



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

**Σχεδίαση και κατασκευή συσκευασίας  
αισθητήρα SARS-CoV-2 μέσω  
τρισδιάστατης εκτύπωσης**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Λάμπρος Ι. Νέστωρας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2022





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

**Σχεδίαση και κατασκευή συσκευασίας**

**αισθητήρα SARS-CoV-2 μέσω**

**τριδιάστατης εκτύπωσης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λάμπρος Νέστωρας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22<sup>η</sup> Ιουνίου 2022.

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Αργύρης Σολδάτος  
Δρ. Ηλεκτρολόγος  
Μηχανικός, Ε.ΔΙ.Π



.....  
Λάμπρος Αρτέμιος Ι. Νέστωρας

Διπλωματούχος Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ

Copyright © Λάμπρος Νέστωρας, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

---

Η χρήση τεχνολογιών εναπόθεσης διαδοχικών στρώσεων υλικού (Fused Deposition Modelling), ευρύτερα γνωστής ως τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing) έχει γνωρίσει ραγδαία εξέλιξη τόσο στον επαγγελματικό τομέα όσο και στον ερασιτεχνικό. Ο λόγος για αυτό είναι επειδή η τεχνολογία αυτή ευνοεί ιδιαίτερα θέματα ταχείας κατασκευής ενός πρωτοτύπου (rapid prototyping) είτε αυτό είναι σε κλίμακα είτε σε φυσικό μέγεθος με τελικό στόχο της ανάπτυξη ενός καινοτόμου προϊόντος.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι σχεδίαση και η κατασκευή, μέσω τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης, θήκης και περιβλήματος για την διασύνδεση, μέτρηση και προστασία του αισθητήρα μέτρησης SARS-CoV-2 , καθώς και του ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης αυτού, τα οποία αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων του τμήματος ΗΜΜΥ του ΕΜΠ.

Συγκεκριμένα σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τα παρακάτω. Θήκη για τον πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων με σκοπό ο χρήστης να μην έρχεται σε φυσική επαφή με αυτόν. Διάταξη που εξασφαλίζει την αγωγή επαφή των ηλεκτροδίων του πυκνωτή με την έξοδο προς το κύκλωμα μέτρησης, καθώς και το περίβλημα της συσκευής μέτρησης με κατάλληλες εισόδους και εξόδους για την μέτρηση και την τροφοδοσία αντίστοιχα.

**Λέξεις-κλειδιά:** *Τρισδιάστατη Εκτύπωση, Ενδοδιαπλεκόμενα Ηλεκτρόδια, Τεχνικές Συσχευασίας, Τρισδιάστατη Σχεδίαση, Αισθητήρες*



# Abstract

---

The use of fused deposition modeling technologies, commonly known as 3D printing, has evolved rapidly in both professional and hobbyist sectors. The reason is because this technology favors rapid prototyping issues, both in scale and in physical size with the ultimate goal of developing an innovative product.

The main purpose of this Thesis is the design and manufacturing, via 3D printing technologies, of the packaging for the SARS-CoV-2 sensor which has been developed in the Laboratory of Electronic Sensors from the School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens. The packaging consists of two parts. The first part is an enclosure for the interdigitated capacitor which is coated with the ACE2 enzyme and the second part is the packaging of the electronic device which is responsible for measuring that change in capacitance.

More specifically, the capacitor packaging, besides housing, provides the unobscured electrical connection of the capacitor's electrodes with the measuring device and also ensures that the user does not have to come in contact with the capacitor. The packaging of the measuring device protects the circuit from environmental hazards, and has proper holes for the input and output functions of the device.

**Keywords:** *3D printing, Interdigitated Electrodes, Electronic Packaging, Sensors*





# Πρόλογος – Ευχαριστίες

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Αντώνη Γεωργά για την άψογη συνεργασία και επικοινωνία που είχαμε κατά την διάρκεια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή Ε. Χριστοφόρου για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε όλο αυτό το καιρό, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της Επιτροπής, Π. Τσαραμπάρη και Α. Σολδάτο.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους συμφοιτητές μου, Παπασίμπα Δημήτριο και Τσίνη Ματθαίο για την ανεκτίμητη βοήθεια που παρείχαν σε καθημερινή σχεδόν βάση.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Ματίνα και τους φίλους μου για την συμπαράσταση που μου παρείχαν.



# Πίνακας Περιεχομένων

---

Περίληψη .....	iv
Abstract .....	vi
Πρόλογος – Ευχαριστίες .....	viii
Πίνακας Περιεχομένων .....	x
Ευρετήριο Εικόνων.....	xiii
Ευρετήριο Πινάκων .....	xvii
Συνομογραφίες.....	xviii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας.....	1
1.2 Τρισδιάστατη Σχεδίαση και Εκτύπωση .....	1
1.2.1 Τι είναι η Τρισδιάστατη Εκτύπωση .....	1
1.2.2 Ιστορική Αναδρομή .....	2
1.2.3 Εμπορευματοποίηση.....	4
1.3 Είδη Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	6
1.3.1 Fused Deposition Modelling (FDM).....	7
1.3.2 Stereolithography (SLA).....	9
1.3.3 Digital Light Processing (DLP) .....	11
1.3.4 Μέθοδοι Ψεκασμού .....	12
1.4 Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	14
1.4.1 Τεμαχισμός.....	14
1.4.2 Ρυθμίσεις τεμαχισμού.....	15
2 Τεχνικές Συσχευασίας Ηλεκτρονικών Συσκευών .....	23
2.1 Μεθοδολογία σχεδίασης συσκευασίας.....	24
2.2 Πλεονεκτήματα κατασκευής με τρισδιάστατη εκτύπωση.....	24
3 Στόχος της Εργασίας και προδιαγραφές .....	25
3.1 Στόχος της Εργασίας.....	25
3.2 Προδιαγραφές Σχεδίασης .....	25

3.2.1	Πυκνωτής Ενδοδιαπλεκόμενων Ηλεκτροδίων .....	25
3.2.2	Συσκευή μέτρησης.....	27
4	Σχεδίαση .....	30
4.1	Πυκνωτής Ενδοδιαπλεκόμενων Ηλεκτροδίων .....	30
4.1.1	Πρώτη έκδοση .....	30
4.1.2	Δεύτερη έκδοση .....	34
4.1.3	Τρίτη έκδοση .....	39
4.2	Συσκευή μέτρησης χωρητικότητας .....	47
5	Κατασκευή .....	51
5.1	Κατασκευή συσκευασίας πυκνωτή .....	51
5.1.1	Πρώτη έκδοση .....	51
5.1.2	Δεύτερη έκδοση .....	53
5.1.3	Τρίτη έκδοση .....	55
5.2	Κατασκευή συσκευασίας συσκευής μέτρησης.....	58
6	Συμπεράσματα.....	63
6.1	Αποτελέσματα .....	63
6.2	Μελλοντική Εργασία .....	64
7	Βιβλιογραφία .....	66



# Ευρετήριο Εικόνων

---

Εικόνα 1 – Ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής της εταιρίας 3D Systems [31]....	2
Εικόνα 2 – Ο μηχανισμός των S. Scott και Lisa Crump του πρώτου FDM εκτυπωτή[7].....	3
Εικόνα 3 – Εξέλιξη των εκτυπωτών RepRap .....	4
Εικόνα 4 – Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές Fab@Home Model 1 και Model 2 [8] ....	5
Εικόνα 5 - Στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου FDM .....	8
Εικόνα 6 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου SLA.....	9
Εικόνα 7 – Στάδια διαμόρφωσης αντικειμένου κατά την Στερεολιθογραφία.....	10
Εικόνα 8 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου DLP .....	11
Εικόνα 9 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπος Binder Jetting.....	12
Εικόνα 10 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου Material Jetting .....	13
Εικόνα 11 – Το περιβάλλον του λογισμικού Simplify3D® .....	15
Εικόνα 12 – Ρυθμίσεις εξώθησης (extruder).....	15
Εικόνα 13 – Παράδειγμα υπό και ύπερ εξώθησης .....	16
Εικόνα 14 – Ρυθμίσεις στρώσης .....	17
Εικόνα 15 – Ρυθμίσεις πλήρωσης .....	18
Εικόνα 16 – Παράδειγμα ποσοστού πλήρωσης .....	18
Εικόνα 17 – Ρυθμίσεις υποστηρικτικού υλικού .....	19
Εικόνα 18 – Παράδειγμα χρήσης υποστηρικτικού υλικού.....	20
Εικόνα 19 – Ρυθμίσεις θερμοκρασίας.....	20
Εικόνα 20 – Ρυθμίσεις ψύξης .....	21
Εικόνα 21 – Ρυθμίσεις ταχύτητας.....	22
Εικόνα 22 – Πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων .....	25
Εικόνα 23 – Ο πυκνωτής PW-IDEAU50.....	26
Εικόνα 24 – Συσκευή μέτρησης χωρητικότητας [1] .....	27
Εικόνα 25 – Οθόνη LCD.....	28
Εικόνα 26 – Διακόπτης αλλαγής κλίμακας και κουμπιά αλληλεπίδρασης.....	28

Εικόνα 27 – Θύρες μέτρησης.....	29
Εικόνα 28 – Χαρακτηριστικά πυκνωτή .....	30
Εικόνα 29 – Μεταλλικά ελάσματα διασύνδεσης πυκνωτή.....	31
Εικόνα 30 – Κάτοψη και μπροστινή όψη πρώτης έκδοσης .....	32
Εικόνα 31 – Μπροστινή όψη πρώτης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή .....	33
Εικόνα 32 – Πίσω όψη πρώτης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή .....	34
Εικόνα 33 - Κυλινδρικά ρουλεμάν τύπου 623ZZ .....	35
Εικόνα 34- Κομμάτι στήριξης ρουλεμάν .....	35
Εικόνα 35 – Βάση δεύτερης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή .....	36
Εικόνα 36 – Καπάκι δεύτερης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή .....	37
Εικόνα 37 – Μπροστινή και πίσω όψη του τρισδιάστατου μοντέλου της δεύτερης έκδοσης.....	37
Εικόνα 38 – Κάτοψη και πλάγια όψη της βάσης της δεύτερης έκδοσης.....	38
Εικόνα 39 – Κάτοψη και πλάγια όψη οδηγού .....	38
Εικόνα 40 – Οδηγοί του μηχανισμού στερέωσης τρίτης έκδοσης.....	40
Εικόνα 41 – Μηχανισμός στερέωσης της τρίτης έκδοσης .....	41
Εικόνα 42 – Μπροστινή και πίσω όψη του τρισδιάστατου μοντέλου της βάσης της τρίτης έκδοσης.....	42
Εικόνα 43 – Τρισδιάστατο μοντέλο μηχανισμού στερέωσης .....	42
Εικόνα 44 – Θήκη συγκράτησης πυκνωτή τρίτης έκδοσης .....	43
Εικόνα 45 – Μπροστινή και πίσω όψη του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου της τρίτης έκδοσης .....	43
Εικόνα 46 – Κάτοψη βάσης συσκευασίας πυκνωτή τρίτης έκδοσης.....	44
Εικόνα 47 – Μπροστινή όψη βάσης συσκευασίας πυκνωτή τρίτης έκδοσης .....	44
Εικόνα 49 – Κάτοψη και μπροστινή όψη μηχανισμού στερέωσης ελασμάτων ..	45
Εικόνα 48 – Κάτοψη και μπροστινή όψη μηχανισμού στερέωσης.....	45
Εικόνα 50 – Κάτοψη και μπροστινή όψη θήκης πυκνωτή .....	46
Εικόνα 51 – Μορφολογία υψών συσκευής μέτρησης χωρητικότητας .....	47
Εικόνα 52 - Πλάγια όψη συσκευασίας συσκευής μέτρησης.....	47
Εικόνα 53 – Κάτω μέρος συσκευασίας συσκευής μέτρησης .....	48
Εικόνα 54 – Καπάκι άνω μέρους της συσκευασίας .....	49



Εικόνα 55 – Μπροστινή και πίσω όψη του τρισδιάστατου μοντέλου της συσκευασίας.....	50
Εικόνα 56 – Καπάκι κάτω μέρους.....	50
Εικόνα 57 – Διαδικασία τεμαχισμού της πρώτης έκδοσης.....	51
Εικόνα 58 – Κατασκευή πρώτης έκδοσης .....	52
Εικόνα 59 – Πρώτη έκδοση συσκευασίας με τον πυκνωτή .....	53
Εικόνα 60 – Τεμαχισμός σχεδίου οδηγών και καπακιού δεύτερης έκδοσης .....	53
Εικόνα 61- Τεμαχισμός σχεδίου βάσης δεύτερης έκδοσης .....	54
Εικόνα 62 – Κατασκευή συσκευασίας δεύτερης έκδοσης.....	55
Εικόνα 63 – Τεμαχισμός τρίτης έκδοσης.....	56
Εικόνα 64 – Επιμέρους στοιχεία της τρίτης έκδοσης.....	57
Εικόνα 65 – Τελική κατασκευής τρίτης έκδοσης.....	57
Εικόνα 66 – Εκτύπωση βάσης συσκευασίας συσκευής μέτρησης.....	59
Εικόνα 67 – Τεμαχισμός βάσης συσκευασίας συσκευής μέτρησης .....	59
Εικόνα 68 – Διαδικασία τεμαχισμού καπακιών .....	60
Εικόνα 69 - Συναρμολόγηση συσκευασίας πριν τη τελική επεξεργασία.....	61
Εικόνα 71 – Τελική συσκευασία συσκευής μέτρησης.....	62
Εικόνα 70 – Τελικές συσκευασίες πυκνωτή και συσκευής μέτρησης.....	62
Εικόνα 72 – Επιτυχής μέτρηση χωρητικότητας.....	64



# Ευρετήριο Πινάκων

---

Πίνακας 1 – Οι επτά κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	6
Πίνακας 2 – Κατηγορίες Υλικών εκτύπωσης FDM.....	7
Πίνακας 3 – Είδη υλικών Στερεολιθογραφίας.....	10
Πίνακας 4 – Παράμετροι εκτύπωσης πρώτης έκδοσης .....	52
Πίνακας 5 – Παράμετροι εκτύπωσης δεύτερης έκδοσης .....	54
Πίνακας 6 – Παράμετροι εκτύπωσης τρίτης έκδοσης.....	56
Πίνακας 7 – Παράμετροι εκτύπωσης βάσης .....	58
Πίνακας 8 – Παράμετροι εκτύπωσης καπακιών .....	60

# Συντομογραφίες

---

FDM – Fused Deposition Modelling

CAD – Computer Aided Design

SLA – Stereolithography

DLP – Digital Light Processing

NPJ – Nanoparticle Jetting

DOD – Drop on Demand

STL - Standard Tessellation Language

CAM – Computer Aided Manufacturing

IC – Integrated Circuit

MEMS - micro-electromechanical system

RFID – Radio Frequency Identification

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Μετά τη δημιουργία και την ορθή λειτουργία του αισθητήρα ανίχνευσης του ιού SARS-CoV-2 από το Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων του τμήματος ΗΜΜΥ του ΕΜΠ [1] [2], προέκυψε η ανάγκη για την κατάλληλη συσκευασία όλης της διάταξης, η οποία αποτελείται από έναν πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, στην επιφάνεια του οποίου έχει ακινητοποιηθεί το ένζυμο - υποδοχέας ACE2 και τη συσκευή μέτρησης της χωρητικότητας αυτού. Μέσω της συσκευασίας θα πρέπει να επιτυγχάνεται η ομαλή και διαρκής σύνδεση των ηλεκτροδίων του πυκνωτή με τη συσκευή μέτρησης, η προστασία όλης της διάταξης, καθώς επίσης και ο χειριστής να μην έρχεται σε άμεση επαφή με τα δείγματα. Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η σχεδίαση και η κατασκευή συσκευασιών για όλα τα μέρη της διάταξης, με βάση τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν, μέσω κατεργασιών τρισδιάστατης εκτύπωσης με εναπόθεση στρώσεων υλικού (FDM).

## 1.2 Τρισδιάστατη Σχεδίαση και Εκτύπωση

### 1.2.1 Τι είναι η Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια μέθοδος κατεργασίας, με την οποία μπορούν να κατασκευαστούν τρισδιάστατα αντικείμενα μέσω εναπόθεσης διαδοχικών στρώσεων υλικού. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως πολυμερή πλαστικά, αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί εκτυπωτές κεραμικών, όπως και μετάλλων. Σαν διαδικασία, παρόλο που βρίσκεται ακόμα σε εξελισσόμενο στάδιο, μπορούμε να πούμε ότι αποτελείται από τρία κύρια μέρη[3], τα οποία αναλύονται εις βάθος και στη συνέχεια :

1. Σχεδίαση του μοντέλου σε κάποιο εξειδικευμένο λογισμικό CAD (Computer Aided Design)
2. Τεμαχισμός (slicing) του μοντέλου και παραγωγή G-code
3. Εκτύπωση του αντικειμένου και τελική επεξεργασία

### 1.2.2 Ιστορική Αναδρομή

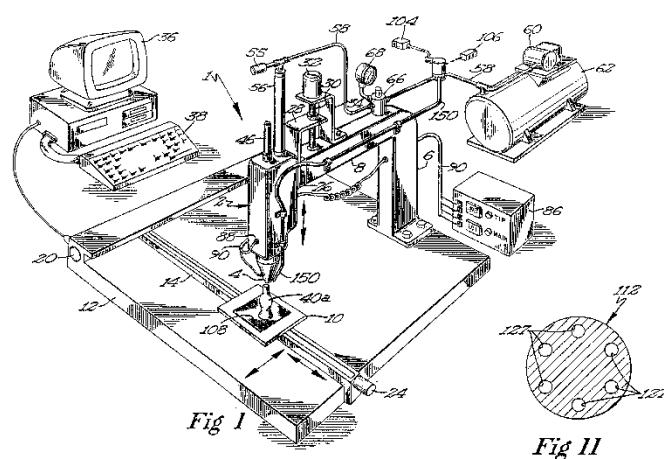
Η έννοια της τρισδιάστατης εκτύπωσης ξεκινά από τα μέσα του 1945, όπου εμφανίστηκε σε λογοτεχνικά κείμενα [4], [5] αλλά δεν ήταν πριν το 1986, όπου δόθηκε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον Chuck Hull[6] για την τεχνολογία που τότε ονομάστηκε Στερεολιθογραφία (SLA - Stereolithography). Στη συνέχεια, ο ίδιος ίδρυσε την εταιρία 3D Systems®, μέσω της οποίας έγινε εμπορικά διαθέσιμος ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής (Εικόνα 1) και η οποία ακόμα και σήμερα δραστηριοποιείται στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.



*Εικόνα 1 – Ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής της εταιρίας 3D Systems [31]*

Τα τεχνολογικά άλματα από το 1984 μέχρι και σήμερα, όπου οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν γίνει προσβάσιμοι, ακόμα και σε ερασιτεχνικό επίπεδο, ήταν τεράστια[7]. Ένα από αυτά ήταν όταν το 1989 οι S. Scott και Lisa Crump ίδρυσαν την εταιρία Stratasys και κατέθεσαν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας [8] για μια μορφή ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων, την οποία ονόμασαν Fused Deposition Modelling (FDM).

Η πατέντα αυτή, που φαίνεται στην Εικόνα 2, ήταν η αρχή της τεχνικής αυτού που ξέρουμε σήμερα σαν τρισδιάστατη εκτύπωση εναπόθεσης υλικού και αφορούσε έναν μηχανισμό στον οποίο νήμα υλικού θερμαίνεται σε μια καθορισμένη θερμοκρασία τήξης και στη συνέχεια εξωθείται μέσω κινητήρων σε επίσης θερμαινόμενη επιφάνεια σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία πήξης του υλικού. Αυτό είχε ως σκοπό τη βελτιστοποίηση της προσκόλλησης των διαδοχικών στρωμάτων.



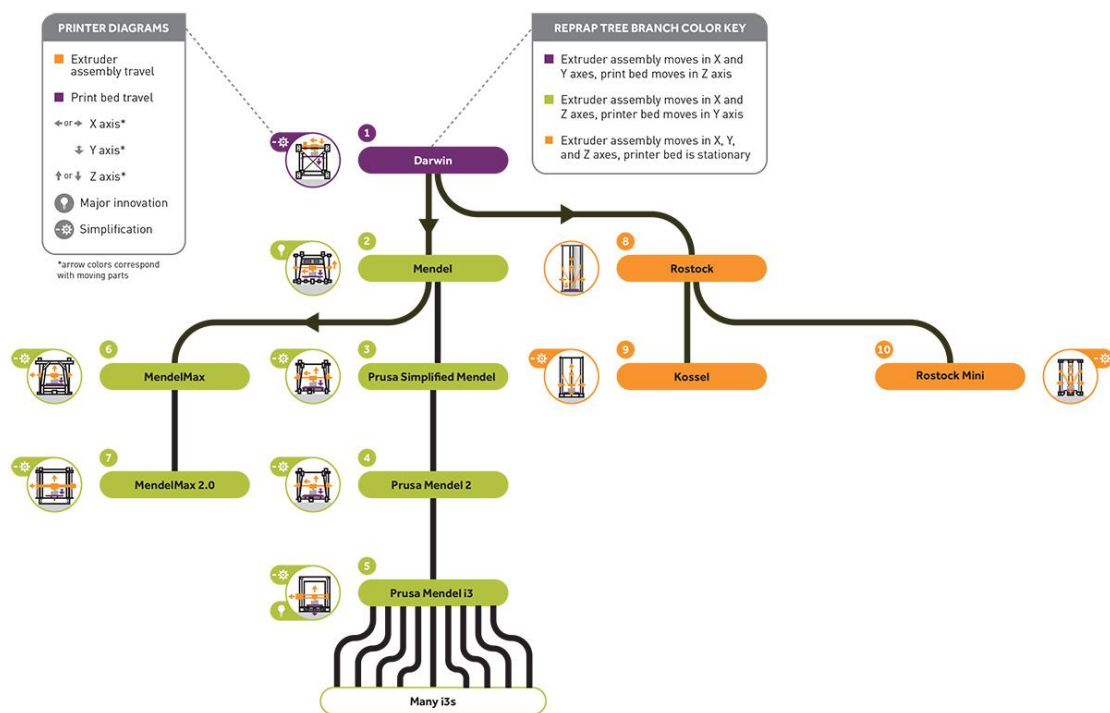
U.S. Patent  
Aug. 23, 1994  
Sheet 1 of 6  
5,340,433

Εικόνα 2 – Ο μηχανισμός των S. Scott και Lisa Crump του πρώτου FDM εκτυπωτή[8]

### 1.2.3 Εμπορευματοποίηση

Μέχρι και το 2005, όπου το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία FDM της Stratasys έληξε, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δεν ήταν προσιτοί για το ευρύ κοινό παρά μόνον για εταιρίες. Εκείνη την περίοδο ξεκίνησαν δύο νέες πρωτοβουλίες, το RepRap Project[9] και το Fab@Home [10], για την ανάπτυξη και την κοινή χρήση της τεχνολογίας αυτής με σκοπό να γίνει προσιτή σε ένα ευρύτερο φάσμα ανθρώπων.

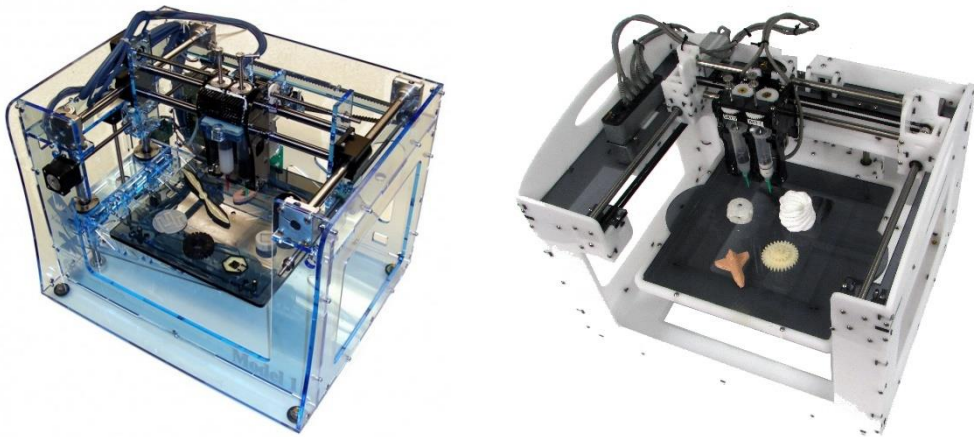
Το RepRap project [9] ξεκίνησε στην Αγγλία από τον Δρ. Adrian Bowyer στο Πανεπιστήμιο του Bath για την ανάπτυξη ενός εκτυπωτή χαμηλού κόστους, ικανού να παράγει τα ίδια του τα εξαρτήματα. Όλα τα σχέδια ήταν ανοιχτά προς το κοινό, με αποτέλεσμα οι χρήστες να μπορούν να κάνουν μετατροπές και αλλαγές στο αρχικό σχέδιο. Αυτό οδήγησε στη ραγδαία εξέλιξη του πρώτου RepRap εκτυπωτή ο οποίος εξελίχθηκε σε πάρα πολλές εκδοχές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Ο Prusa Mendel 3 έμελλε να γίνει βάση για μια τεράστια γκάμα εκτυπωτών με το όνομα i3.



