00076-3

3. Grandjean Lapiere S, Bedwani S, DeBlois F, et al. Clinical Evaluation of In-House-Produced 3D-Printed Nasopharyngeal Swabs for COVID-19 Testing. *Viruses.* 2021;13(9):1752. Published 2021 Sep 2. doi:10.3390/v13091752

4. Callahan CJ, Lee R, Zulauf KE, et al. Open Development and Clinical Validation of Multiple 3D-Printed Nasopharyngeal Collection Swabs: Rapid Resolution of a Critical COVID-19 Testing Bottleneck. *J Clin Microbiol.* 2020;58(8):e00876-20. Published 2020 Jul 23. doi:10.1128/JCM.00876-20

5. Neyman G, Irvin CB. A single ventilator for multiple simulated patients to meet disaster surge. *Acad Emerg Med.* 2006;13(11):1246-1249. doi:10.1197/j.aem.2006.05.009

6. Ayıldız S, Dursun AM, Yıldırım V, Ince ME, Güçelik MA, Erdöl C. 3D-Printed Splitter for Use of a Single Ventilator on Multiple Patients During COVID-19. *3D Print Addit Manuf.* 2020;7(4):181-185. doi:10.1089/3dp.2020.0102

7. United States Food and Drug Administration. *Ventilators and Ventilator Accessories EUAs.* url:https://www.fda.gov/medical-devices/covid-19-emergency-use-authorizations-medical-devices/ventilators-and-ventilator-accessories-euas. Προσπελάστηκε στις 15/12/2025.

8. Pavlosky A, Glauche J, Chambers S, Al-Alawi M, Yanev K, Loubani T. Validation of an effective, low cost, Free/open access 3D-printed stethoscope. *PLoS One.* 2018;13(3):e0193087. Published 2018 Mar 14. doi:10.1371/journal.pone.0193087