Εικόνα 3 – Εξέλιξη των εκτυπωτών RepRap [32]



Η πρωτοβουλία Fab@Home είχε τον ίδιο στόχο με την πρωτοβουλία του RepRap Project, δηλαδή τη δημιουργία ενός προσαρμόσιμου τρισδιάστατου εκτυπωτή χαμηλού κόστους, προσιτό στο ευρύτερο κοινό. Το εγχείρημα αυτό αναπτύχθηκε από μέλη του Πανεπιστημίου Cornell και η πρώτη επίσημη έκδοση του τρισδιάστατου εκτυπωτή Fab@Home Model 1 (Εικόνα 4) κυκλοφόρησε το 2006. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των φοιτητών του Πανεπιστημίου, εκδόθηκε ο Fab@Home Model 2 (Εικόνα 4) με κύριες αναβαθμίσεις την εύκολη συναρμολόγηση, την απουσία ηλεκτρικών κολλήσεων και την ύπαρξη λιγότερων κομματιών[11]. Το 2012 το εγχείρημα σταμάτησε, έχοντας επιτύχει το σκοπό του, καθώς οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είχαν ήδη γίνει προσιτοί σε κάθε καταναλωτή.



Εικόνα 4 – Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές Fab@Home Model 1 και Model 2 [9]

### 1.3 Είδη Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Όπως έχει αναφερθεί, ο όρος τρισδιάστατη εκτύπωση αφορά ένα σύνολο τεχνολογιών κατεργασίας. Το πρότυπο ISO/ASTM 52900[12] που δημιουργήθηκε το 2015, στοχεύει στην κατηγοριοποίηση των κατεργασιών αυτών σε επτά κατηγορίες συνολικά, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 - Οι επτά κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης

	Είδος Τεχνολογίας	Σύντομη περιγραφή	Σχετιζόμενα είδη τρισδιάστατης εκτύπωσης
1	Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion)	Εξώθηση τηγμένου υλικού προς την κεφαλή εκτύπωσης	FDM
2	Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)	Φωτοπολυμερισμός ρητίνης μέσω δέσμης laser	SLA, DLP
3	Εκτόξευση υλικού (Material Jetting)	Ελεγχόμενος ψεκασμός υλικού και σκλήρυνση μέσω ακτινοβολίας	PolyJet, Nanoparticles Jetting (NPJ), Drop-On Demand (DOD)
4	Εκτόξευση συνδετικών μεσών (Binder Jetting)	Ψεκασμός συνδετικού υγρού με σκοπό την ένωση υλικού σε σκόνη	BI
5	Κλίνη κόνεως σύντηξης (Powder Bed Fusion)	Για την τήξη και τη σύντηξη σκόνης υλικού μαζί χρησιμοποιείται μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων	SLS, SLM, DMLS, EBM
6	Ελασματοποίηση σε φύλλα (Sheet Lamination)	Λεπτά φύλλα υλικού συνδέονται μεταξύ τους στρώμα-στρώμα για να σχηματίσουν το αντικείμενο	LOM, SLCOM
7	Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)	Τροφοδοσία υλικού σε μια ενεργειακή πηγή για να σχηματιστεί ένα πυροσυσσωματωμένο στρώμα σε ένα υπόστρωμα	Laser-based, Electron beam-based, Plasma or Electric arc-based

Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή μερικών από τις επτά κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης.

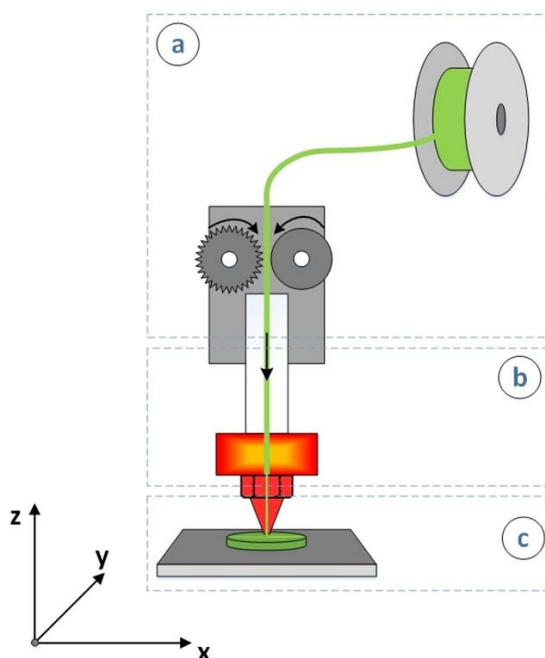
### 1.3.1 Fused Deposition Modelling (FDM)

Η τεχνολογία αυτή είναι η πιο γνωστή και πιο προσιτή από όλες τις υπόλοιπες, καθώς χρησιμοποιείται στους περισσότερους εμπορικούς και μη, τρισδιάστατους εκτυπωτές. Για την εκτύπωση χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικά πολυμερή, μερικά από τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 2, μαζί με κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία. Η ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί μέσω αυτής της τεχνικής μπορεί να είναι από 0.3mm μέχρι και 0.1 mm, κάτι που εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της κεφαλής εκτύπωσης, αλλά και από ένα πλήθος άλλων παραγόντων που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Πίνακας 2 - Κατηγορίες Υλικών εκτύπωσης FDM

Όνομασία	Ιδιότητες	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης (°C)
PLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Άοσμο</li> <li>• Μικρές παραμορφώσεις</li> <li>• Φιλικό προς το περιβάλλον</li> <li>• Χαμηλές θερμοκρασίες εκτύπωσης</li> </ul>	205 ± 15	50 ± 10
ABS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανθεκτικό στη θερμότητα</li> <li>• Μεγάλη Μηχανική Αντοχή</li> </ul>	225 ± 25	100 ± 10
PETG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανοχή σε φαινόμενα αποκόλλησης</li> <li>• Κατάλληλο για τρόφιμα</li> </ul>	240 ± 20	70 ± 10
HIPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διαλυτό σε Λεμονένιο</li> <li>• Παρόμοιες με αυτές του ABS</li> </ul>	235 ± 15	95 ± 5
Nylon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή αντοχή στη φθορά</li> <li>• Υψηλή ελαστικότητα</li> </ul>	240 ± 20	90 ± 10

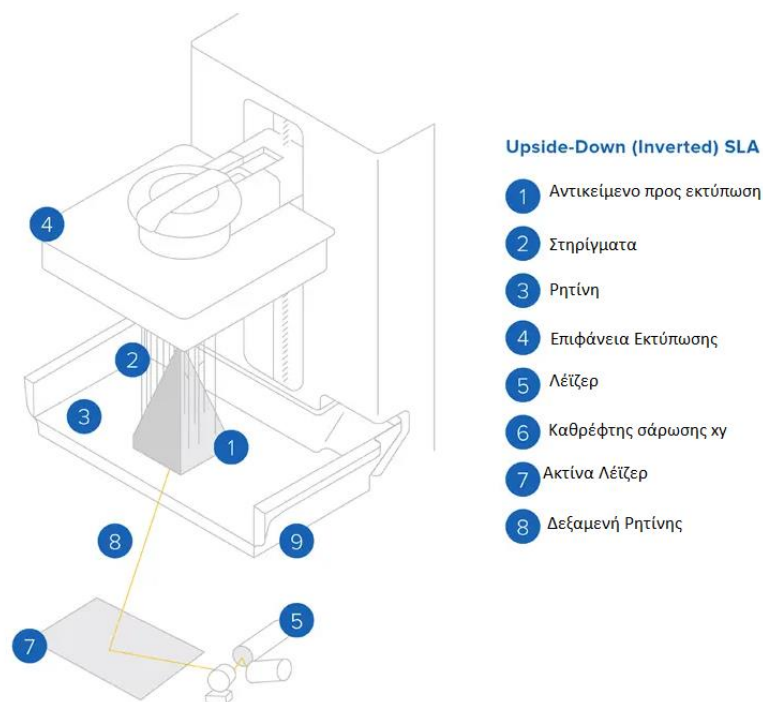
Η διαδικασία αποτελείται από 3 στάδια [13] όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5. Στο πρώτο στάδιο, το νήμα, είτε μέσω σωλήνα PTFE (Bowden), είτε απευθείας (Direct) εισέρχεται στο εξάρτημα που ονομάζεται hotend. Στο τέλος του hotend υπάρχει η κεφαλή εκτύπωσης (nozzle), η οποία θερμαίνεται μέσω θερμίστορ NTC σε κατάλληλη θερμοκρασία, η οποία εξαρτάται από το υλικό. Το λιωμένο πλέον υλικό εναποτίθεται σε επίσης θερμαινόμενη επιφάνεια, την επιφάνεια εκτύπωσης (hotbed). Αυτές οι δύο θερμοκρασίες παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην επιτυχία της κατεργασίας, καθώς συμβάλλουν στη συγκόλληση των στρώσεων μεταξύ τους, αλλά και μεταξύ της πρώτης στρώσης και της επιφάνειας, ώστε να μη δημιουργηθούν φαινόμενα αποκόλλησης (warping).



Εικόνα 5 - Στάδια τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου FDM [33]

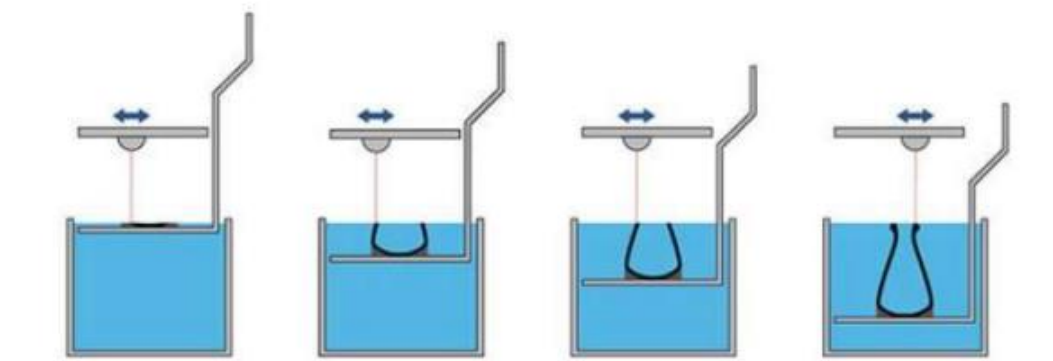
### 1.3.2 Stereolithography (SLA)

Η Στερεολιθογραφία, η οποία εφευρέθηκε από τον Charles Hull το 1984, έχει ως αρχή λειτουργίας τον ελεγχόμενο φωτοπολυμερισμό ρευστών ρητινών μέσω δέσμης λέιζερ για τη δημιουργία των τρισδιάστατων αντικειμένων[14]. Η βασική διαφορά της Στερεολιθογραφίας, σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η υψηλή ανάλυση εκτύπωσης, η οποία εξαρτάται από τη δέσμη λέιζερ που θα χρησιμοποιηθεί. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί φωτοπολυμερές υλικό εντός μιας δεξαμενής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, το οποίο μπορεί να στερεοποιηθεί κατά την έκθεση του σε πηγή φωτός όπως ακτίνες χ, γ ή την πλέον επικρατέστερη ακτινοβολία UV, η οποία βοηθά στην άμεση απορρόφηση από τη ρητίνη και οδηγεί σε ταχύτερο φωτοπολυμερισμό [15].



Εικόνα 6 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου SLA [34]

Η επιφάνεια εκτύπωσης βυθίζεται στη δεξαμενή αυτή σε βάθος ίσο με το επιθυμητό πάχος και μια κεφαλή λέιζερ σαρώνει τις κατάλληλες περιοχές της επιφάνειας, όπως ορίζονται από το σχέδιο CAD. Στη συνέχεια, βυθίζεται όσο το πάχος της επόμενης διατομής και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου ολοκληρωθεί το αντικείμενο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Τέλος, το εκτυπωμένο αντικείμενο μπαίνει σε θάλαμο πλύσης και σκλήρυνσης.



Εικόνα 7 – Στάδια διαμόρφωσης αντικειμένου κατά την Στερεολιθογραφία [35]

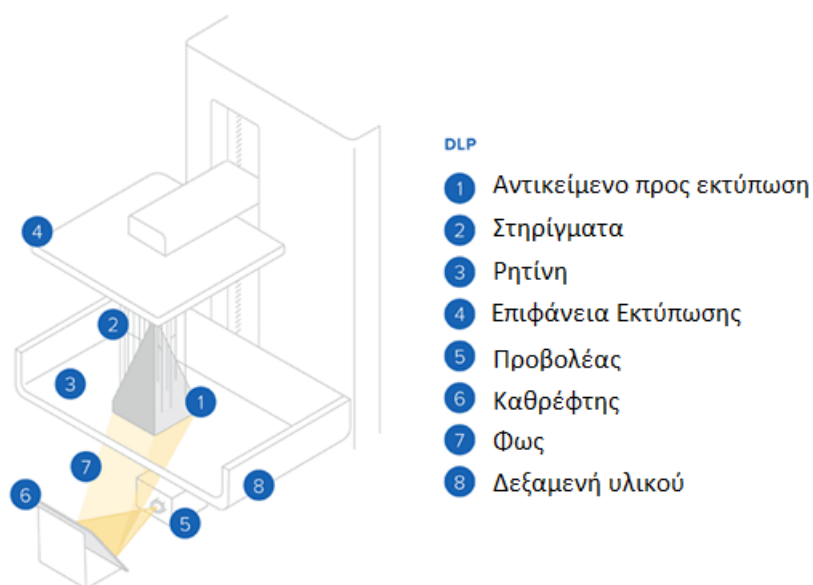
Τα θερμοσκλήρυντικά πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται καλούνται συνήθως ρητίνες και μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες [16]

Πίνακας 3 – Είδη υλικών Στερεολιθογραφίας

Είδος Ρητίνης	Χρήση
Τυπικές	Γενική χρήση – Ταχεία προτυποποίηση
Μηχανολογικές	Όταν υπάρχει ανάγκη για συγκεκριμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες
Οδοντιατρικές και Ιατρικές	Ορθοδοντικά μοντέλα και πιστοποιήσεις βιοσυμβατότητας
Χυτεύσεως	Μείωση προϊόντων καύσης

### 1.3.3 Digital Light Processing (DLP)

Η αρχή λειτουργίας αυτής της τεχνικής είναι παρόμοια με τη Στερεολιθογραφία, όπου η επιφάνεια εκτύπωσης εισέρχεται σε μια δεξαμενή με το φωτοπολυμερές υλικό, με τη διαφορά όμως ότι χρησιμοποιείται απλούστερη μορφή φωτός, αντί για laser [17]. Ένας ψηφιακός προβολέας αναβοσβήνει την εικόνα της διατομής του σχεδίου προς εκτύπωση, επομένως η σκλήρυνση επιτυγχάνεται ταυτόχρονα για όλα τα σημεία όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.

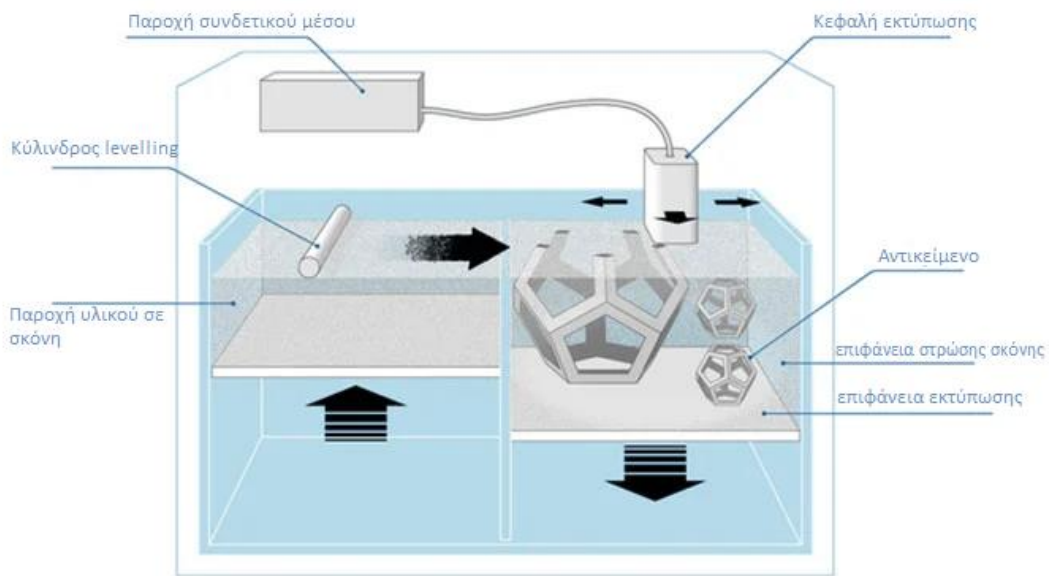


Εικόνα 8 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου DLP [34]

### 1.3.4 Μέθοδοι Ψεκασμού

#### **Μέθοδος ψεκασμού συνδετικού μέσου – Binder Jetting**

Τα κύρια υλικά κατασκευής αντικειμένων μέσω της μεθόδου ψεκασμού συνδετικών μέσων είναι πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά σε μορφή σκόνης, ενώ ως υλικά σύνδεσης χρησιμοποιούνται διαλύματα οργανικών ουσιών. Το υλικό κατασκευής, σε μορφή σκόνης απλώνεται ομοιόμορφα πάνω από την πλατφόρμα εκτύπωσης και μια κεφαλή εκτύπωσης, η οποία μπορεί και κινείται στο επίπεδο x-y, αποθέτει διαδοχικά το υλικό σύνδεσης που είναι σε υγρή μορφή, σχηματίζοντας μια στρώση [18]. Στη συνέχεια, η επιφάνεια εκτύπωσης αλλάζει ύψος και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται. Τα κύρια μέρη ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή τεχνολογίας Binder Jetting φαίνονται στην Εικόνα 9.

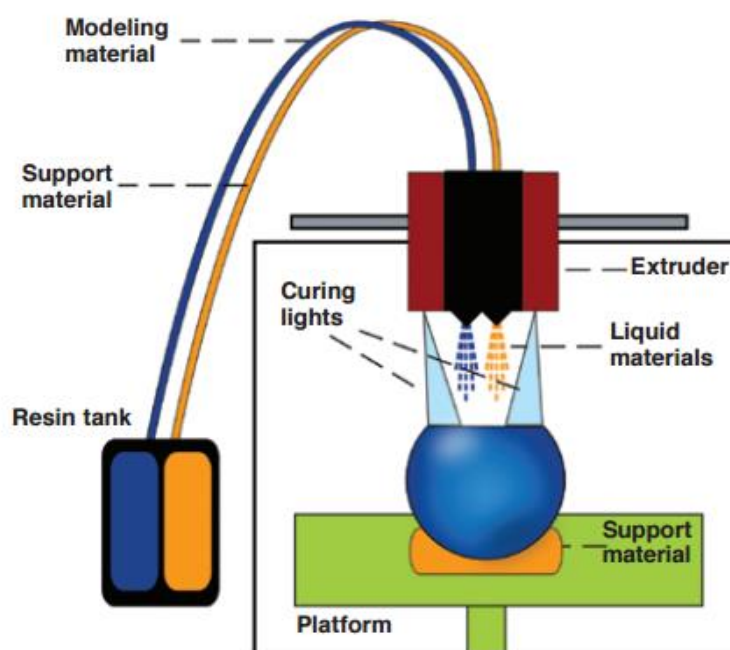


Εικόνα 9 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπος Binder Jetting [36]



### Μέθοδος ψεκασμού υλικού – Material Jetting

Η μέθοδος ψεκασμού υλικού είναι μια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που λειτουργεί με τρόπο παρόμοιο με τους inkjet εκτυπωτές μελανιού. Το υλικό κατασκευής, το οποίο μπορεί να είναι παραπάνω από ένα για την ίδια εκτύπωση μέσω πολλαπλών κεφαλών, διανέμεται σε μορφή σκόνης από μια κεφαλή εκτύπωσης, κοντά στην οποία υπάρχει πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας[19]. Τα υλικά κατασκευής είναι θερμοσκληρυνόμενα φωτοπολυμερή σε υγρή μορφή, τα οποία στερεοποιούνται από την υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπεται. Τα σταγονίδια που ψεκάζονται είναι της τάξης των  $100\mu m$  και επειδή η σκλήρυνση γίνεται άμεσα, δεν υπάρχουν φαινόμενα διαρροής (oozing), με αποτέλεσμα την παραγωγή αντικειμένων υψηλής ακρίβειας και λείας επιφάνειας.



Εικόνα 10 – Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου Material Jetting [37]

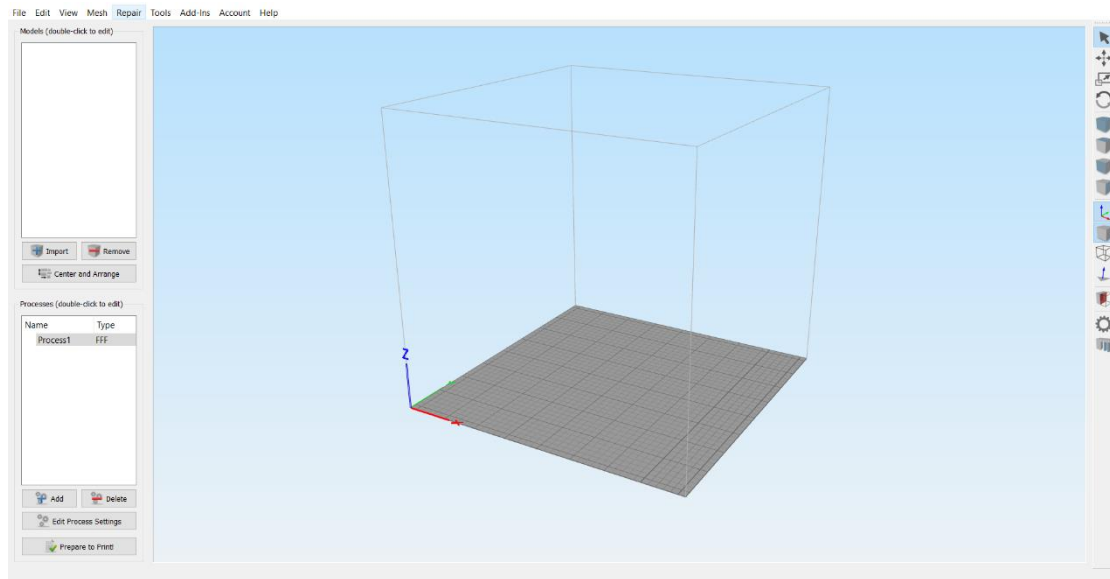
Λόγω της δυνατότητας ταυτόχρονης εκτύπωσης διαφορετικών υλικών, άρα και χρωμάτων, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται εκτός των άλλων και στην παραγωγή συσκευασιών καταναλωτικών αγαθών, όπως το Aeroflexx®.

## 1.4 Διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθεί αναφορά στις διαδικασίες που πρέπει να γίνουν, ώστε από το σχέδιο CAD να καταλήξουμε στην επιτυχημένη κατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου, μέσω της μεθόδου εναπόθεσης υλικού. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη σύλληψη της ιδέας του αντικείμενου προς σχεδιασμό και τον σχεδιασμό αυτού σε κατάλληλο λογισμικό CAD. Επειδή υπάρχει πληθώρα λογισμικών, άρα και αρχείων, στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή του τρισδιάστατου σχεδίου σε άλλη μορφή αρχείου, ώστε να γίνει ο τεμαχισμός (slicing). Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, η μετατροπή έγινε σε αρχεία της μορφής .STL[20] (Standard Tessellation Language), το οποίο μετατρέπει τις επιφάνειες του σχεδίου σε ένα σύνολο τριγωνικών εδρών. Αφού μετατραπεί το σχέδιο σε μορφή STL, εισάγεται σε κατάλληλο λογισμικό τεμαχισμού (slicer), ώστε να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις, όπως το πάχος κάθε στρώσης, η προσθήκη στηρίξεων, αν αυτό κριθεί απαραίτητο, και η ταχύτητα εκτύπωσης. Το επόμενο στάδιο είναι η εκτύπωση και η αξιολόγηση της εκτύπωσης. Σε αυτό το στάδιο, αν τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά, επιστρέφουμε στο λογισμικό τεμαχισμού, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές. Τέλος, αφού εκτυπωθεί το αντικείμενο, γίνεται η τελική επεξεργασία αυτού, δηλαδή απομάκρυνση περιττού υλικού, λείανση και σε μερικές περιπτώσεις, βαφή.

### 1.4.1 Τεμαχισμός

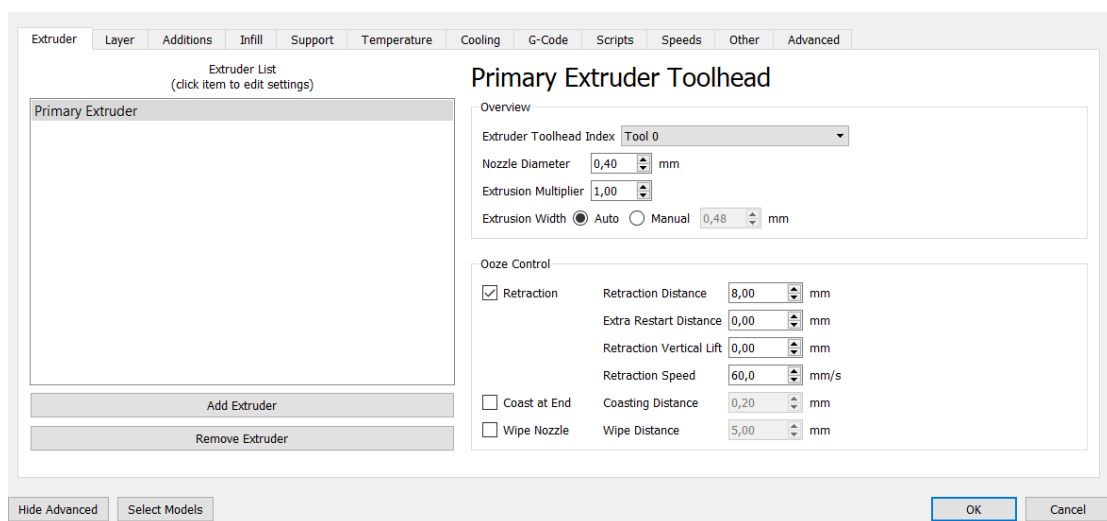
Πριν την εκτύπωση των αντικειμένων είναι απαραίτητο να γίνει η μετατροπή αυτών σε κατάλληλο κώδικα, που ονομάζεται GCODE. Πρόκειται για μια γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται επίσης και σε κατεργασίες CAM (Computer Aided Manufacturing) για τον αριθμητικό έλεγχο των μηχανημάτων. Για τον τεμαχισμό των τρισδιάστατων μοντέλων χρησιμοποιούνται κατάλληλα λογισμικά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Simplify3D® [21](Εικόνα 11), καθώς πρόκειται για ένα πρόγραμμα τεμαχισμού, που χρησιμοποιείται από πολλούς επαγγελματίες και ερασιτέχνες ανά τον κόσμο.



Εικόνα 11 – Το περιβάλλον του λογισμικού Simplify3D®

### 1.4.2 Ρυθμίσεις τεμαχισμού

Το πρόγραμμα Simplify3D®, όπως και άλλα αντίστοιχα λογισμικά, προσφέρει μια πληθώρα ρυθμίσεων, οι οποίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη και την επιτυχή ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής. Παρακάτω, γίνεται μια σύντομη αναφορά αυτών, καθώς και της συμβολής τους στο τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 12 – Ρυθμίσεις εξώθησης (extruder)

## Ρυθμίσεις Εξώθησης (Εικόνα 12)

Οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν την κεφαλή εκτύπωσης, καθώς και το πόσο υλικό εισέρχεται σε αυτήν. Η πιο σημαντική από τις ρυθμίσεις αυτές αφορά το πάχος κάθε στρώσης της εκτύπωσης, καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα και τις ανοχές του τελικού αντικειμένου.

- **Πάχος στρώσης**

Το πάχος πρέπει να είναι ανάλογο και της κεφαλής εκτύπωσης που θα χρησιμοποιηθεί, αλλά και του ύψους της κάθε στρώσης. Συγκεκριμένα, ο λόγος πάχους/ύψους δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 1.2.

- **Μέγεθος κεφαλής εκτύπωσης (Nozzle Diameter)**

Με αυτή τη ρύθμιση καθορίζουμε τη διάμετρο κεφαλής που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτή η ρύθμιση έχει και άμεσο αντίκτυπο στην μέγιστη ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί [22]. Η διάμετρος της κεφαλής εκτύπωσης μπορεί να είναι από 0.1 – 1.2 mm ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα και το υλικό.

- **Πολλαπλασιαστής Εξώθησης (Extrusion Multiplier)**

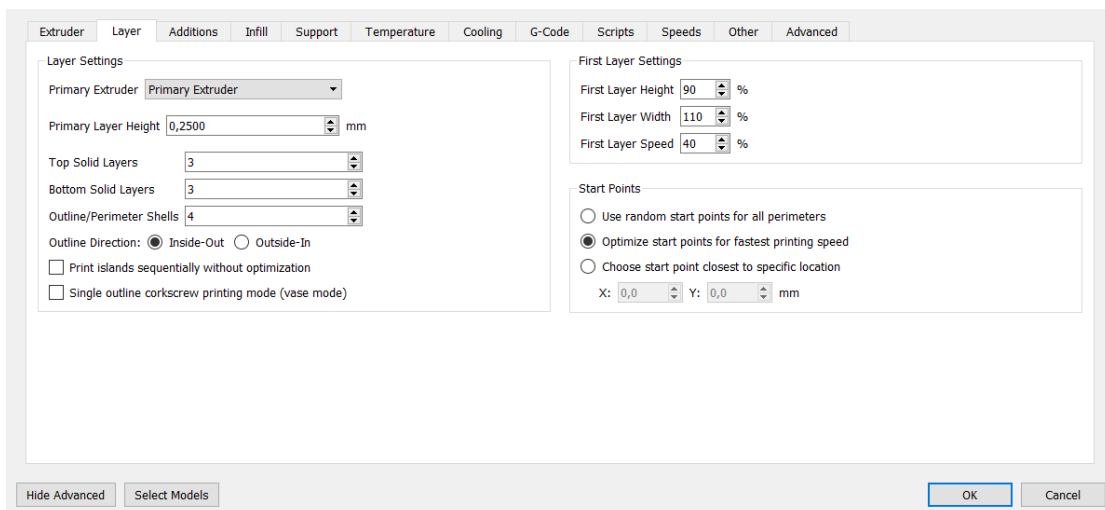
Η τιμή αυτής της παραμέτρου καθορίζει την ποσότητα του υλικού που θα εισέλθει στη κεφαλή εκτύπωσης. Σε περίπτωση που το υλικό είναι λιγότερο από το επιθυμητό και παρατηρούνται φαινόμενα υπό-εξώθησης (underextrusion) τότε πρέπει να αυξηθεί ενώ στην αντίθετη περίπτωση, αυτή της υπερ-εξώθησης (overextrusion), πρέπει να μειωθεί (Εικόνα 13).



Εικόνα 13 – Παράδειγμα υπό και υπερ εξώθησης

- **Ρυθμίσεις Διαρροής (Ooze Control)**

Επειδή κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, εντός της κεφαλής εκτύπωσης υπάρχει τηγμένο υλικό, είναι πιθανό μικρές ποσότητες αυτού να διαρρεύσουν. Για να αποφευχθεί αυτό υπάρχουν οι ρυθμίσεις διαρροής.



Εικόνα 14 – Ρυθμίσεις στρώσης

### **Ρυθμίσεις στρώσης (Εικόνα 14)**

- **Ύψος βασικής στρώσης**

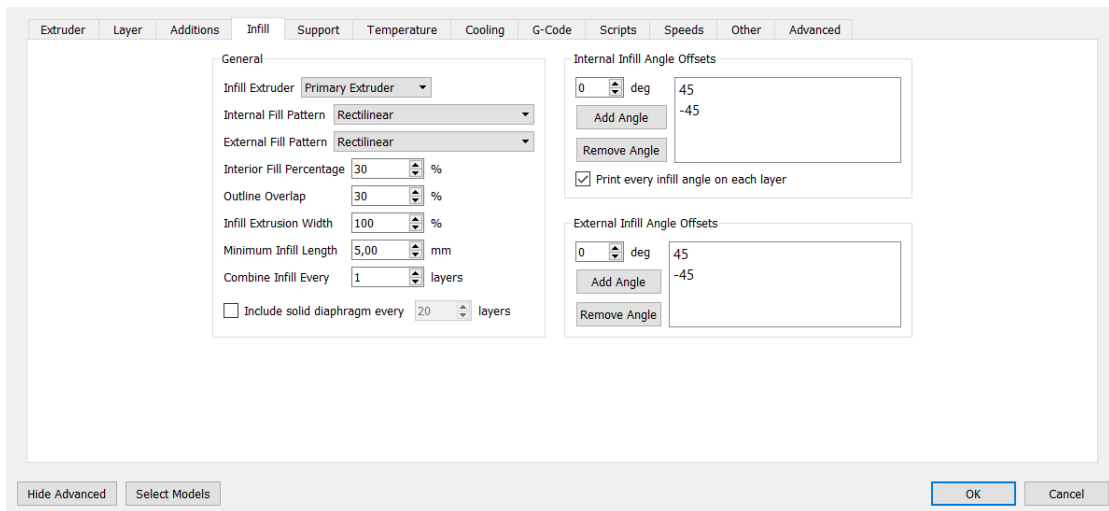
Το ύψος της κάθε στρώσης αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα για την ποιότητα και το τελικό αποτέλεσμα κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης. Όπως αναφέρθηκε, συνδέεται άρρηκτα με το πάχος της κάθε στρώσης. Για κεφαλές εκτύπωσης 0.4mm το προτεινόμενο ύψος είναι 0.25mm. Η παράμετρος αυτή μπορεί να αλλάξει ανάλογα το μέγεθος και τις ανοχές του αντικειμένου προς εκτύπωση.

- **Αριθμός άνω/κάτω στρώσεων**

Με αυτή τη ρύθμιση καθορίζουμε πόσες στρώσεις της κάτω και της πάνω επιφάνειας θα είναι 100% πλήρεις.

- **Αριθμός εξωτερικών περιγραμμάτων**

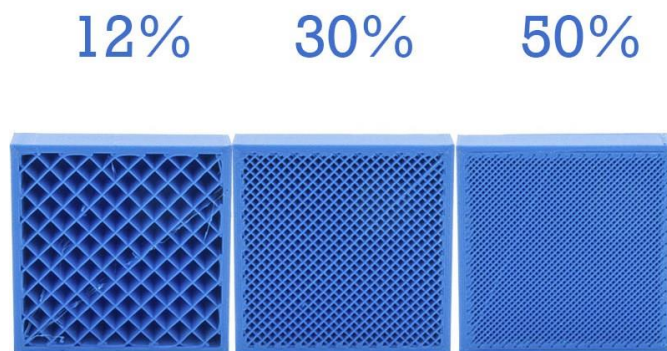
Αφορά το πόσες φορές θα περάσει η κεφαλή εκτύπωσης τα εξωτερικά τοιχώματα. Μαζί με το ποσοστό πλήρωσης καθορίζουν την αντοχή του αντικειμένου.



Εικόνα 15 – Ρυθμίσεις πλήρωσης

### Ρυθμίσεις πλήρωσης (infill) (Εικόνα 15)

Ως πλήρωση, εννοείται η εσωτερική πυκνότητα του αντικειμένου, δηλαδή πόσο πλήρες θα είναι το εσωτερικό του. Ποσοστό της τάξης του 100% σημαίνει ότι το εσωτερικό θα είναι απολύτως συμπαγές, ενώ 0% σημαίνει ότι θα υπάρχουν μόνο εξωτερικά τοιχώματα. Το αποτέλεσμα για τρία διαφορετικά ποσοστά πλήρωσης φαίνεται στην Εικόνα 16. Η αύξηση αυτού του ποσοστού μαζί με την αύξηση των εξωτερικών τοιχωμάτων αυξάνουν την αντοχή του αντικειμένου που θα κατασκευαστεί.

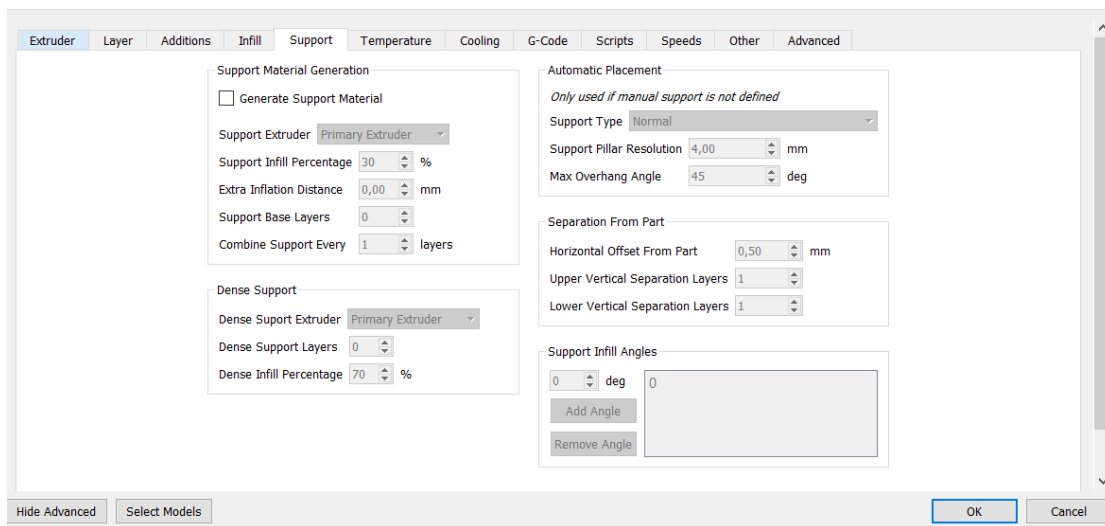


Εικόνα 16 – Παράδειγμα ποσοστού πλήρωσης

- **Τύπος πλήρωσης (Infill Pattern)**

Με αυτή τη ρύθμιση μπορεί να αλλάξει ο τύπος πλήρωσης. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε προσφέρει συνολικά έξι τύπους πλήρωσης.

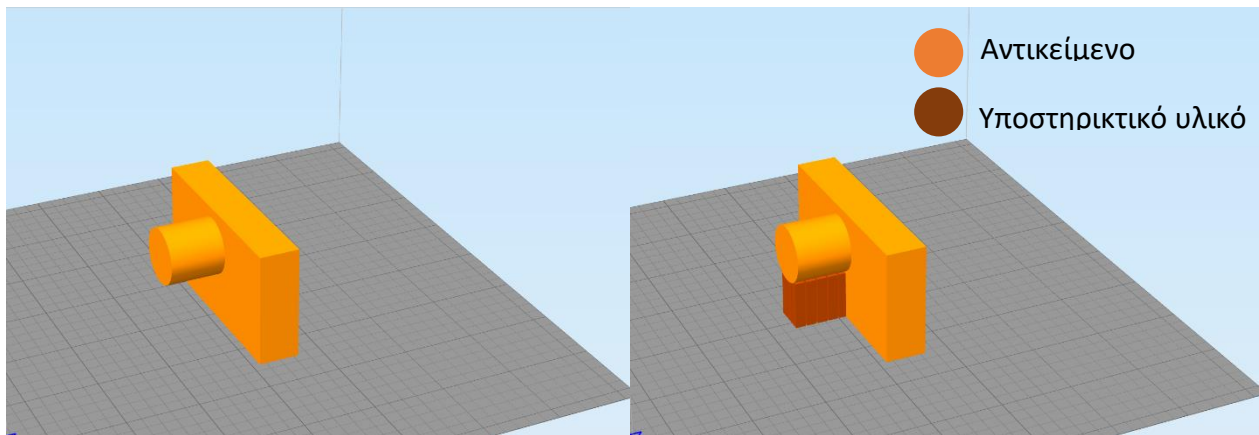
1. Rectilinear
2. Grid
3. Triangular
4. Wiggle
5. Fast Honeycomb
6. Full Honeycomb



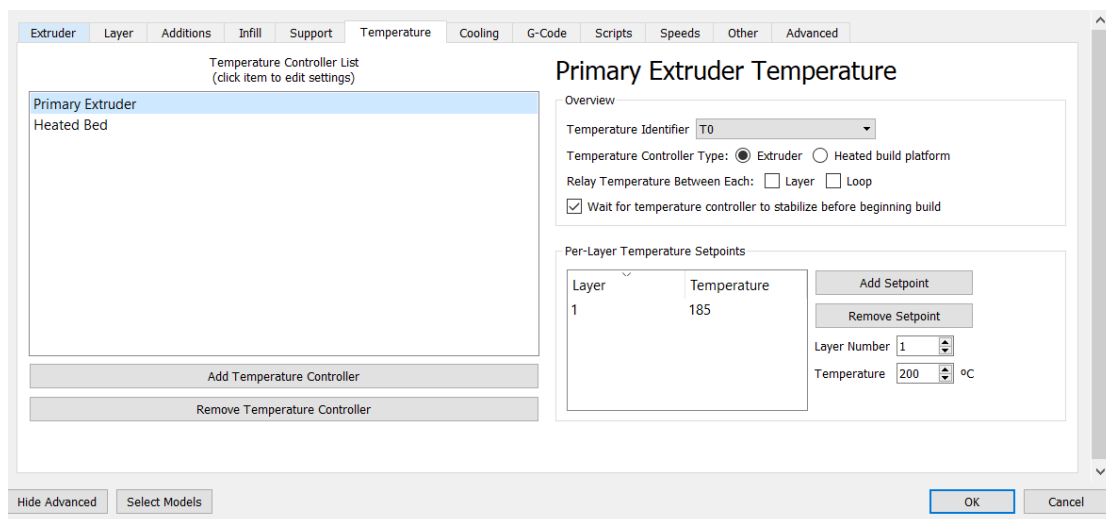
Εικόνα 17 – Ρυθμίσεις υποστηρικτικού υλικού

### **Ρυθμίσεις υποστηρικτικού υλικού (Supports) (Εικόνα 17)**

Όπως αναφέρθηκε, η μέθοδος εξώθησης υλικού βασίζεται στη διαδοχική εναπόθεση στρώσεων για τη δημιουργία του αντικειμένου. Αν κάποιο μέρος του αντικειμένου δε βρίσκεται ακριβώς πάνω από κάποια στρώση, τότε δημιουργείται η ανάγκη για προσθήκη υποστηρικτικού υλικού (Εικόνα 18).



Εικόνα 18 – Παράδειγμα χρήσης υποστηρικτικού υλικού



Εικόνα 19 – Ρυθμίσεις θερμοκρασίας

### Ρυθμίσεις θερμοκρασίας (Εικόνα 19)

Στις μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω εναπόθεσης υλικού υπάρχουν δύο κύριες θερμοκρασίες, οι οποίες επηρεάζουν το αποτέλεσμα της κατεργασίας.

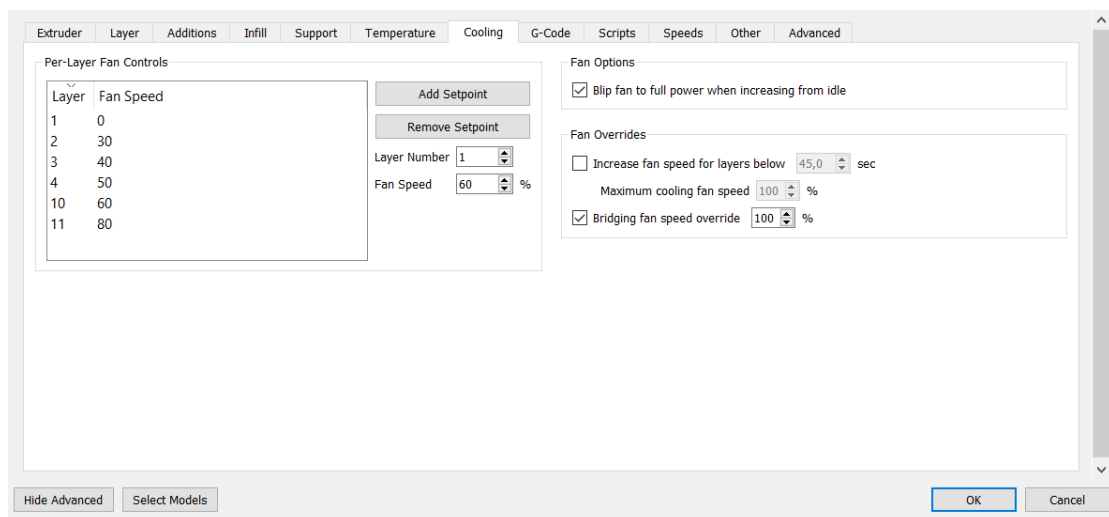
- **Ρυθμίσεις θερμοκρασίας κεφαλής**

Με αυτήν την παράμετρο ορίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία της κεφαλής εκτύπωσης. Οι θερμοκρασίες πρέπει να αλλάζουν ανάλογα με το υλικό, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2, αλλά και ανάλογα τον κατασκευαστή, αν πρόκειται για το ίδιο είδος υλικού.



- **Ρυθμίσεις θερμοκρασίας επιφάνειας εκτύπωσης**

Άλλη μια κρίσιμη θερμοκρασία που πρέπει να οριστεί σωστά είναι αυτή της επιφάνειας εκτύπωσης. Λόγω της συστολής των θερμοπλαστικών που χρησιμοποιούνται αν το λιωμένο υλικό έρθει σε επαφή με την επιφάνεια σε θερμοκρασία δωματίου ή θερμοκρασία μικρότερη από 60°C [23], τότε δεν θα γίνει σωστά η στερέωση αυτού και θα δημιουργηθούν φαινόμενα αποκόλλησης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο έντονα σε υλικά τύπου ABS, όπου εκεί εκτός της υψηλότερης και πιο σταθερής θερμοκρασίας που χρειάζεται να έχει η επιφάνεια εκτύπωσης, είναι αναγκαία η μόνωση του εκτυπωτή ή η τοποθέτησή του μέσα σε κουτί, για να αποφευχθούν ροές αέρα που θα επηρεάσουν τη θερμοκρασία της επιφάνειας.

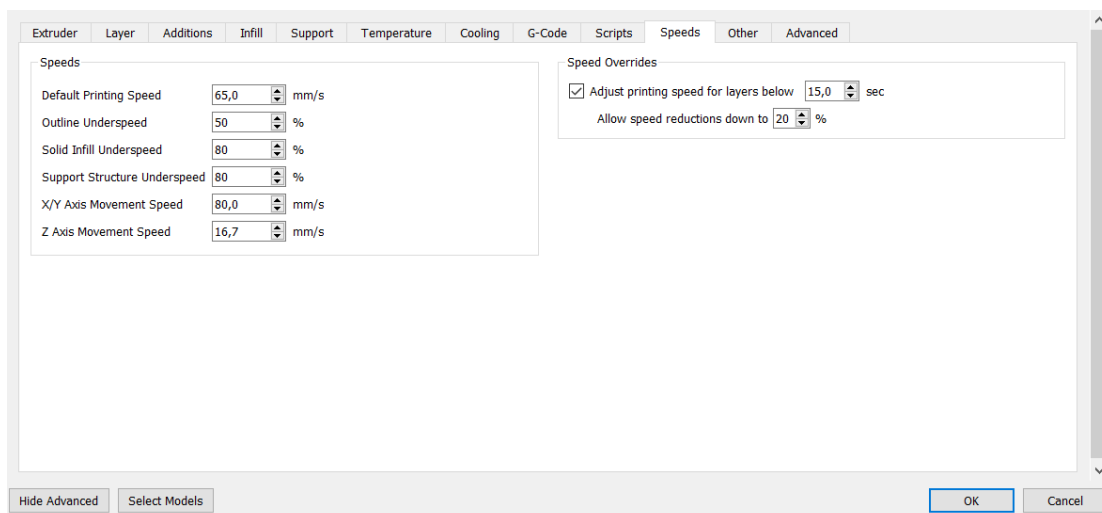


Εικόνα 20 – Ρυθμίσεις ψύξης

### **Ρυθμίσεις ψύξης (Εικόνα 20)**

Για να δημιουργηθούν λείες επιφάνειες κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης, είναι απαραίτητο το υλικό να ψύχεται κατά την εναπόθεση του. Αυτή η διαδικασία ξεκινά μετά από κάποιες στρώσεις, καθώς αν ξεκινούσε από την αρχή θα δημιουργούσε φαινόμενα αποκόλλησης. Η ψύξη είναι επίσης αναγκαία, όταν ο εκτυπωτής μπαίνει σε λειτουργία γεφύρωσης (bridging), όπου εκτυπώνει ταχέως πάνω από μια κενή επιφάνεια. Στη διάρκεια της γεφύρωσης, η ψύξη πρέπει να είναι σε ποσοστό 100%,

ώστε το υλικό να στερεοποιηθεί άμεσα και να μπορέσει να κολλήσει σε γειτονικές στρώσεις.



Εικόνα 21 – Ρυθμίσεις ταχύτητας

### Ρυθμίσεις ταχύτητας (Εικόνα 21)

Η ταχύτητα εκτύπωσης είναι ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζεται από το μέγεθος και τις λεπτομέρειες του αντικειμένου [24]. Εκτός από την ταχύτητα εκτύπωσης, ορίζεται η και ταχύτητα μετακίνησης στο επίπεδο x-y, αλλά και κατά τον άξονα z.

## 2 Τεχνικές Συσκευασίας Ηλεκτρονικών Συσκευών

Η ανάπτυξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Intergrated Circuits – ICs) και των μικροηλεκτρονικών συστημάτων (MEMS) έχουν φέρει μεγάλη πρόοδο σε κάθε πτυχή της τεχνολογίας και ιδιαίτερα σε αυτόν της βιομηχανίας. Για να καταστεί δυνατή η χρήση τους, είναι απαραίτητο, αυτά τα κυκλώματα να συσκευάζονται κατάλληλα και η συσκευασία τους συνήθως παρέχει μια πληθώρα λειτουργιών[25].

Η συσκευασία θα πρέπει να παρέχει προστασία από περιβαλλοντολογικούς παράγοντες, καθώς τυχόν χημικές μεταβολές μπορεί να μειώσουν την απόδοση του κυκλώματος, όπως και μηχανική αντοχή και διαχείριση θερμότητας τόσο για την αύξηση της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής του κυκλώματος, όσο και για την πρόληψη πρόκλησης φθορών και ζημιών υλικής φύσεως. Χρειάζεται επίσης διασύνδεση του κυκλώματος με τη συσκευασία, ώστε να καταστεί δυνατή η αλληλεπίδραση με ένα μεγαλύτερο σύστημα, όπως ένας χρήστης ή η επικοινωνία του εκάστοτε κυκλώματος με κάποιο άλλο. Αντιστοίχως, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία τέθηκε σαν προδιαγραφή, η συσκευή στήριξης του αισθητήρα να μπορεί να ενσωματωθεί στη συσκευή μέτρησης χωρητικότητας.

Οι σύγχρονες τεχνικές συσκευασίας πρέπει να ορίζονται κατά την αρχή του σχεδιασμού του προϊόντος ή του κυκλώματος, προκειμένου να ταιριάζει με ολόκληρη τη συσκευασία κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης, χωρίς όμως να μειώνονται οι επιδόσεις της συσκευής. Επίσης, συνήθως απαιτείται παραγγελία μεγάλου αριθμού πρωτοτύπων από πολλά και διαφορετικά υλικά, αυξάνοντας έτσι το κόστος κατασκευής.

Η τεχνολογία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης απλοποιεί αυτήν την διαδικασία. Ήδη, τεχνικές ψεκασμού έχουν χρησιμοποιηθεί και για την δημιουργία τρισδιάστατων ICs [26] αλλά και για την ενθυλάκωση συσκευών MEMS [27], [28].

## 2.1 Μεθοδολογία σχεδίασης συσκευασίας

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού μιας συσκευασίας προκύπτουν τρεις βασικές προκλήσεις.

1. Τα υλικά της συσκευασίας μπορεί να διαφέρουν, με αποτέλεσμα να χρειάζονται παραπάνω εργαλεία και ανθρώπινο δυναμικό.
2. Είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός και η κατασκευή παραπάνω από ενός πρωτοτύπων.
3. Η παραγγελία πολλαπλών σχεδίων αυξάνει το συνολικό κόστος του σταδίου κατασκευής πρωτοτύπων.

## 2.2 Πλεονεκτήματα κατασκευής με τρισδιάστατη εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές κατασκευής συσκευασιών. Με τη χρήση τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να κατασκευαστούν σχεδόν όλα τα γεωμετρικά σχήματα, μειώνοντας το κόστος, καθώς είναι ανεξάρτητο από την γεωμετρία του αντικειμένου, σε αντίθεση με παραδοσιακές τεχνικές όπως το καλουπάρισμα ή τεχνικές συγκόλλησης[29].

Υπάρχει επίσης μια ευρεία γκάμα υλικών κατασκευής, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή. Τα υλικά αυτά μπορούν να διαφέρουν στις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες, ανάλογα τις ανάγκες της συσκευής, αλλά μπορούν να διαφέρουν και στην υφή, χρησιμοποιώντας νήματα με προσμίξεις ινών ξύλου ή ανθρακονήματος.

Κάθε σχεδιαστική ιδέα μπορεί να κατασκευαστεί άμεσα και να αξιολογηθεί ταυτόχρονα, αφού μπορούν είτε με τη χρήση πολλαπλών εκτυπωτών, είτε πολλαπλών κεφαλών, να κατασκευαστούν ταυτόχρονα διαφορετικά αντικείμενα.

Τέλος, το κόστος αγοράς ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή είναι τέτοιο που επιτρέπει η κατασκευή να γίνεται εσωτερικά, μειώνοντας έτσι τον χρόνο παράδοσης.

## 3 Στόχος της Εργασίας και προδιαγραφές

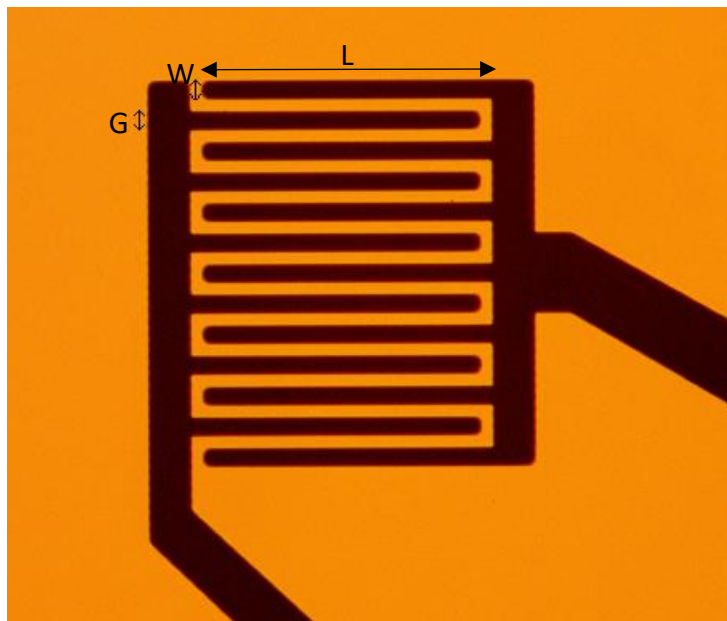
### 3.1 Στόχος της Εργασίας

Η συσκευή μέτρησης του ιού SARS-CoV-2 , που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος βασίζεται σε έναν πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων, στην επιφάνεια του οποίου έχει ακινητοποιηθεί το ένζυμο - υποδοχέας ACE2 και το δεύτερο αποτελείται από το ηλεκτρικό κύκλωμα μέτρησης της χωρητικότητας. Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η σχεδίαση και κατασκευή συσκευασιών και για τα δύο μέρη, δηλαδή του πυκνωτή και της συσκευής μέτρησης, μέσω τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης εναπόθεσης υλικού.

### 3.2 Προδιαγραφές Σχεδίασης

#### 3.2.1 Πυκνωτής Ενδοδιαπλεκόμενων Ηλεκτροδίων

Ένας πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων είναι ένας πυκνωτής ορθογώνιου σχήματος που αποτελείται από μια συστοιχία ηλεκτροδίων μήκους  $L$ , πάχους  $W$ , σε απόσταση  $G$  μεταξύ τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22 – Πυκνωτής ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων

Ο αισθητήρας που υλοποιήθηκε από την ομάδα του Εργαστήριου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων είχε σαν πυκνωτή ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων τον PW-IDEAU50, ο οποίος περιέχει 70 χρυσά ηλεκτρόδια, έχει πλάτος και διάκενο ηλεκτροδίων 50μm και άσπρο πλαστικό διηλεκτρικό. Ο αισθητήρας, καθώς και οι διαστάσεις του, φαίνονται στην Εικόνα 23.

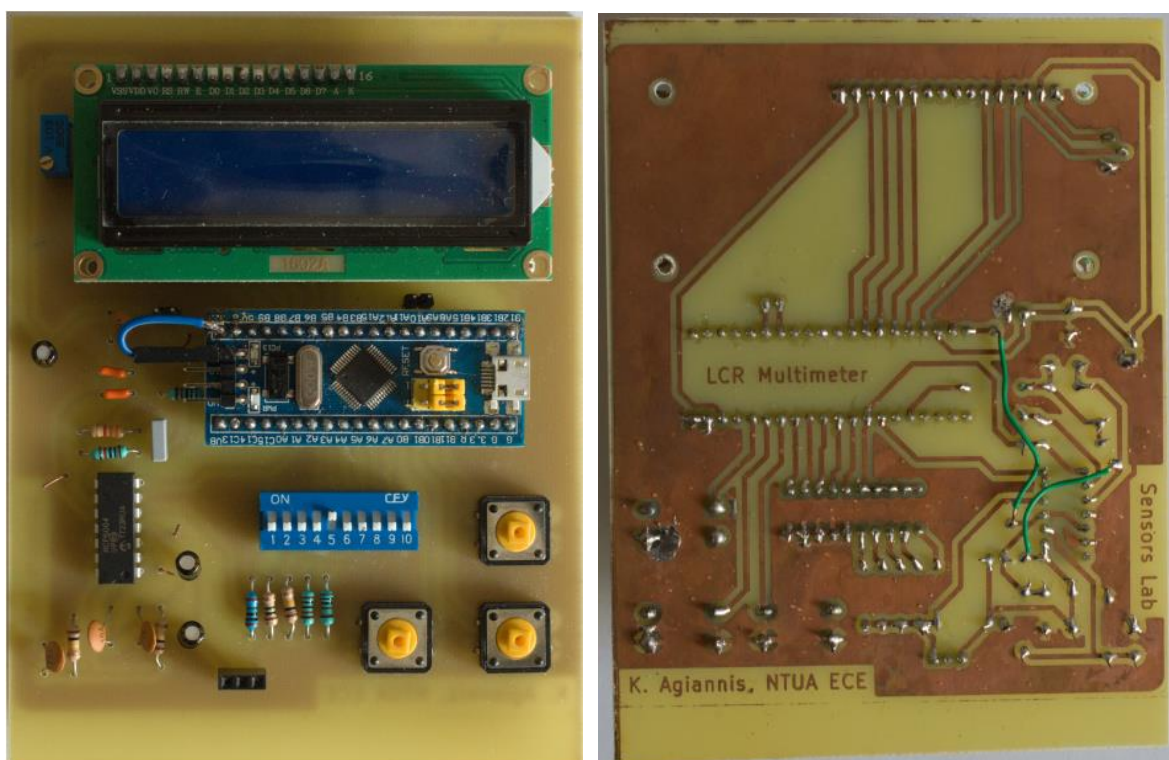


*Εικόνα 23 – Ο πυκνωτής PW-IDEAU50*

Για τη σχεδίαση της συσκευασίας του αισθητήρα τέθηκαν κάποιες αρχικές προδιαγραφές. Η πρώτη και σημαντικότερη ήταν να μπορεί να γίνει αγώγιμη επαφή των ηλεκτροδίων μέτρησης του πυκνωτή, πάχους 1mm, με σκοπό τη μέτρηση της χωρητικότητας αυτού, χωρίς να χρειάζεται στερέωση καλωδίων ή ηλεκτρικής κόλλησης. Θα έπρεπε επίσης το μέρος του πυκνωτή, όπου βρίσκονται τα ενδοδιαπλεκόμενα ηλεκτρόδια, να είναι ελεύθερο, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί το δείγμα προς μέτρηση. Τέλος, ο αισθητήρας κατά την εισαγωγή του στη συσκευασία πρέπει να τοποθετείται υπό γωνία κλίσης, της τάξης μερικών μοιρών, ώστε να διασφαλιστεί ότι δείγματα υγρής κατάστασης δε θα ρέουν προς το κύκλωμα μέτρησης.

### 3.2.2 Συσκευή μέτρησης

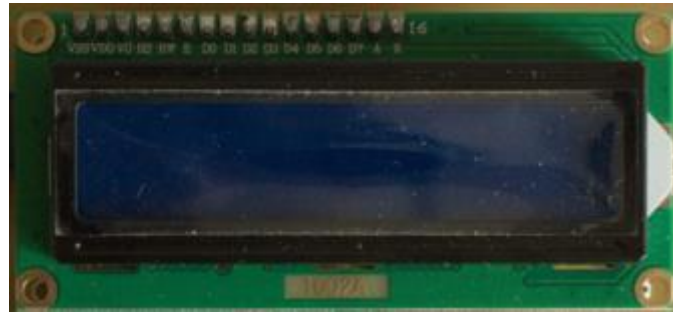
Το δεύτερο μέρος της σχεδίασης περιλάμβανε τη σχεδίαση και την κατασκευή συσκευασίας για τη συσκευή μέτρησης χωρητικότητας του πυκνωτή[2] (Εικόνα 24). Οι μεγάλες διαστάσεις, το σχήμα της πλακέτας, καθώς και η μορφολογία των ηλεκτρονικών στοιχείων συνέβαλαν στις προδιαγραφές σχεδίασης που τέθηκαν κατά την πρωταρχική σύλληψη της ιδέας για τη συσκευασία τη συσκευής μέτρησης.



Εικόνα 24 – Συσκευή μέτρησης χωρητικότητας [1]

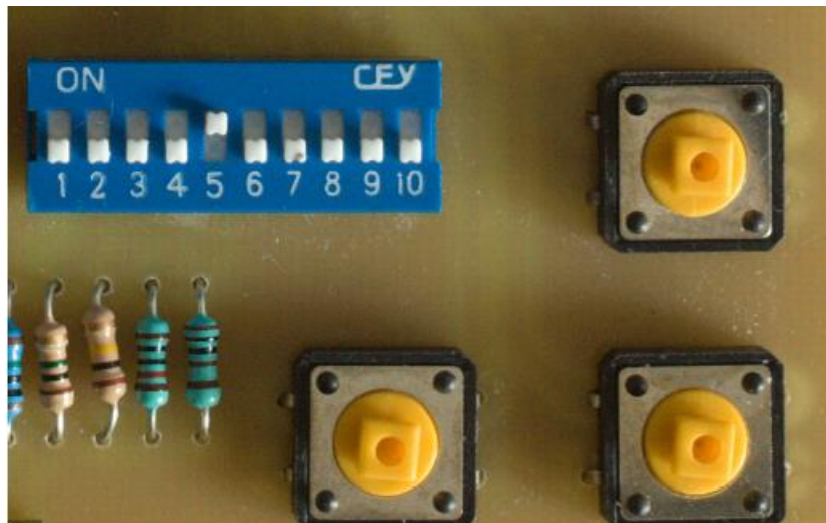
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι αρχικές προδιαγραφές που τέθηκαν για το πρώτο στάδιο σχεδίασης της συσκευασίας.

Η συσκευασία της συσκευής θα πρέπει να επιτρέπει την οπτική επαφή του χρήστη με την οθόνη LCD (Εικόνα 25).



Εικόνα 25 – Οθόνη LCD

Για τον χειρισμό της συσκευής, καθώς και την αλλαγή κλίμακας μέτρησης της χωρητικότητας θα πρέπει η συσκευασία να περιλαμβάνει οπές, ώστε να μπορεί ο χειριστής να αλλάξει τις θέσεις του διακόπτη αλλαγής κλίμακας, αλλά και να μπορεί να αλληλοεπιδράσει με τα κουμπιά (Εικόνα 26).



Εικόνα 26 – Διακόπτης αλλαγής κλίμακας και κουμπιά αλληλεπίδρασης



Τέλος, θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλα διαμορφωμένη οπή, ώστε η συσκευασία του αισθητήρα ενδοδιαπλεκόμενων ηλεκτροδίων να μπορεί να ενσωματωθεί στη συσκευή μέτρησης με χρήση των θυρών διασύνδεσης προς μέτρηση (Εικόνα 27)



Εικόνα 27 – Θύρες μέτρησης

Όλο το υπόλοιπο μέρος τη συσκευασίας θα είναι κλειστό, με εξαίρεση μια ακόμη οπή στο πίσω μέρος, για λόγους τροφοδοσίας και σειριακής εξόδου.

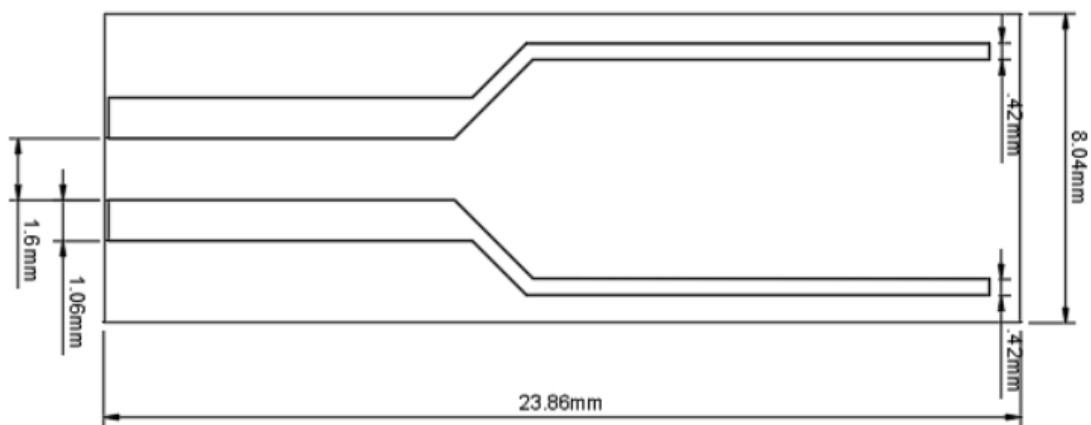
## 4 Σχεδίαση

Η σχεδίαση των συσκευασιών έγινε στο πρόγραμμα Fusion360® της Autodesk®. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης για κάθε εξάρτημα, δηλαδή για τον πυκνωτή, αλλά και τη συσκευή μέτρησης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί, ότι κατά τη διάρκεια των δοκιμών των εκτυπωμένων συσκευασιών δημιουργήθηκαν νέες ανάγκες και προδιαγραφές. Για αυτόν τον λόγο, θα παρουσιαστούν τρεις από τις κύριες εκδόσεις της συσκευασίας του πυκνωτή, κάθε μια από την οποία εισήχθη μια νέα δυνατότητα.

### 4.1 Πυκνωτής Ενδοδιαπλεκόμενων Ηλεκτροδίων

#### 4.1.1 Πρώτη έκδοση

Η βασική πρόκληση κατά τον σχεδιασμό της συσκευής διασύνδεσης του πυκνωτή ήταν η δημιουργία αγωγίμης επαφής με την επιφάνεια των ηλεκτροδίων του. Το κάθε ηλεκτρόδιο έχει πλάτος 1.06mm και η μεταξύ τους απόσταση είναι 1.6mm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28. Για να μπορέσει να γίνει αγωγίμη επαφή, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα ελάσματα από ανοξείδωτο ατσάλι.



Εικόνα 28 – Χαρακτηριστικά πυκνωτή

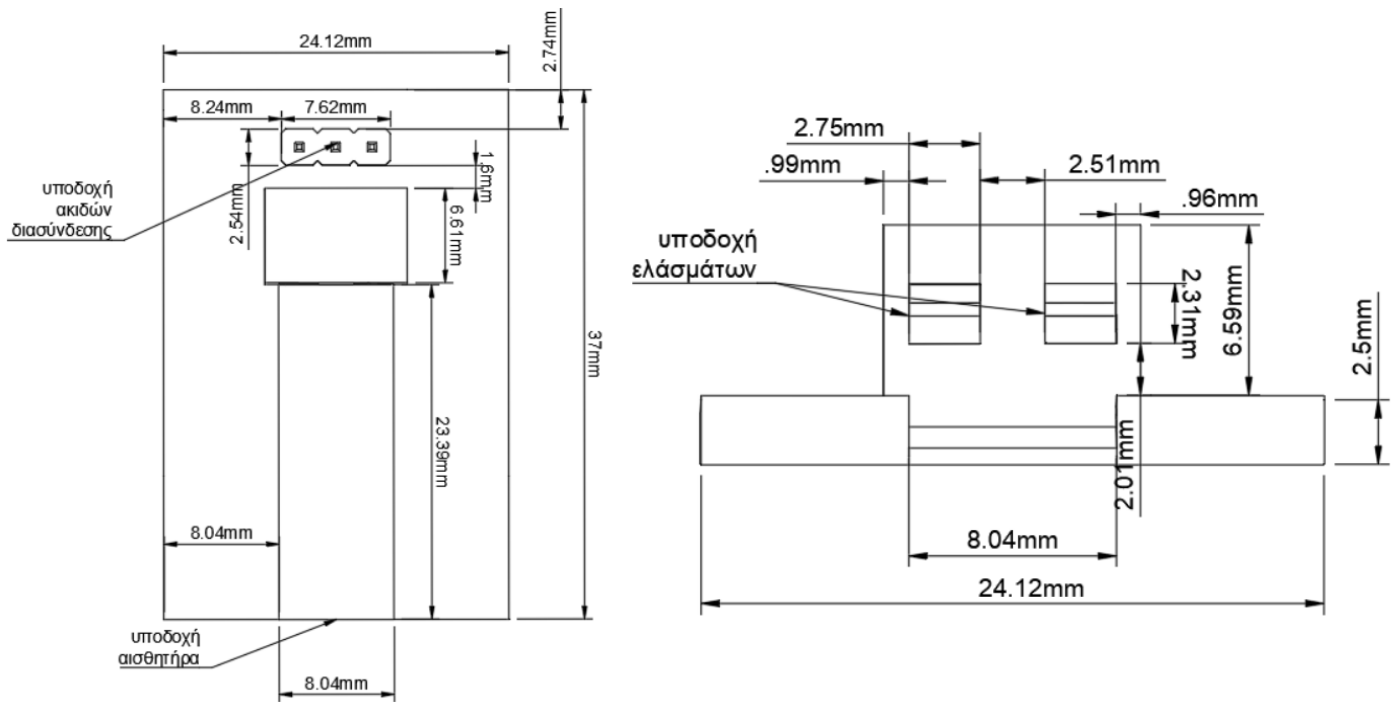
Τα μεταλλικά αυτά ελάσματα επιλέχθηκαν αφενός διότι το πάχος τους (2.75mm) είναι ιδανικό για να καλύψει όλη την επιφάνεια του κάθε ηλεκτροδίου και αφετέρου γιατί το μήκος τους, 20mm, είναι συγκρίσιμο με αυτό του πυκνωτή (Εικόνα 29).



*Εικόνα 29 – Μεταλλικά ελάσματα διασύνδεσης πυκνωτή*

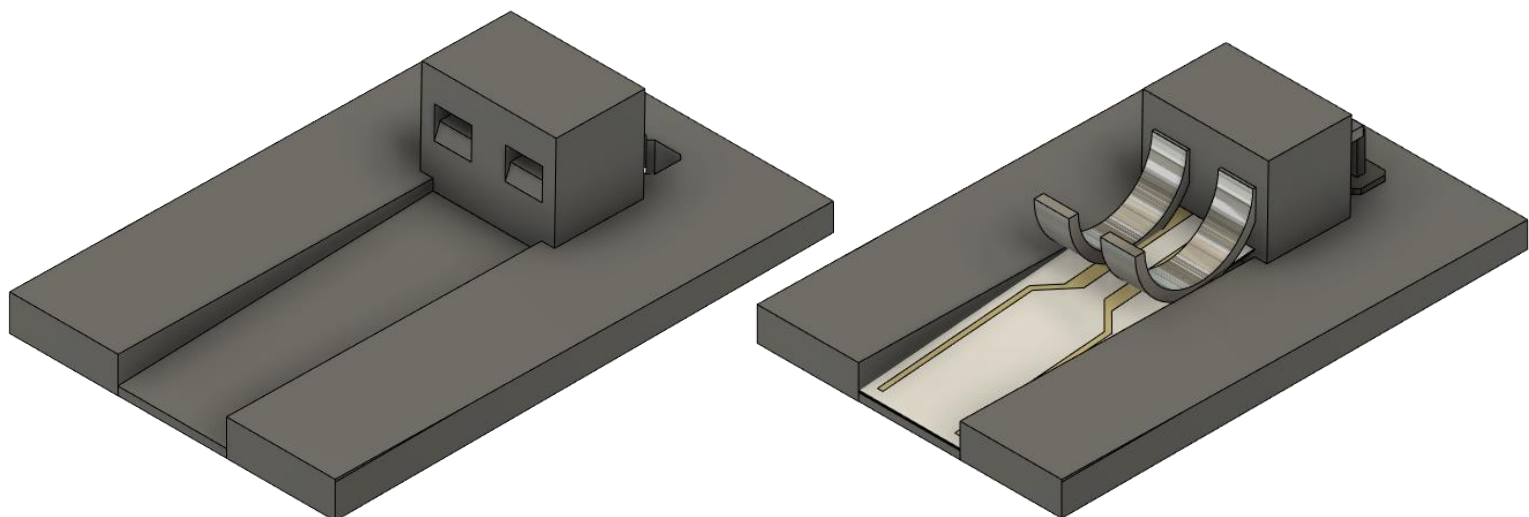
Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε η συσκευασία ώστε:

- Να μπορεί να τοποθετηθεί ο αισθητήρας υπό γωνία σε τέτοια θέση, ώστε τα ηλεκτρόδια να κάνουν αγώγιμη επαφή με τα ελάσματα και η επιφάνεια των ενδιαδοπλεκόμενων ηλεκτροδίων να είναι ελεύθερη, προκειμένου να μπορεί να τοποθετηθεί το δείγμα προς μέτρηση.
- Να υπάρχουν θέσεις στερέωσης των ελασμάτων σε κατάλληλο ύψος, ώστε να γίνεται αγώγιμη επαφή με τα ηλεκτρόδια μέτρησης και το επίπεδο μέρος αυτών στο πίσω μέρος της συσκευασίας να εξέρχεται με σκοπό να γίνεται μια δεύτερη αγώγιμη σύνδεση με ακίδες διασύνδεσης προς το κύκλωμα μέτρησης.
- Να υπάρχει υποδοχή για αρσενικές ακίδες διασύνδεσης.



Εικόνα 30 – Κάτοψη και μπροστινή όψη πρώτης έκδοσης

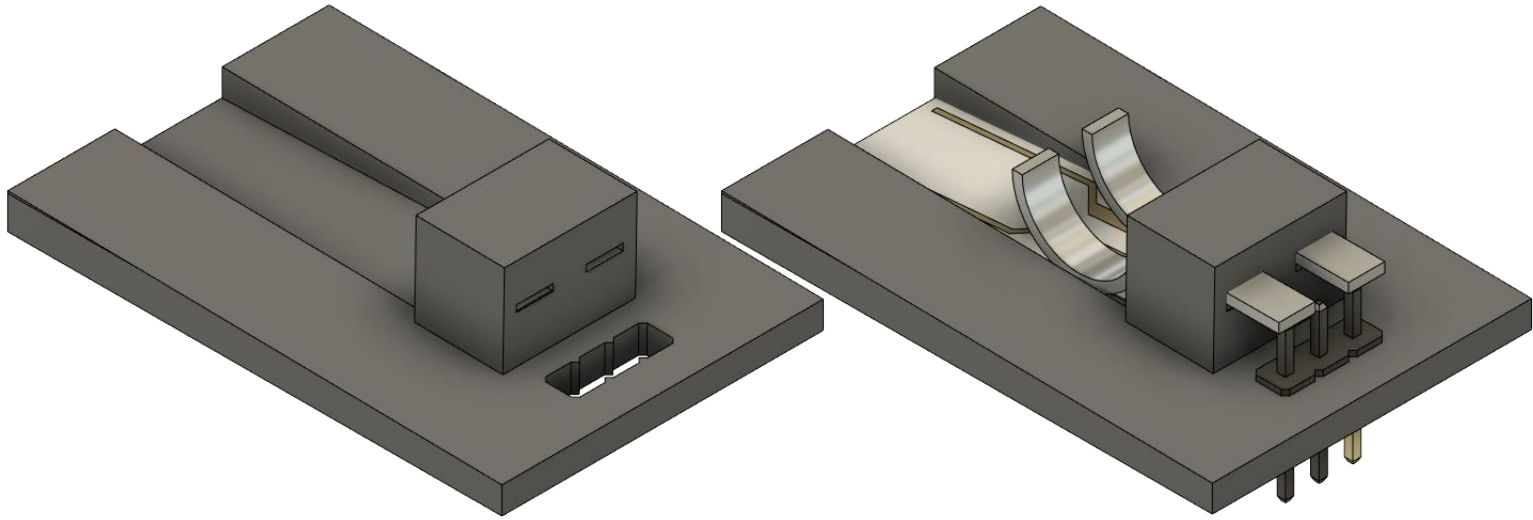
Στην Εικόνα 30 φαίνεται η κάτοψη και η μπροστινή όψη της πρώτης έκδοσης της συσκευασίας του πυκνωτή. Στην κάτοψη φαίνονται οι υποδοχές των ακίδων διασύνδεσης, καθώς και η υποδοχή του πυκνωτή, η οποία σχεδιάστηκε με γωνία κλίσης  $2.58^\circ$ . Στην μπροστινή όψη φαίνονται οι θέσεις στερέωσης των ελασμάτων. Στις υποδοχές αυτές σχεδιάστηκαν κατάλληλες εγκοπές για την στερέωση αυτών.



*Εικόνα 31 – Μπροστινή όψη πρώτης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή*

Στην Εικόνα 31 φαίνεται η μπροστινή όψη του τρισδιάστατου σχεδίου για την πρώτη έκδοση της συσκευασίας του πυκνωτή. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το τρισδιάστατο μοντέλο, χωρίς τον πυκνωτή και τα εξαρτήματα, όπου επίσης διακρίνεται η κλίση  $2.58^\circ$  της επιφάνειας στην οποία στερεώνεται ο πυκνωτής. Τα ελάσματα είναι τοποθετημένα σε τέτοιο ύψος, ούτως ώστε, μέσω πίεσης να επιτυγχάνεται η αγώγιμη επαφή με τα ηλεκτρόδια του πυκνωτή.

Στην Εικόνα 32 φαίνεται η πίσω όψη, στην οποία διακρίνεται η δεύτερη σύνδεση των ελασμάτων, αυτή τη φορά με τις ακίδες, οι οποίες θα συνδεθούν με τη συσκευή μέτρησης. Κατά το στάδιο της κατασκευής, οι ακίδες ενώθηκαν με τα ελάσματα μέσω ηλεκτρικής κόλλησης.



*Εικόνα 32 – Πίσω όψη πρώτης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή*

#### 4.1.2 Δεύτερη έκδοση

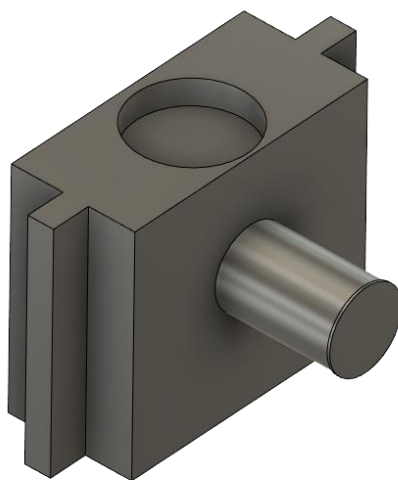
Κατά το στάδιο των δοκιμών και αξιολόγησης της συσκευασίας, το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο εκτενώς, παρατηρήθηκε ότι η πίεση από τα μεταλλικά ελάσματα προκαλούσε φθορά στην επίστρωση χρυσού του πυκνωτή. Επίσης, η τοποθέτηση του πυκνωτή ήταν δύσκολη, καθώς ο χειριστής έπρεπε να μετατοπίσει το κάτω μέρος των ελασμάτων χειροκίνητα, ώστε να τοποθετηθεί ο πυκνωτής. Με αφορμή τα παραπάνω, ξεκίνησε η δεύτερη έκδοση της συσκευασίας, η οποία δημιουργήθηκε με σκοπό να μπορεί ο χειριστής να τοποθετεί τον πυκνωτή, χωρίς να χρειάζεται να μετακινήσει τα ελάσματα, ενώ ταυτόχρονα θα διατηρούταν η αγωγίμη επαφή μεταξύ αυτών και των ηλεκτροδίων του πυκνωτή.

Για την αγώγιμη επαφή των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά ρουλεμάν τύπου 623ZZ, εσωτερικής διαμέτρου 3mm και εξωτερικής διαμέτρου 10mm, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 33.



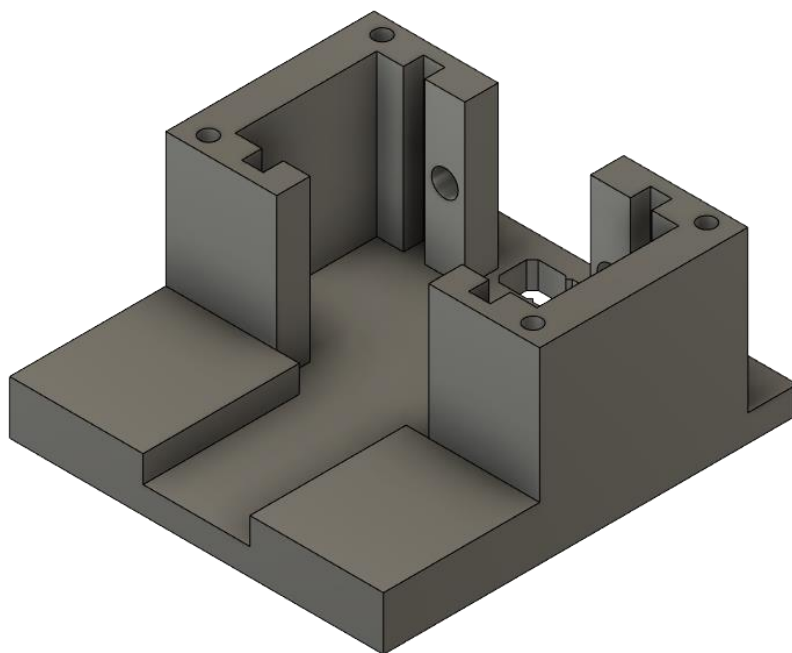
*Εικόνα 33 - Κυλινδρικά ρουλεμάν τύπου 623ZZ*

Για τη στήριξη των ρουλεμάν, σχεδιάστηκαν οδηγοί στο μέσον, των οποίων υπήρχε κυλινδρική εξοχή για την στήριξη των ρουλεμάν. Γύρω από την εξοχή τυλίχτηκε σύρμα μικρής διατομής (0.1mm) ώστε μέσω αγώγιμης επαφής με την εσωτερική επιφάνεια του ρουλεμάν να μπορεί να γίνει η διασύνδεση με τη συσκευή μέτρησης. Η διάταξη των οδηγών χωρίς το σύρμα φαίνεται στην Εικόνα 34.



*Εικόνα 34- Κομμάτι στήριξης ρουλεμάν*

Στο πάνω μέρος της επιφάνειας του οδηγού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 34, υπάρχει εσοχή για την τοποθέτηση ελατηρίου πίεσης, με σκοπό την πίεση του οδηγού, επομένως και του ρουλεμάν προς τα κάτω. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την ευκολία τοποθέτησης του αισθητήρα από τον χειριστή, καθώς το ελατήριο θα μετατοπίζονταν προς τα πάνω, αλλά λόγω της πίεσης θα εξασφαλιζόνταν η αγώγιμη επαφή.

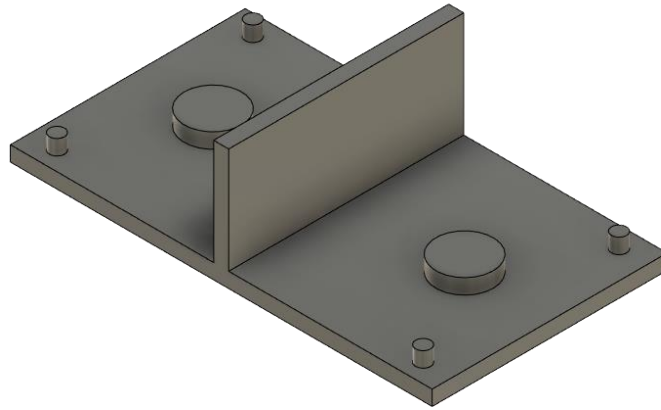


*Εικόνα 35 – Βάση δεύτερης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή*

Τα χαρακτηριστικά της βάσης παρέμειναν αναλλοίωτα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 35, καθώς και πάλι υπάρχει μικρή γωνία κλίσης στην επιφάνεια που τοποθετείται ο πυκνωτής, αλλά και υποδοχή για τις ακίδες διασύνδεσης. Στο πίσω μέρος του τοιχώματος των οδηγών υπάρχει οπή, ώστε να μπορεί το καλώδιο να ενωθεί με τις ακίδες διασύνδεσης στο πίσω μέρος της βάσης.

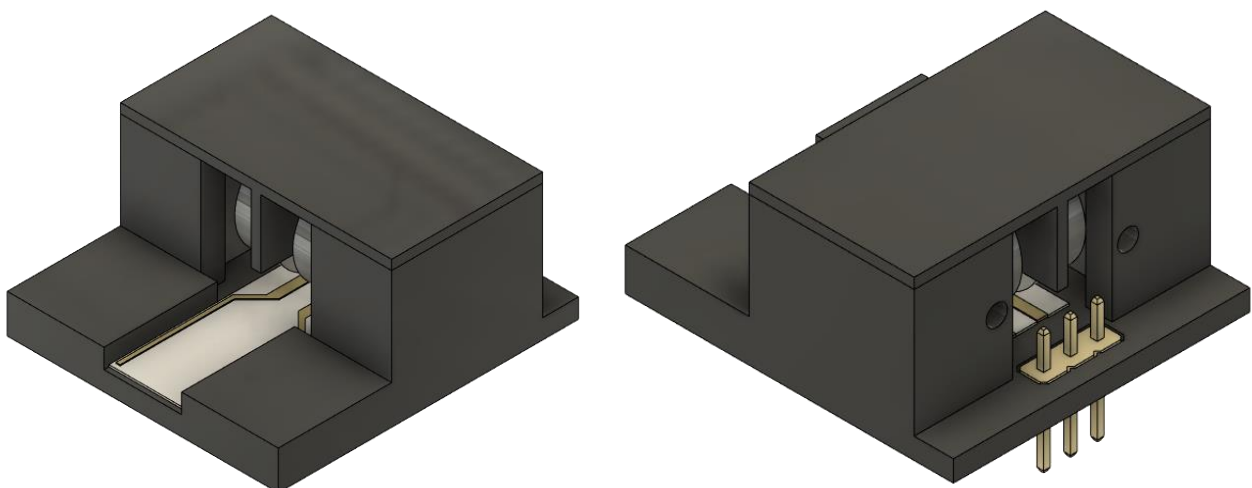
Τέλος, σχεδιάστηκε καπάκι ( Εικόνα 36 ), ώστε να συγκρατηθεί το ελεύθερο άκρο των ελατηρίων, αλλά και να αποφευχθεί τυχόν βραχυκύκλωμα των ρουλεμάν, λόγω της πολύ κοντινής τους απόστασης.





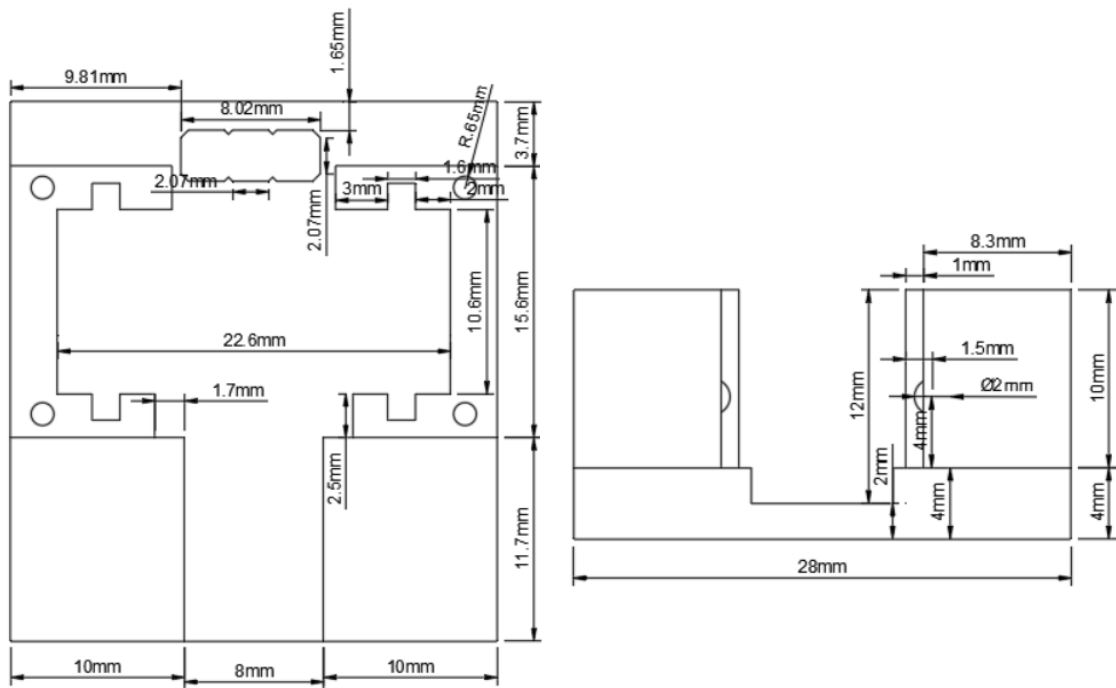
*Εικόνα 36 – Καπάκι δεύτερης έκδοσης συσκευασίας πυκνωτή*

Η μπροστινή, καθώς και η πίσω όψη του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου της δεύτερης έκδοσης, φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 37. Εντός και πάνω ακριβώς από τα ηλεκτρόδια του πυκνωτή διακρίνονται τα κυλινδρικά ρουλεμάν. Από τις εικόνες απουσιάζουν τα καλώδια διασύνδεσης, τα οποία τοποθετήθηκαν κατά το στάδιο της κατασκευής για τη μεταφορά του ηλεκτρικού σήματος από τα ηλεκτρόδια του πυκνωτή προς τις ακίδες διασύνδεσης.

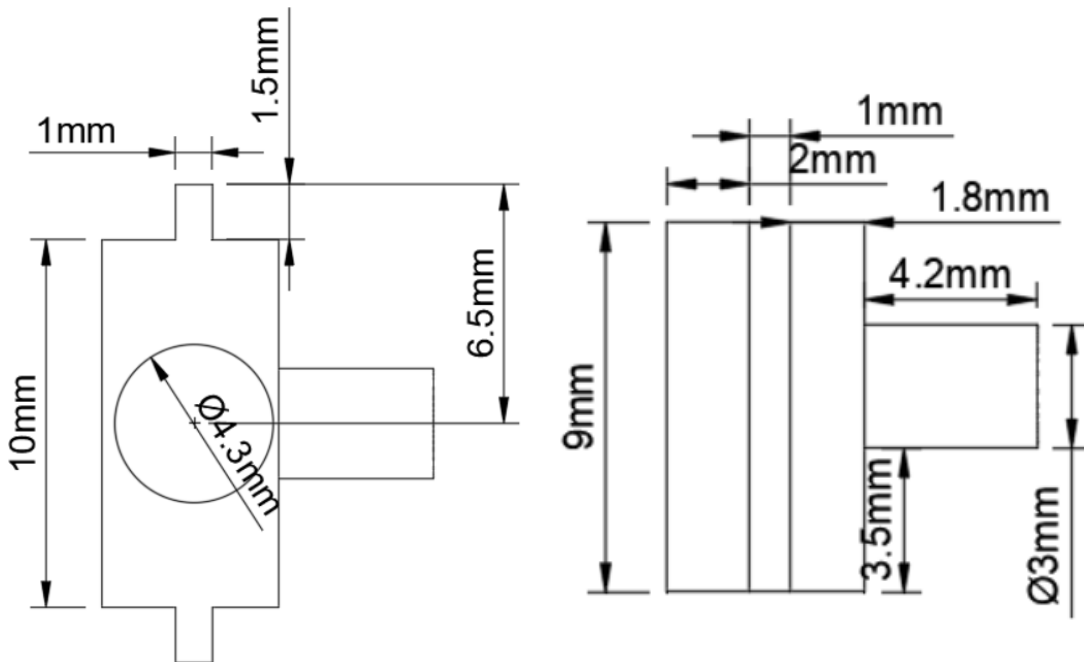


*Εικόνα 37 – Μπροστινή και πίσω όψη του τρισδιάστατου μοντέλου της δεύτερης έκδοσης*

Τέλος, στις επόμενες εικόνες, παρουσιάζονται οι κατόψεις και οι πλάγιες όψεις από κάθε εξάρτημα του σχεδίου της δεύτερης έκδοσης.



Εικόνα 38 – Κάτοψη και πλάγια όψη της βάσης της δεύτερης έκδοσης



Εικόνα 39 – Κάτοψη και πλάγια όψη οδηγού

### 4.1.3 Τρίτη έκδοση

Ενώ με τη δεύτερη έκδοση της συσκευασίας αντιμετωπίστηκαν αρκετά προβλήματα, όπως η ευκολότερη τοποθέτηση του πυκνωτή, όπως ήταν φυσικό προέκυψαν νέες προδιαγραφές και ανάγκες. Μια από αυτές ήταν ότι και πάλι ο χρήστης θα έπρεπε να έρθει σε επαφή με τον πυκνωτή κατά την τοποθέτηση του. Αυτό αποτέλεσε ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα στην περίπτωση που ο πυκνωτής δεν ήταν ευαίσθητος μόνο στο ένζυμο - υποδοχέα ACE2, αλλά και σε κάποια άλλη ουσία, η οποία πιθανώς να είναι βλαβερή και να χρήζει ειδικής αντιμετώπισης από τον χρήστη.

Επίσης, παρατηρήθηκε απόκλιση στην αγωγιμότητα των ρουλεμάν. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως οι δύο κύλινδροι του ρουλεμάν δεν είχαν πάντα αγωγή επαφή, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ασυνέχεια στο κύκλωμα της συσκευασίας του πυκνωτή.

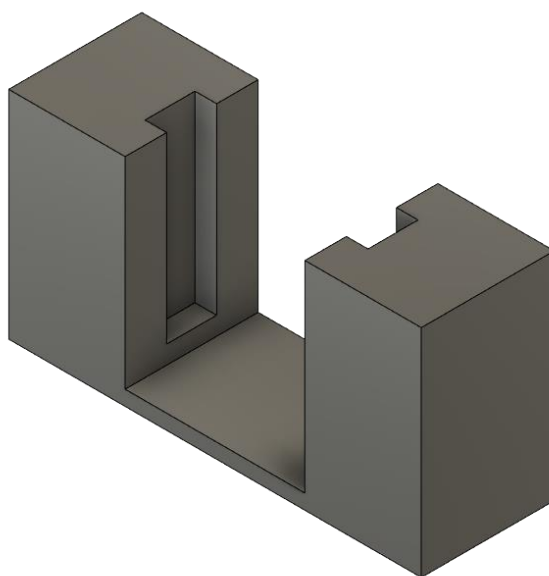
Για τους παραπάνω λόγους, στην τρίτη και τελική έκδοση της συσκευασίας χρησιμοποιήθηκαν και πάλι τα μεταλλικά ελάσματα της πρώτης έκδοσης, καθώς εξασφάλιζαν την αγωγή επαφή, με τη διαφορά ότι στην τρίτη έκδοση προστέθηκε και μηχανισμός ασφάλισης αυτών μέσω κοχλίας. Ο χρήστης πλέον θα μπορούσε να αλλάζει το ύψος των ελασμάτων, περιστρέφοντας μια βίδα, επιτρέποντας έτσι την ευκολότερη τοποθέτηση, αλλά και ασφαλή συγκράτηση του πυκνωτή. Βασικό στοιχείο και προδιαγραφή αυτής της προσθήκης ήταν ο μηχανισμός να αποτελείται από μια μόνο βίδα για τη διευκόλυνση του χρήστη.

Επίσης, προστέθηκε θήκη, στην οποία συγκρατείται ο πυκνωτής, με σκοπό ο χρήστης να μη χρειάζεται να έρχεται σε επαφή με τον ίδιο τον πυκνωτή. Επίσης, η θήκη βοηθά και στη συγκράτηση του πυκνωτή, σε περίπτωση μεταφοράς της διάταξης.

Η βάση της τρίτης έκδοσης φέρει χαρακτηριστικά από τις δύο προηγούμενες, συνδυάζοντας ουσιαστικά τα πλεονεκτήματα της κάθε μιας. Τα μεταλλικά ελάσματα τοποθετήθηκαν σε μεγαλύτερο ύψος από τη βάση, ώστε να μπορούν μέσω της σκληρότητας τους να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση κατά την αντιωρολογιακή περιστροφή της βίδας.

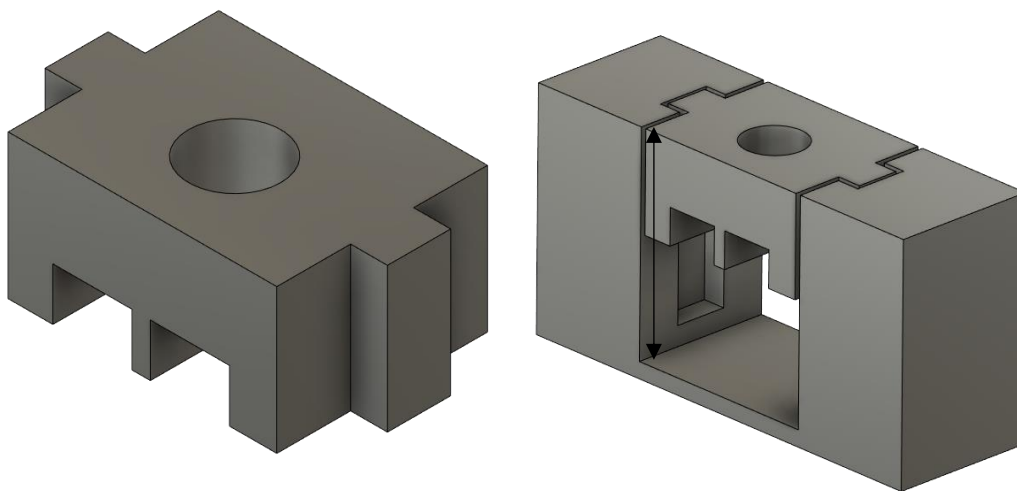
Για τη στερέωση και ασφάλιση του πυκνωτή σχεδιάστηκε μηχανισμός αποτελούμενος από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι σταθερό και ενιαίο με τη βάση και το δεύτερο μπορεί να μετατοπίζεται κατά τον άξονα z με τη στρέψη της βίδας.

Το σταθερό μέρος (Εικόνα 40), το οποίο τοποθετήθηκε στο μπροστινό μέρος της βάσης, όπου σχεδιάστηκαν οδηγοί πάχους 3mm και βάθους 1.3mm, με σκοπό την ορθή μετατόπιση του μηχανισμού στερέωσης, αλλά και την αποφυγή μετατοπίσεων αυτού κατά το x-y επίπεδο.



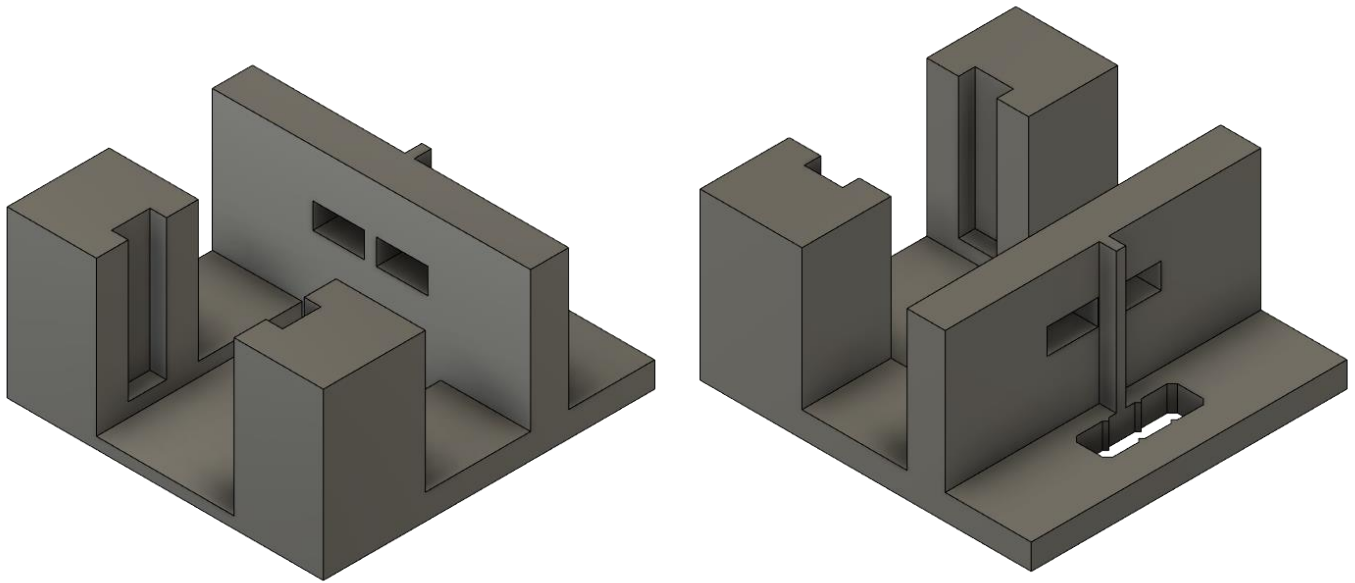
*Εικόνα 40 – Οδηγοί του μηχανισμού στερέωσης τρίτης έκδοσης*

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε ο μηχανισμός στερέωσης του πυκνωτή. Στο κάτω μέρος αυτού υπάρχουν κατάλληλα σχεδιασμένες εσοχές για την τοποθέτηση των άκρων των ελασμάτων, αλλά και διαχωριστικό για την αποφυγή επαφής αυτών για την αποφυγή βραχυκυκλώματος. Στο πάνω μέρος υπάρχει εσοχή βάθους 2.5mm και διαμέτρου 3.5mm για την τοποθέτηση της βίδας. Ο μηχανισμός στερέωσης, μόνος του, αλλά και σε συνδυασμό με τους οδηγούς της βάσης, φαίνονται στην Εικόνα 41.



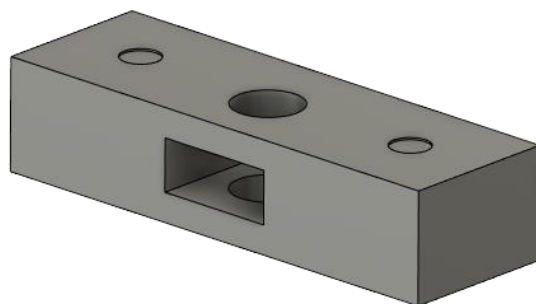
*Εικόνα 41 – Μηχανισμός στερέωσης της τρίτης έκδοσης*

Για τη σχεδίαση του υπόλοιπου μέρους της βάσης χρησιμοποιήθηκε σαν πρότυπο το σχέδιο της βάσης της πρώτης έκδοσης με τη διαφορά ότι σχεδιάστηκε ακόμα ένα διαχωριστικό στο πίσω μέρος, ούτως ώστε να αποφευχθεί τυχόν βραχυκύκλωμα του πίσω μέρους των μεταλλικών ελασμάτων. Υπάρχει και πάλι ειδική υποδοχή για την στερέωση των ακίδων διασύνδεσης με το ηλεκτρονικό κύκλωμα μέτρησης της χωρητικότητας. Η μπροστινή και η πίσω όψη του τρισδιάστατου μοντέλου της βάσης της τρίτης έκδοσης φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 42.



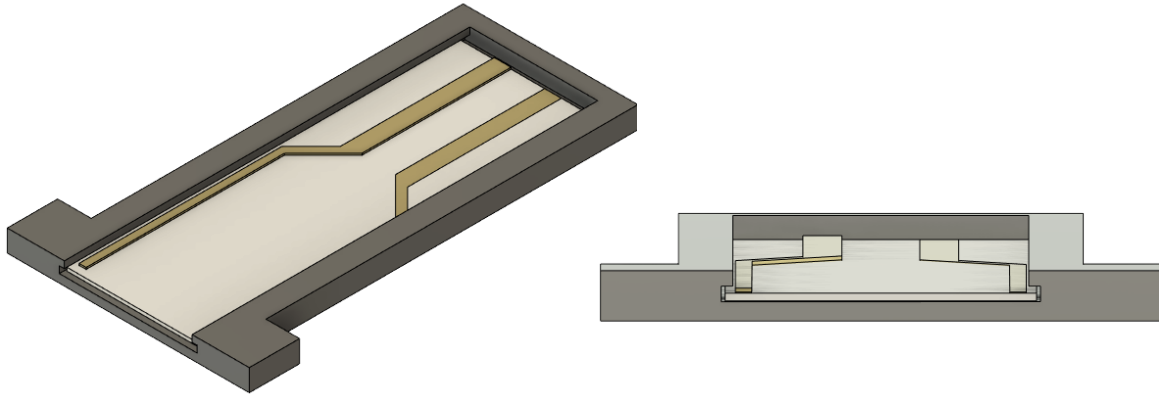
*Εικόνα 42 – Μπροστινή και πίσω όψη του τρισδιάστατου μοντέλου της βάσης της τρίτης έκδοσης*

Για τη μετατόπιση του μηχανισμού στερέωσης κατά τον άξονα  $z$ , αλλά και την τοποθέτηση της βίδας, σχεδιάστηκε καπάκι, το οποίο θα ενωθεί κατά το στάδιο της κατασκευής με το πάνω μέρος των οδηγών της βάσης. Στο μέσο αυτού υπάρχει εσοχή για τοποθέτηση παξιμαδιού κατάλληλης διαμέτρου, συμβατού με τη βίδα, όπως επίσης και κυλινδρική διαμπερής υποδοχή για τη βίδα. Το τρισδιάστατο μοντέλο αυτού, φαίνεται παρακάτω, στην Εικόνα 43.



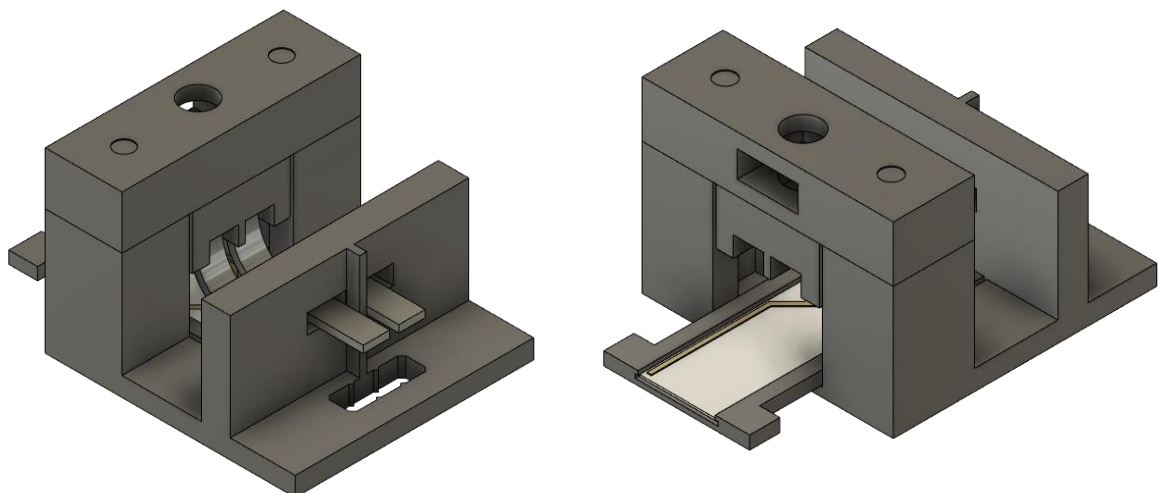
*Εικόνα 43 – Τρισδιάστατο μοντέλο μηχανισμού στερέωσης*

Τέλος, σχεδιάστηκε η θήκη, στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ο πυκνωτής. Ο σχεδιασμός της θήκης, μέσω κατάλληλων προεξοχών στο πάνω μέρος, δεν επιτρέπει τη μετακίνηση του πυκνωτή, παρά μόνο κατά μια κατεύθυνση, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί με ασφάλεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 44.



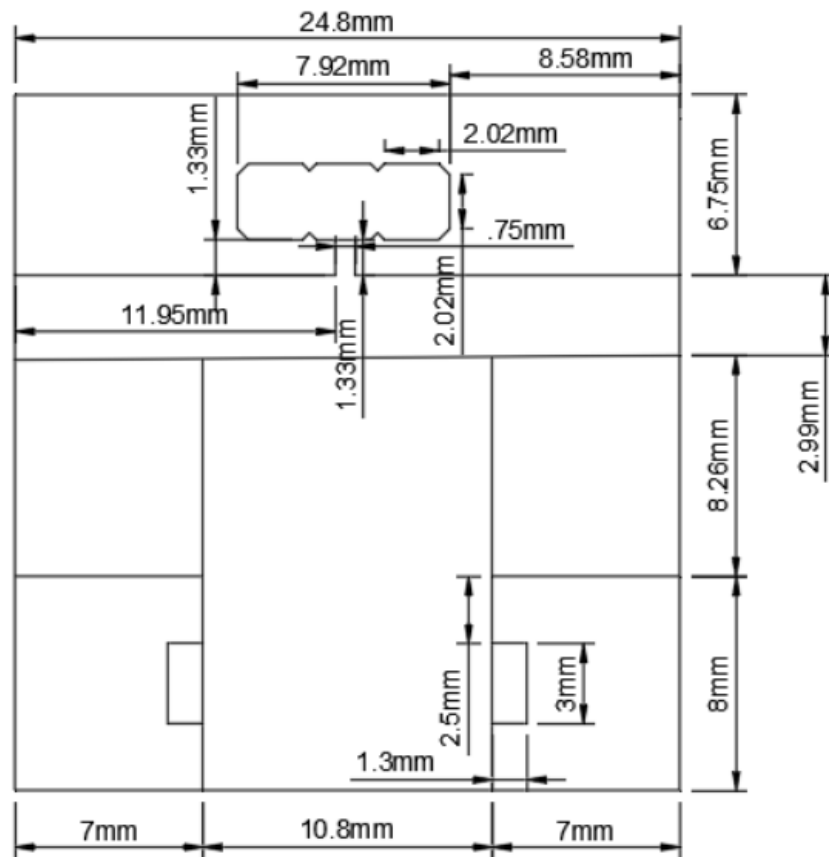
*Εικόνα 44 – Θήκη συγκράτησης πυκνωτή τρίτης έκδοσης*

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 45), φαίνεται το τρισδιάστατο μοντέλο της τρίτης έκδοσης της συσκευασίας του πυκνωτή, μαζί με όλα τα εξαρτήματα που σχεδιάστηκαν, τα μεταλλικά ελάσματα για την αγώγιμη επαφή με τα ηλεκτρόδια του πυκνωτή, καθώς και τον πυκνωτή τοποθετημένο στη θήκη.

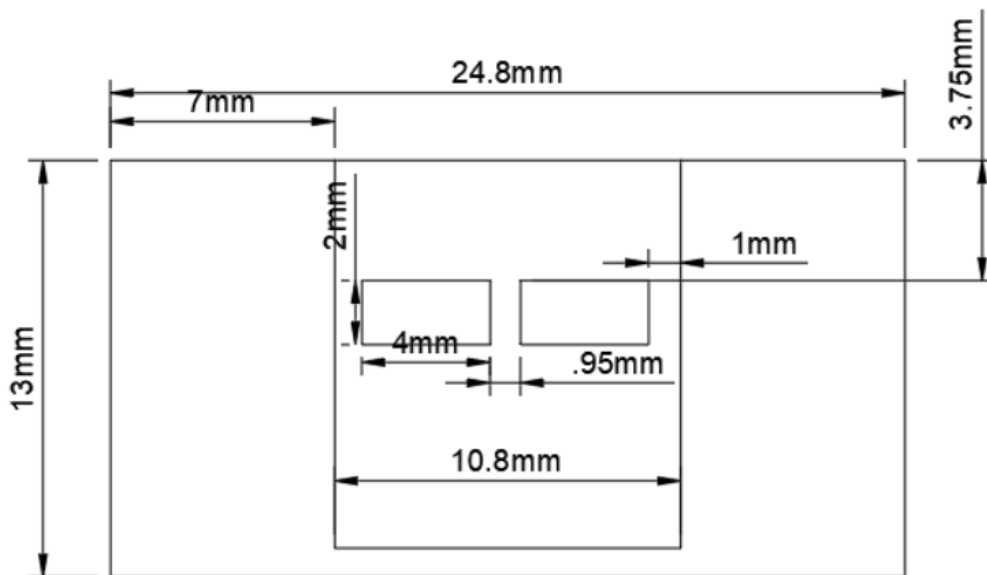


*Εικόνα 45 – Μπροστινή και πίσω όψη του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου της τρίτης έκδοσης*

Στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι κατόψεις, οι πλάγιες και οι μπροστινές όψεις των σχεδίων της συσκευασίας του πυκνωτή της τρίτης έκδοσης.

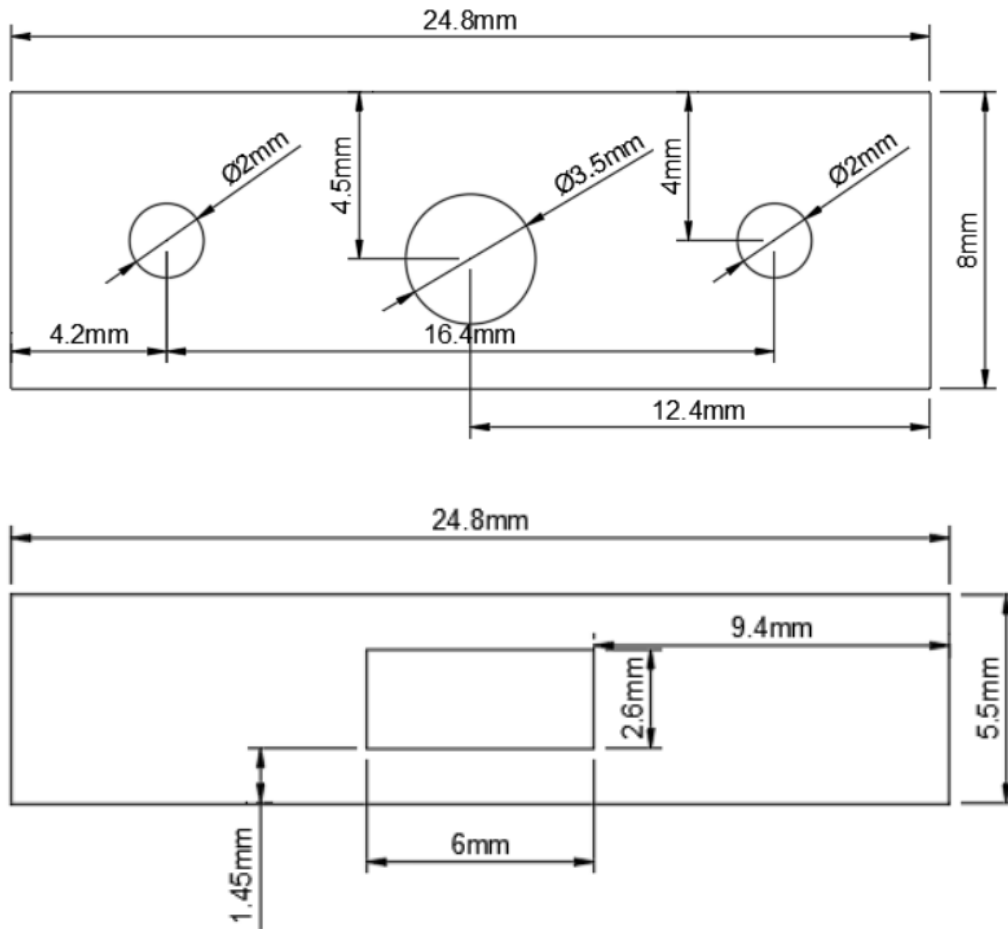


Εικόνα 46 – Κάτοψη βάσης συσκευασίας πυκνωτή τρίτης έκδοσης

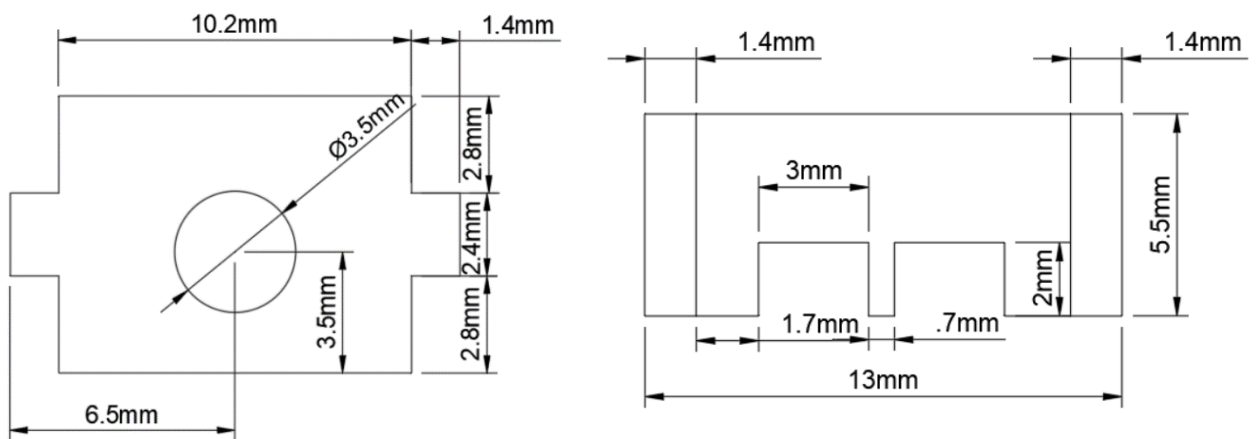


Εικόνα 47 – Μπροστινή όψη βάσης συσκευασίας πυκνωτή τρίτης έκδοσης

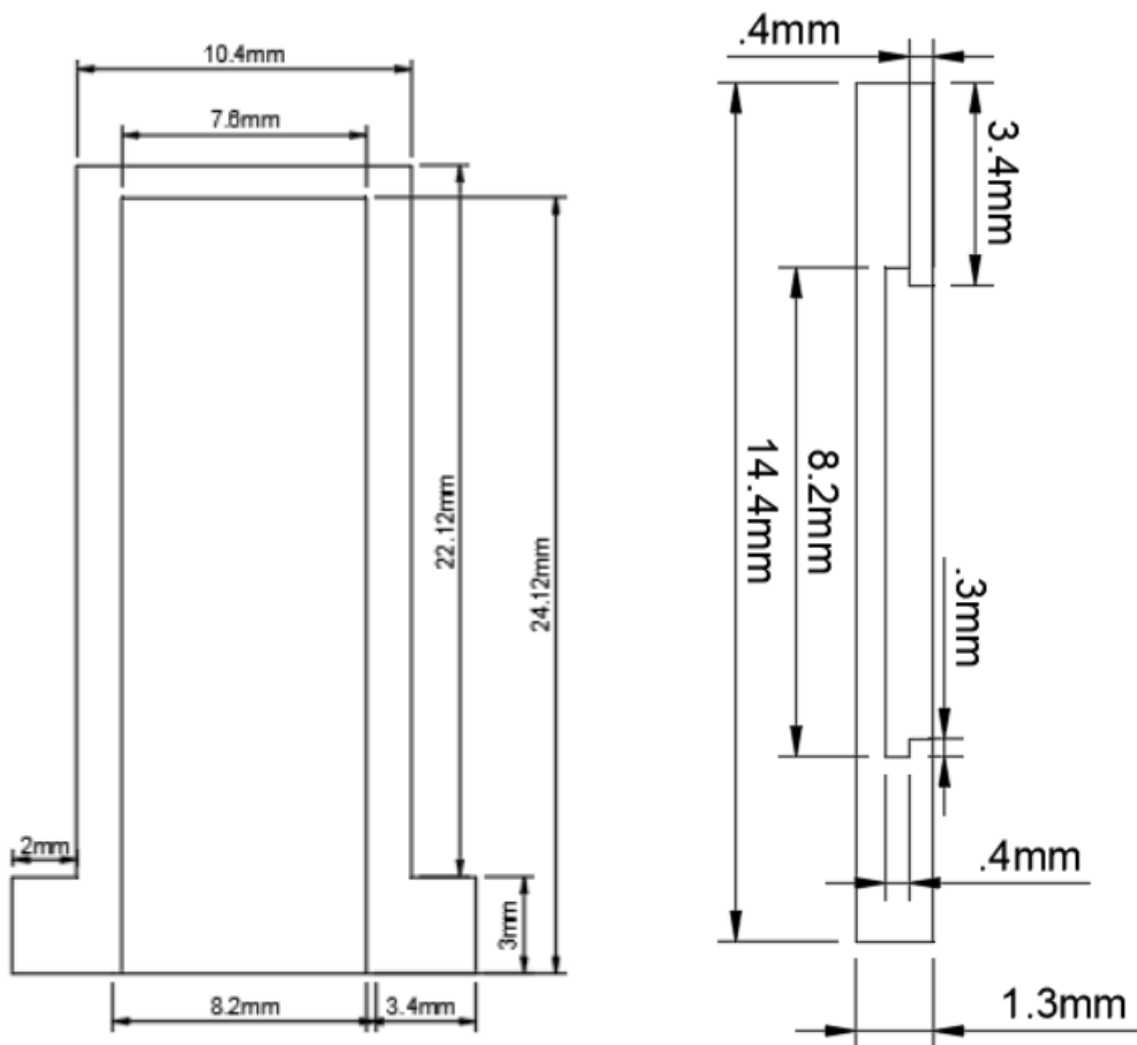




Εικόνα 49 – Κάτοψη και μπροστινή όψη μηχανισμού στερέωσης



Εικόνα 48 – Κάτοψη και μπροστινή όψη μηχανισμού στερέωσης ελασμάτων

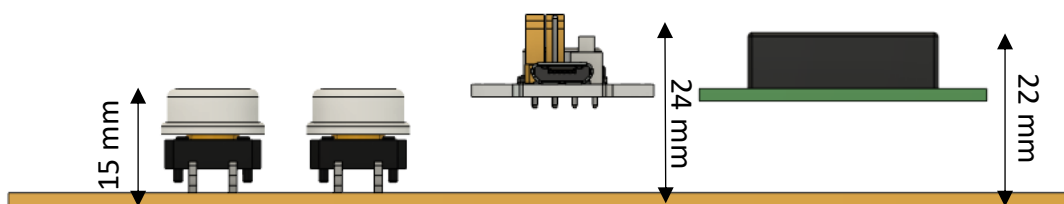


Εικόνα 50 – Κάτοψη και μπροστινή όψη θήκης πυκνωτή

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού της συσκευασίας της ηλεκτρονικής μετρητικής συσκευής της χωρητικότητας.

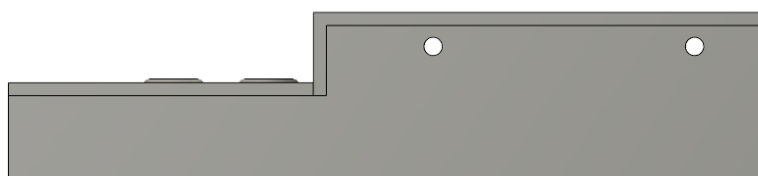
## 4.2 Συσκευή μέτρησης χωρητικότητας

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο των προδιαγραφών της σχεδίασης, οι δύο βασικότερες προδιαγραφές που τέθηκαν κατά τη διαδικασία σχεδιασμού της συσκευασίας της συσκευής μέτρησης χωρητικότητας, ήταν η δυνατότητα αλληλεπίδρασης του χρήστη με τα στοιχεία εισόδου/εξόδου, δηλαδή τα κουμπιά, τον διακόπτη αλλαγής κλίμακας και την οθόνη LCD, αλλά και η θύρα διασύνδεσης με τη συσκευασία του πυκνωτή.



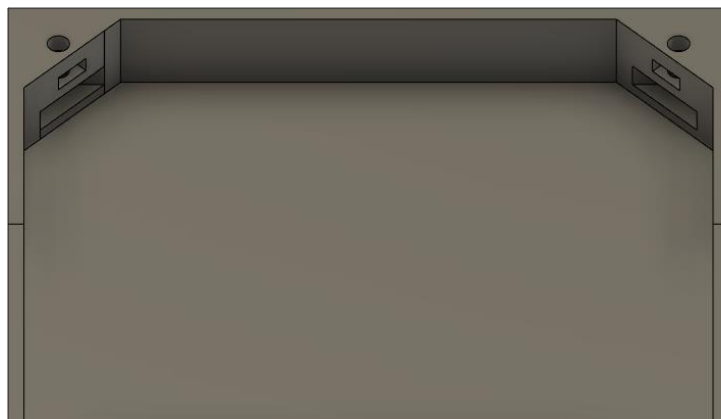
Εικόνα 51 – Μορφολογία υψών συσκευής μέτρησης χωρητικότητας

Εξαιτίας του διαφορετικού ύψους των κουμπιών από τη βάση της πλακέτας (15 mm), αλλά και της οθόνης (22 mm) και επειδή το μέγιστο ύψος ήταν αυτό του μικροελεγκτή STM32(24 mm) (Εικόνα 51), η συσκευασία σχεδιάστηκε σε δύο επίπεδα, ώστε να συμβαδίζει με την μορφολογία της πλακέτας και να επιτρέπει την αλληλεπίδραση με τον χρήστη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 52.



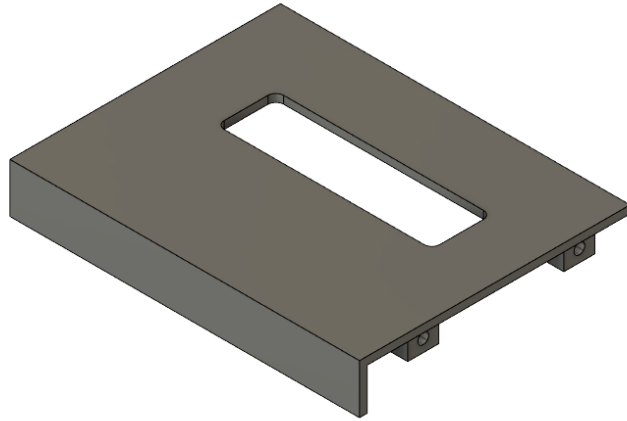
Εικόνα 52 - Πλάγια όψη συσκευασίας συσκευής μέτρησης

Ο πρώτος στόχος της σχεδίασης ήταν η πάκτωση της συσκευής μέτρησης, χωρίς να γίνουν τροποποιήσεις στην πλακέτα, δηλαδή χωρίς να χρειαστεί διάνοιξη οπών. Για τον λόγο αυτόν, σχεδιάστηκαν γωνιακές σχισμές ύψους 6mm, ώστε να μπορέσουν οι γωνίες του κάτω μέρους της πλακέτας να σφηνωθούν εντός αυτών. Η πλακέτα θα στηρίζεται 2mm πάνω από τη βάση της συσκευασίας, ώστε τα ηλεκτρονικά μέρη του κάτω μέρους της πλακέτας να μην έρχονται σε επαφή με τη βάση της συσκευασίας. Επειδή το πάχος της πλακέτας ήταν 2mm, το ύψος των σχισμών των 6mm εξασφαλίζει πως δε θα προκληθεί κάποια ζημιά στην πλακέτα ή στις κολλήσεις που υπάρχουν στο κάτω μέρος αυτής. Πάνω από τις σχισμές τοποθετήθηκαν οπές για παξιμάδια, καθώς και οπές για τη στερέωση του καπακιού του κάτω μέρους της συσκευασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53 – Κάτω μέρος συσκευασίας συσκευής μέτρησης

Για το πάνω μέρος της πλακέτας και την πάκτωση αυτής χρησιμοποιήθηκαν οι προϋπάρχουσες οπές της πλακέτας, οι οποίες ήταν ομόκεντρες με αντίστοιχες οπές στην οθόνη LCD. Τοποθετήθηκαν επίσης πλαϊνές οπές, τόσο για βίδες, όσο και για τα παξιμάδια, για τη στερέωση του καπακιού του πάνω μέρους της συσκευασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 54.

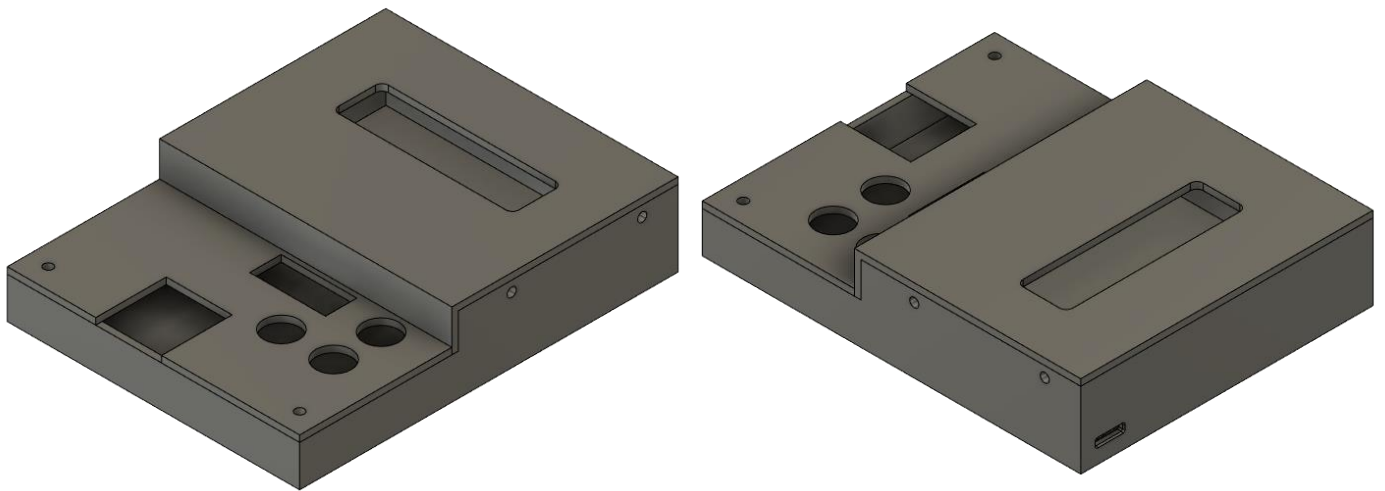


*Εικόνα 54 – Καπάκι άνω μέρους της συσκευασίας*

Για την αλληλεπίδραση του χρήστη με τη συσκευή μέτρησης σχεδιάστηκαν κατάλληλες οπές ώστε:

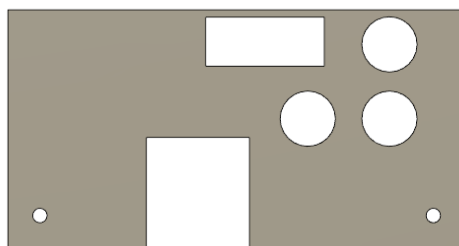
- Να φαίνεται επαρκώς η οθόνη LCD.
- Να μπορεί ο χρήστης να αλληλοεπιδράσει με τα κουμπιά και τον διακόπτη αλλαγής κλίμακας.
- Να μπορεί να ενσωματωθεί η συσκευασία του πυκνωτή.
- Να μπορούν να εξέλθουν τα καλώδια τροφοδοσίας και σειριακής εξόδου.

Η μπροστινή και πίσω όψη του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου της συσκευασίας της ηλεκτρονικής συσκευής μέτρησης φαίνεται στην Εικόνα 55.



*Εικόνα 55 – Μπροστινή και πίσω όψη του τρισδιάστατου μοντέλου της συσκευασίας*

Η σχεδίαση κατέληξε σε τρία συνολικά μέρη: μια ενιαία βάση και δύο καπάκια, ένα για το κάτω μέρος της συσκευής, το οποίο φέρει οπές για τα κουμπιά αλληλεπίδρασης (Εικόνα 56), τον διακόπτη αλλαγής κλίμακας και τη συσκευασία του πυκνωτή και ένα για το πάνω μέρος, όπου υπάρχει οπή, για να φαίνεται η οθόνη LCD. Το πάχος των τοιχωμάτων ορίστηκε στα 2.5mm.



*Εικόνα 56 – Καπάκι κάτω μέρους*

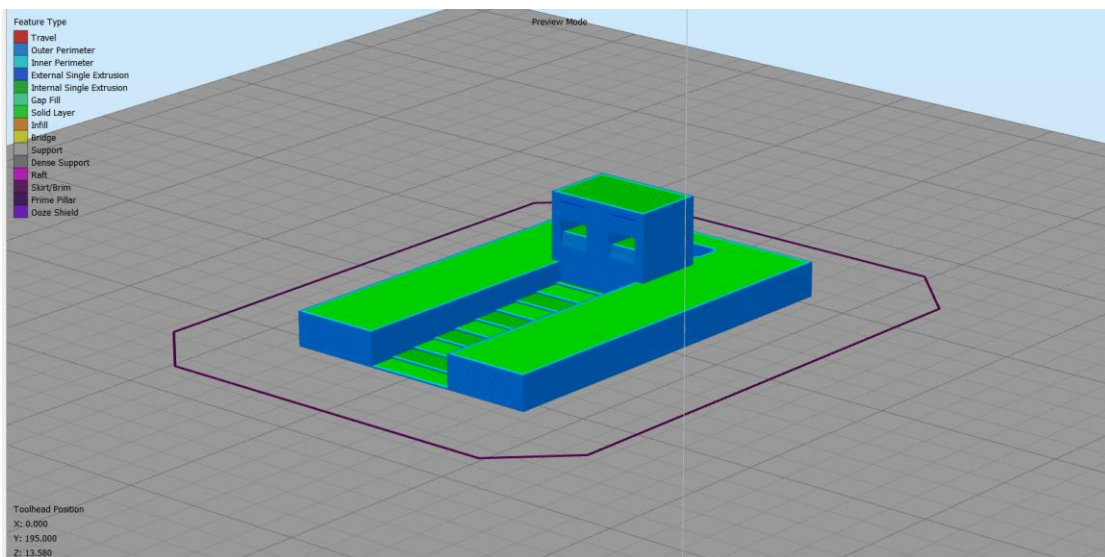
## 5 Κατασκευή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία της κατασκευής, ξεκινώντας από τις ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν κατά τον τεμαχισμό των τρισδιάστατων σχεδίων (slicing) και συνεχίζοντας στη διαδικασία κατασκευής, συναρμολόγησης και αξιολόγησης της κάθε έκδοσης της συσκευασίας. Για όλες τις εκτυπώσεις χρησιμοποιήθηκαν κοινές θερμοκρασίες κεφαλής και επιφάνειας. Η θερμοκρασία κεφαλής ήταν  $T_{nozzle} = 185^{\circ}\text{C}$ , ενώ η θερμοκρασία της επιφάνειας ήταν  $T_{bed} = 60^{\circ}\text{C}$ . Για υλικό, χρησιμοποιήθηκαν νήματα θερμοπλαστικού τύπου PLA της εταιρίας Anycubic®, διαμέτρου 1.75mm.

### 5.1 Κατασκευή συσκευασίας πυκνωτή

#### 5.1.1 Πρώτη έκδοση

Η πρώτη έκδοση της συσκευασίας του πυκνωτή αποτελείται από ένα ενιαίο κομμάτι πάνω στο οποίο θα τοποθετηθούν τα μεταλλικά ελάσματα. Η διαδικασία τεμαχισμού φαίνεται στην Εικόνα 57. Οι ρυθμίσεις εκτύπωσης φαίνονται στον Πίνακα 4.

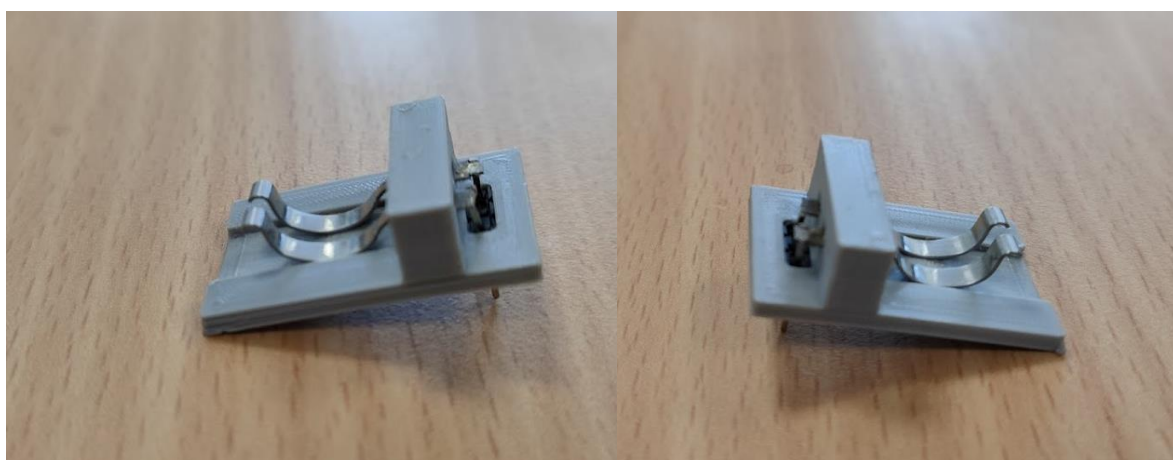


Εικόνα 57 – Διαδικασία τεμαχισμού της πρώτης έκδοσης

Πίνακας 4 - Παράμετροι εκτύπωσης πρώτης έκδοσης

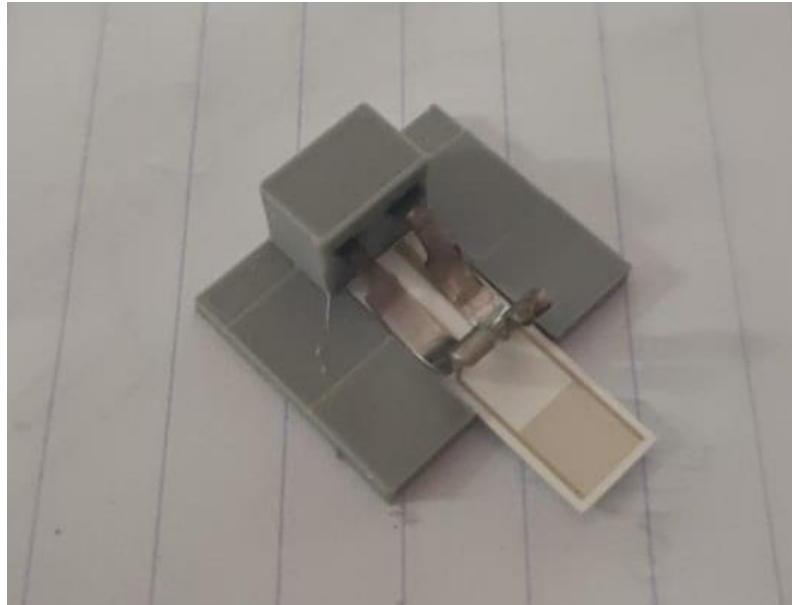
Πάχος στρώσης	0.2 mm
Ύψος στρώσης	0.15 mm
Άνω/Κάτω επιφάνειες	3/3
Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	3
Ποσοστό πλήρωσης	30%
Ταχύτητα Εκτύπωσης	50 mm/s

Επειδή πρόκειται για ένα αντικείμενο με πολύ μικρές διαστάσεις, επιλέχθηκαν αντίστοιχα χαμηλές τιμές πάχους και ύψους στρώσης. Παρακάτω στην Εικόνα 58, φαίνεται η κατασκευή της πρώτης έκδοσης της συσκευασίας του πυκνωτή με τοποθετημένα τα μεταλλικά ελάσματα, ενώ στην Εικόνα 59 φαίνεται η συσκευασία με τοποθετημένο τον πυκνωτή. Για τη στερέωση των ελασμάτων, έγινε πρώτα θέρμανση αυτών με κατάλληλη συσκευή, ώστε κατά την τοποθέτηση να λιώσει μέρος του πλαστικού της οπής και να τα συγκρατήσει. Η επαφή με τον πυκνωτή ήταν ικανοποιητική, αλλά και στο σωστό σημείο, ακριβώς πάνω από τα ηλεκτρόδια του.



Εικόνα 58 – Κατασκευή πρώτης έκδοσης

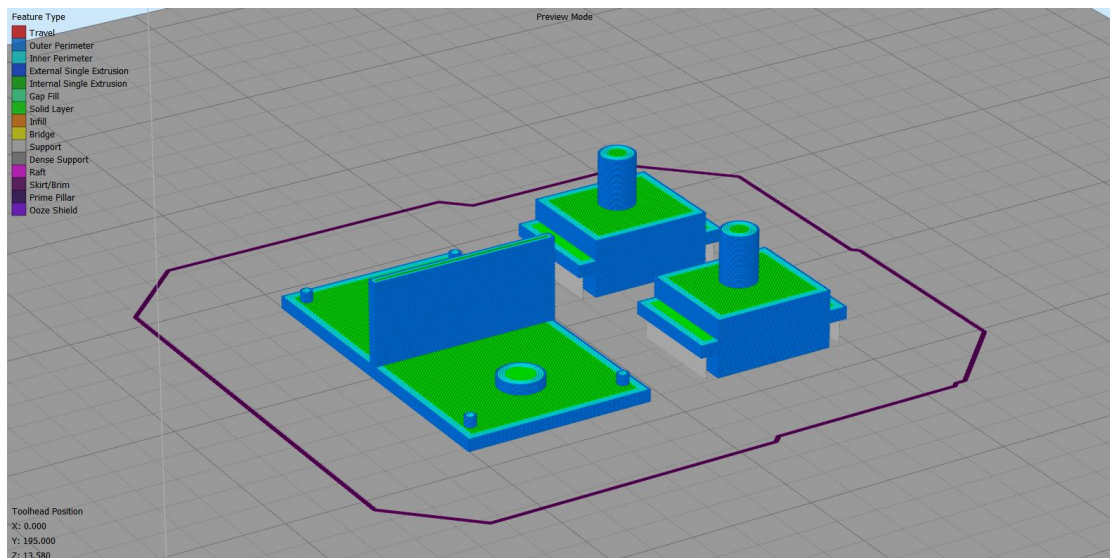




Εικόνα 59 – Πρώτη έκδοση συσκευασίας με τον πυκνωτή

### 5.1.2 Δεύτερη έκδοση

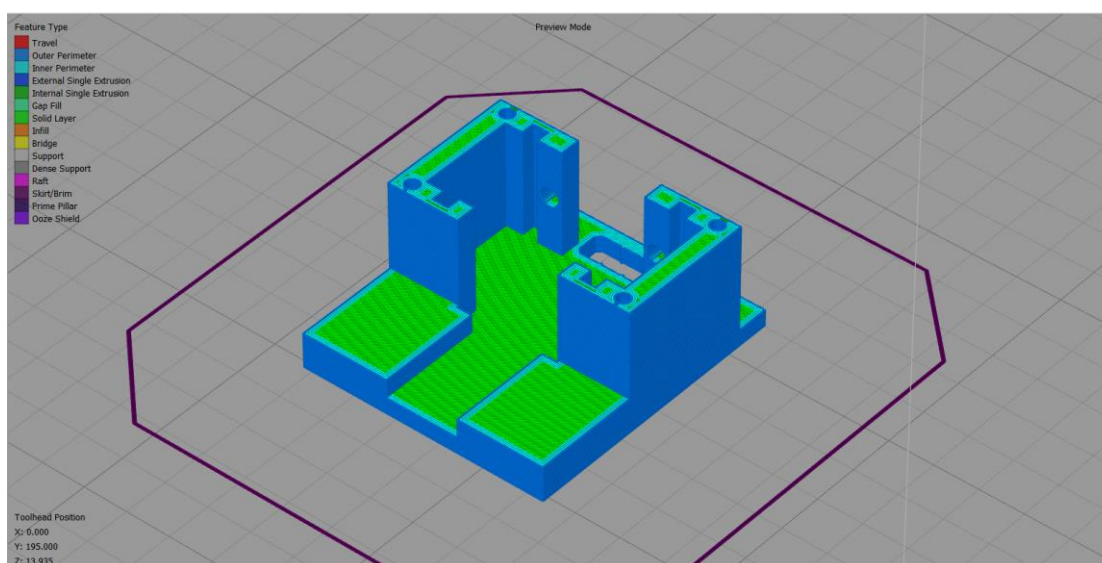
Η δεύτερη έκδοση αποτελείται συνολικά από τέσσερα αντικείμενα προς εκτύπωση: τη βάση, δύο οδηγούς και το καπάκι της συσκευασίας. Οι δύο οδηγοί μαζί με το καπάκι της συσκευασίας κατασκευάστηκαν ταυτόχρονα, καθώς είχαν αντίστοιχες γεωμετρίες. Επίσης, για τη δημιουργία των οδηγών χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 60 – Τεμαχισμός σχεδίου οδηγών και καπακιού δεύτερης έκδοσης

υποστηρικτικό υλικό, απαραίτητο για τη δημιουργία των πλαϊνών προεξοχών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 60.

Η βάση εκτυπώθηκε μόνης της (Εικόνα 61), καθώς χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές και διαφοροποίηση των παραμέτρων λόγω της σύνθετης γεωμετρίας της. Οι ρυθμίσεις εκτύπωσης που επιλέχθηκαν και για τις δύο εκτυπώσεις φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 5.

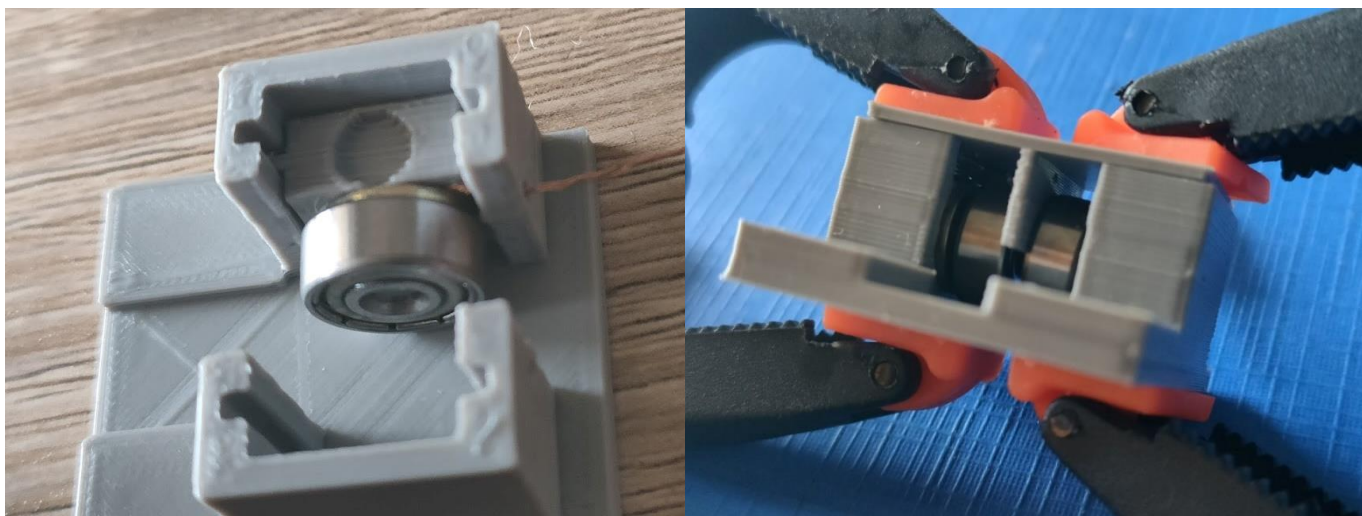


Εικόνα 61- Τεμαχισμός σχεδίου βάσης δεύτερης έκδοσης

Πίνακας 5 – Παράμετροι εκτύπωσης δεύτερης έκδοσης

Οδηγοί και καπάκι		Βάση	
Πάχος στρώσης	0.18 mm	Πάχος στρώσης	0.2 mm
Ύψος στρώσης	0.10 mm	Ύψος στρώσης	0.12 mm
Άνω/Κάτω επιφάνειες	2/2	Άνω/Κάτω επιφάνειες	3/3
Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	3	Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	4
Ποσοστό πλήρωσης	30%	Ποσοστό πλήρωσης	30%
Ταχύτητα Εκτύπωσης	50 mm/s	Ταχύτητα Εκτύπωσης	50 mm/s

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 62) φαίνεται η διαδικασία κατασκευής και συγκόλλησης της δεύτερης έκδοσης. Στην αριστερή εικόνα φαίνεται ο μηχανισμός αγωγίμης επαφής, καθώς και η έξοδος του καλωδίου, με σκοπό να ενωθεί με τη συσκευή μέτρησης, ενώ στη δεξιά εικόνα φαίνεται η τελική κατασκευή κατά τη φάση της συγκόλλησης.



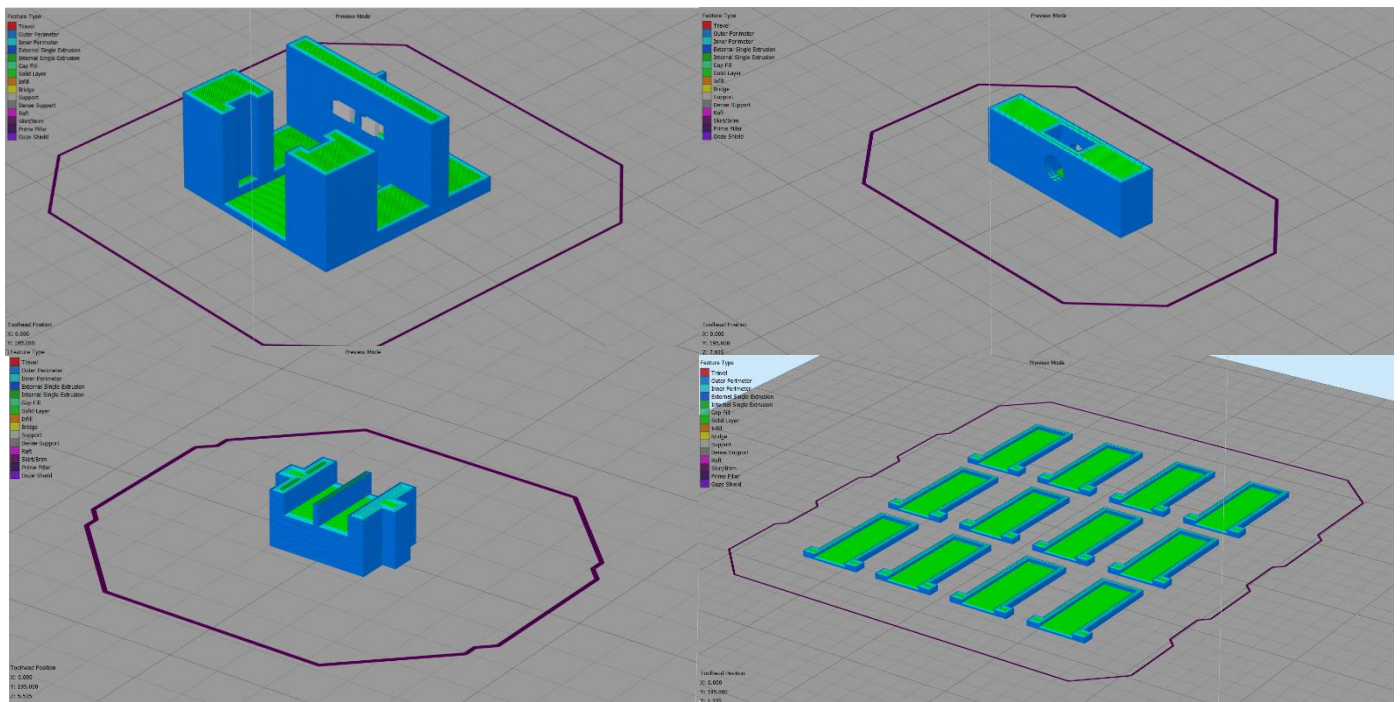
Εικόνα 62 – Κατασκευή συσκευασίας δεύτερης έκδοσης

### 5.1.3 Τρίτη έκδοση

Η τρίτη έκδοση της συσκευασίας του πυκνωτή αποτελείται από τέσσερα συνολικά αντικείμενα προς εκτύπωση:

- Βάση συσκευασίας
- Οδηγός
- Καπάκι στερέωσης
- Θήκη πυκνωτή

Παρακάτω, στην Εικόνα 63, φαίνεται η διαδικασία τεμαχισμού των αντικειμένων, από τα οποία απαρτίζεται η τρίτη έκδοση, ξεκινώντας με τη βάση της συσκευασίας. Όπου κρίθηκε απαραίτητο, τοποθετήθηκε υποστηρικτικό υλικό και επιλέχθηκαν οι βέλτιστες ρυθμίσεις εκτύπωσης (Πίνακας 6 ).



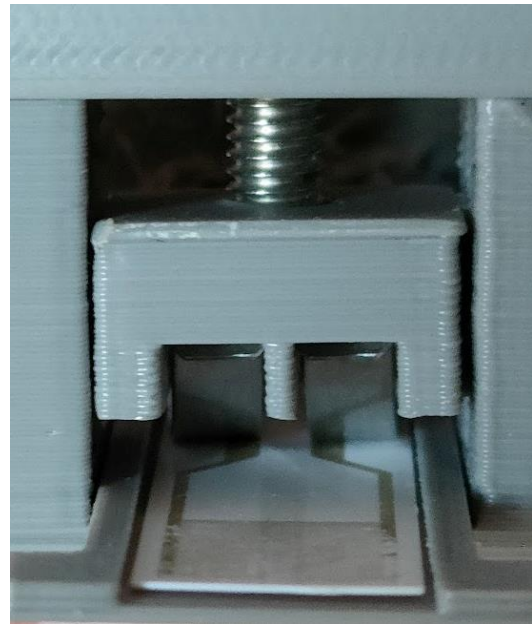
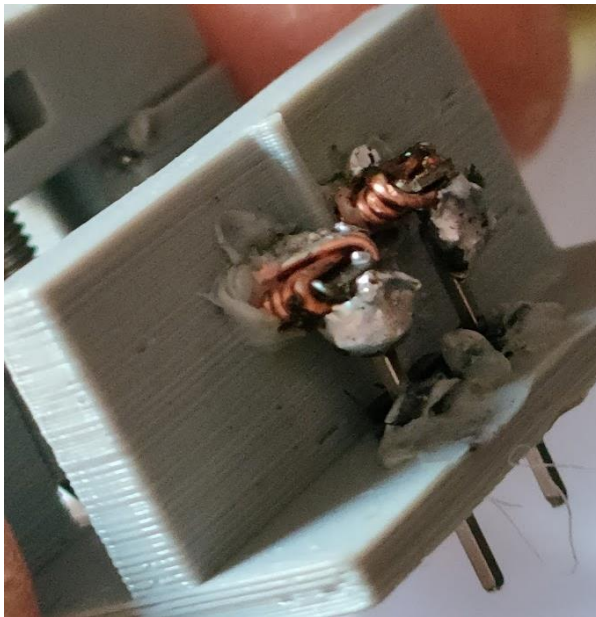
Εικόνα 63 – Τεμαχισμός τρίτης έκδοσης

Πίνακας 6 – Παράμετροι εκτύπωσης τρίτης έκδοσης

	Βάση	Καπάκι και οδηγοί	Θήκη
Πάχος στρώσης	0.18 mm	0.2 mm	0.16 mm
Ύψος στρώσης	0.10 mm	0.12 mm	0.10 mm
Άνω/Κάτω επιφάνειες	2/3	3/3	2/2
Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	4	3	2
Ποσοστό πλήρωσης	30%	30%	30%
Ταχύτητα Εκτύπωσης	55 mm/s	50 mm/s	40 mm/s

Στη συνέχεια, έγινε η συναρμολόγηση των επιμέρους κομματιών της τρίτης έκδοσης. Επειδή τα ελάσματα είναι φτιαγμένα από ανοξείδωτο ατσάλι, η κόλληση αυτών με τις ακίδες διασύνδεσης δεν ήταν δυνατή μέσω συμβατικής κόλλησης. Για αυτόν τον λόγο, το πίσω μέρος των ελασμάτων τυλίχθηκε με χάλκινο σύρμα και στη συνέχεια έγινε κόλληση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 64. Επίσης, φαίνεται και η θέση

των ελασμάτων σε σχέση με τα ηλεκτρόδια, η οποία ήταν η βέλτιστη δυνατή, αφού τα ελάσματα ακουμπάνε σε όλο το εμβαδόν των ηλεκτροδίων (Εικόνα 64).



*Εικόνα 64 – Επιμέρους στοιχεία της τρίτης έκδοσης*

Τέλος, τοποθετήθηκε η βίδα και το παξιμάδι συγκράτησης στο πάνω μέρος της συσκευασίας, το οποίο πακτώθηκε με μεταλλικές ράβδους μικρής διαμέτρου. Επίσης, κατασκευάστηκε και η θήκη του πυκνωτή. Η τελική κατασκευή της συσκευασίας φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 65.



*Εικόνα 65 – Τελική κατασκευής τρίτης έκδοσης*

## 5.2 Κατασκευή συσκευασίας συσκευής μέτρησης

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει αναφορά της διαδικασίας κατασκευής και συναρμολόγησης της συσκευασίας της συσκευής μέτρησης χωρητικότητας. Η συσκευασία αποτελείται από συνολικά τρία μέρη:

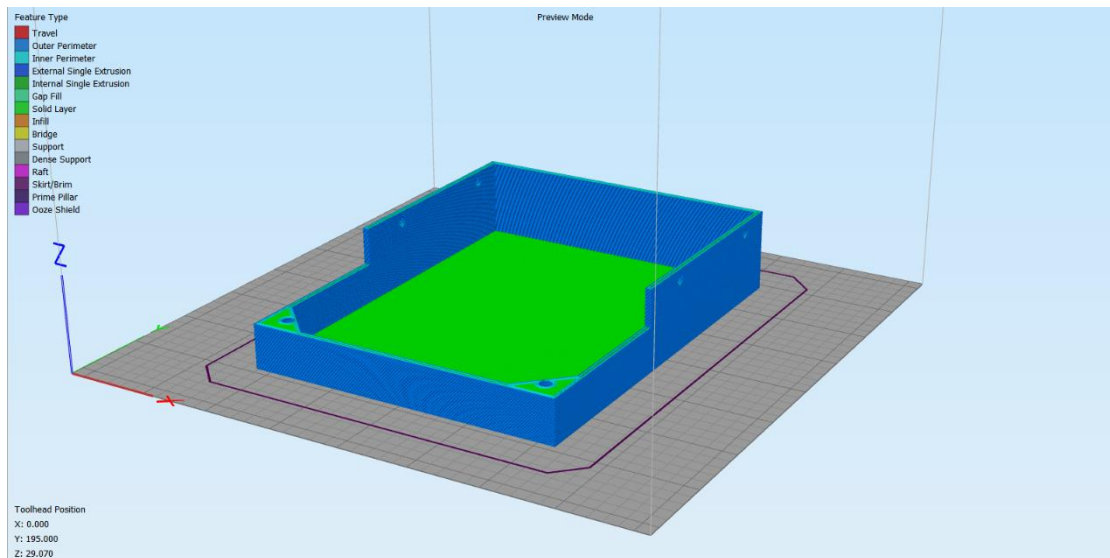
- Τη βάση της συσκευασίας
- Το καπάκι του πάνω μέρους
- Το καπάκι του κάτω μέρους

Λόγω του μεγέθους, αλλά και της ανάγκης για μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, σε σχέση με τη συσκευασία του πυκνωτή, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ρυθμίσεις εκτύπωσης κατά τη διαδικασία τεμαχισμού, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7 – Παράμετροι εκτύπωσης βάσης

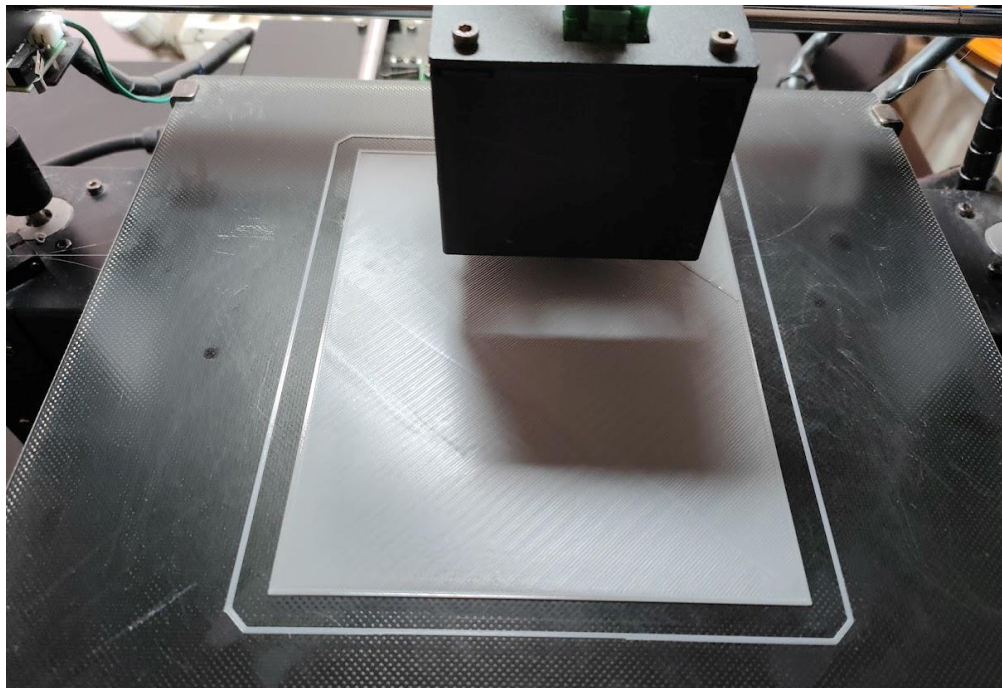
<b>Βάση</b>	
Πάχος στρώσης	0.40 mm
Ύψος στρώσης	0.30 mm
Άνω/Κάτω επιφάνειες	5/5
Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	5
Ποσοστό πλήρωσης	30%
Ταχύτητα Εκτύπωσης	65 mm/s

Παρακάτω, στην Εικόνα 67, απεικονίζεται η διαδικασία τεμαχισμού της βάσης της συσκευασίας της συσκευής μέτρησης. Δε χρειάστηκε καθόλου υποστηρικτικό υλικό, καθώς δεν υπήρχαν μέρη, τα οποία να βρίσκονται υπό μεγάλες γωνίες ή χωρίς στήριξη από την ίδια την κατασκευή. Αντιθέτως, όπως παρουσιάζεται και από τις ρυθμίσεις εκτύπωσης στον Πίνακα 7, δόθηκε έμφαση στη μηχανική αντοχή της βάσης, αυξάνοντας τον αριθμό των περιμετρικών τοιχωμάτων, αλλά και αλλάζοντας από τις προχωρημένες ρυθμίσεις το πάχος των περιμετρικών τοιχωμάτων.



Εικόνα 67 – Τεμαχισμός βάσης συσκευασίας συσκευής μέτρησης

Για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχουν φαινόμενα αποκόλλησης και ότι οι επιφάνειες που θα δημιουργηθούν κατά την εκτύπωση θα είναι όσο το δυνατόν πιο λείες, δόθηκε μεγάλη προσοχή στη διαδικασία επιπέδωσης (levelling) της επιφάνειας εκτύπωσης. Αυτό έγινε μέσω διαδοχικών δοκιμών, με σκοπό η κεφαλή εκτύπωσης να ισαπέχει από κάθε σημείο της επιφάνειας εκτύπωσης. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 66.



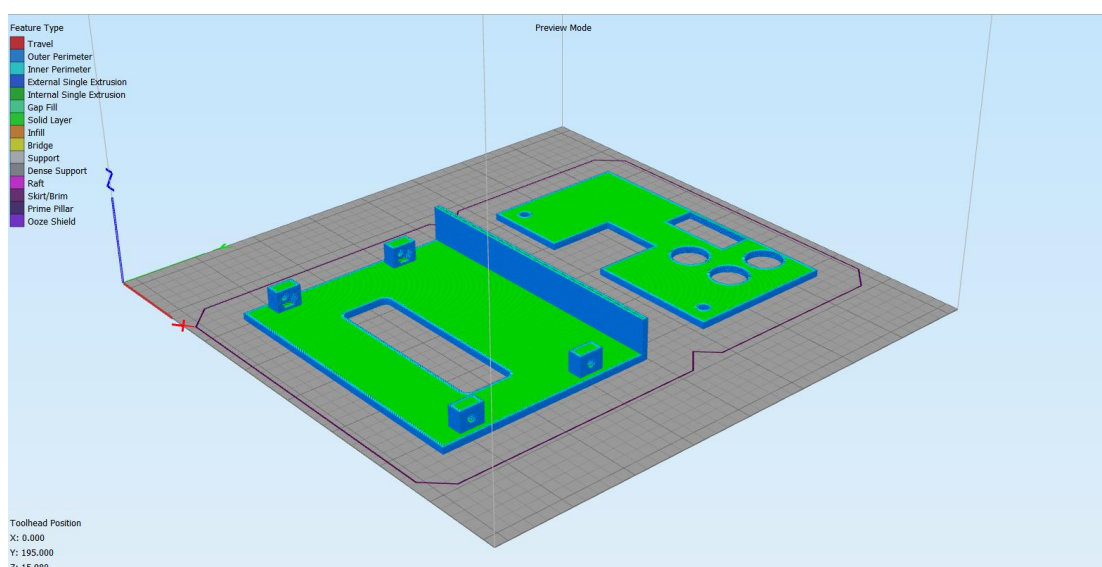
Εικόνα 66 – Εκτύπωση βάσης συσκευασίας συσκευής μέτρησης

Στη συνέχεια, έγινε η κατασκευή του πάνω και κάτω καπακιού της συσκευασίας, όπου χρησιμοποιήθηκαν ελάχιστα διαφορετικές ρυθμίσεις εκτύπωσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8 – Παράμετροι εκτύπωσης καπακιών

Καπάκια	
Πάχος στρώσης	0.26 mm
Ύψος στρώσης	0.20 mm
Άνω/Κάτω επιφάνειες	3/5
Αριθμός περιμετρικών τοιχωμάτων	5
Ποσοστό πλήρωσης	30%
Ταχύτητα Εκτύπωσης	55 mm/s

Κατά τη διαδικασία του τεμαχισμού (Εικόνα 68), οι επιφάνειες τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να μη χρειαστεί υποστηρικτικό υλικό, αλλά και να κατασκευαστεί η πιο λεία δυνατή επιφάνεια.



Εικόνα 68 – Διαδικασία τεμαχισμού καπακιών

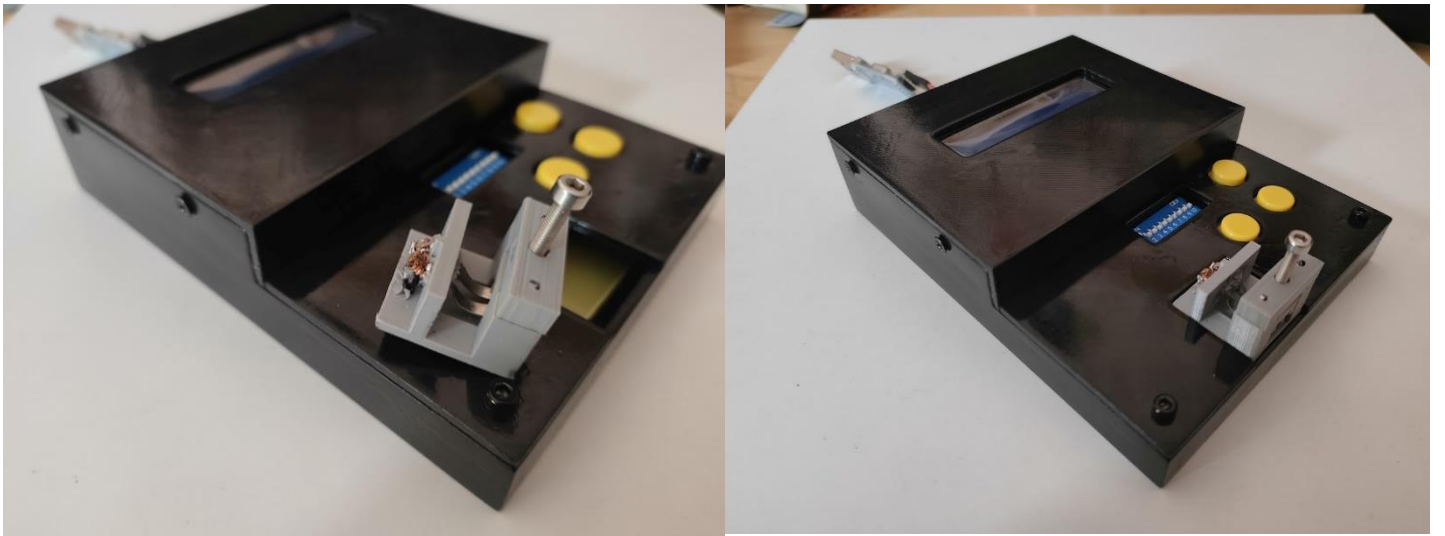


Παρακάτω, στην Εικόνα 69, φαίνονται συναρμολογημένα και τα τρία κομμάτια που απαρτίζουν τη συσκευασία της συσκευής μέτρησης. Σε αντίθεση με τη συσκευασία του πυκνωτή, κρίθηκε αναγκαίο να γίνει περαιτέρω επεξεργασία των κομματιών που κατασκευάστηκαν.

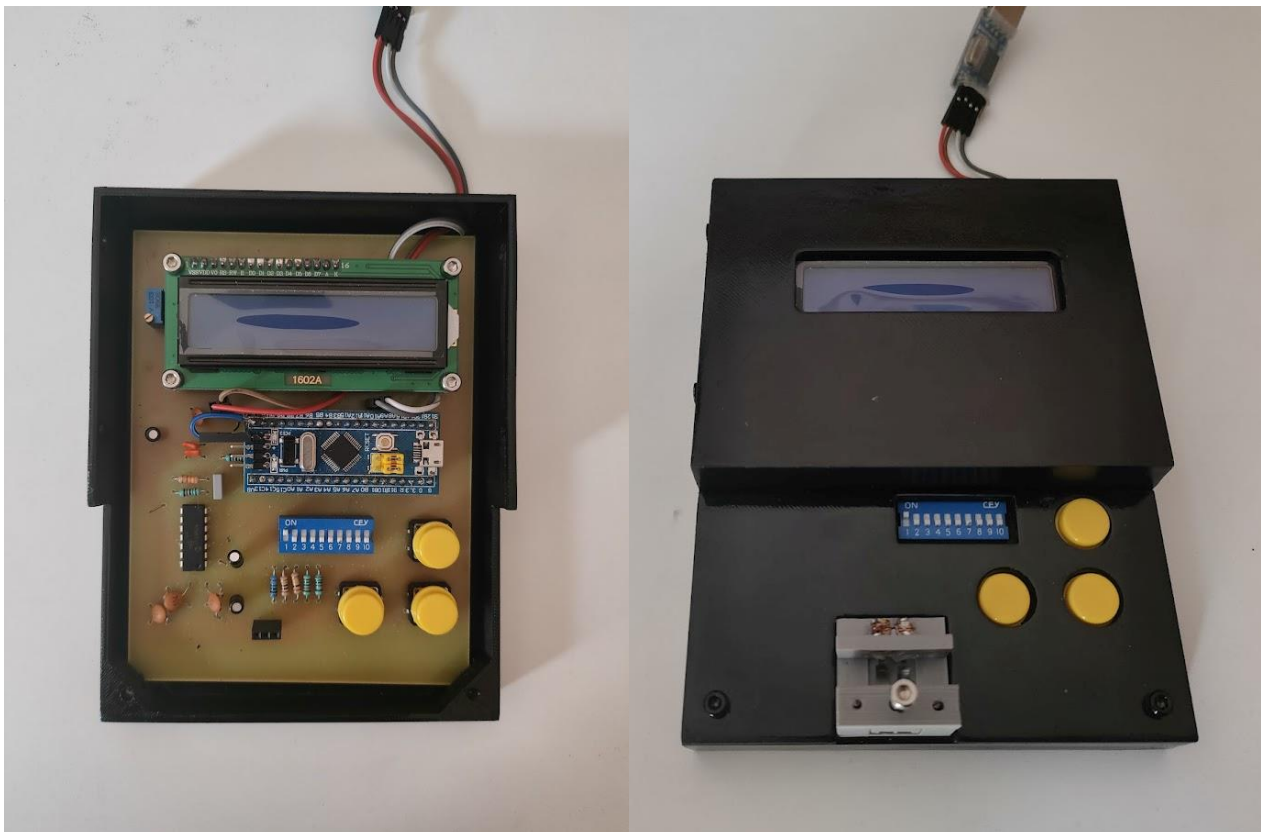


*Εικόνα 69 - Συναρμολόγηση συσκευασίας πριν τη τελική επεξεργασία*

Παρακάτω, παρουσιάζεται η συναρμολογημένη συσκευασία μετά το στάδιο της λείανσης και της βαφής. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 71 φαίνεται η συσκευασία της συσκευής μέτρησης μετά την τελική επεξεργασία, καθώς και ο τρόπος στερέωσης της πλακέτας στο εσωτερικό. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 70) φαίνονται και οι δύο συσκευασίες, καθώς και ο τρόπος στερέωσης της συσκευασίας του πυκνωτή.



Εικόνα 71 – Τελικές συσκευασίες πυκνωτή και συσκευής μέτρησης



Εικόνα 70 – Τελική συσκευασία συσκευής μέτρησης

## 6 Συμπεράσματα

### 6.1 Αποτελέσματα

Καθ' όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού και της κατασκευής των πρωτοτύπων των συσκευασιών διεξάχθηκαν διαδικασίες μέτρησης και αξιολόγησης, ειδικά για τη συσκευασία του πυκνωτή, καθώς έπρεπε να εξεταστεί η αγώγιμη επαφή των ηλεκτροδίων, ώστε η μέτρηση της χωρητικότητας να είναι έγκυρη.

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, υπήρχαν εκδόσεις, στις οποίες η συσκευασία δεν επέτρεπε την αγώγιμη επαφή και για αυτόν τον λόγο η σχεδίαση της συσκευασίας του πυκνωτή εξελίχθηκε σε τρεις εκδόσεις.

Η πρώτη έκδοση χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για τη μέτρηση της χωρητικότητας του πυκνωτή, όπως επίσης και για τις ανάγκες των πειραμάτων Διπλωματικών Εργασιών συναδέλφων[30]. Τα πειράματα αυτής της Εργασίας αποτελέσαν τον λόγο, για τον οποίο προστέθηκε θήκη για τον χειρισμό του πυκνωτή.

Η δεύτερη έκδοση παρουσίασε προβλήματα κατά τη διαδικασία μέτρησης και αξιολόγησης, καθιστώντας την μη λειτουργική. Παρόλα αυτά, η σχεδίαση και οι μηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν στη δεύτερη έκδοση, αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για τη σχεδίαση της τρίτης και τελικής έκδοσης.

Η τρίτη έκδοση, η οποία συνδύαζε τα πλεονεκτήματα όλων των προηγούμενων, είχε άμεσα θετικά αποτελέσματα, καθώς ο μηχανισμός αλλαγής της θέσης των ελασμάτων εξασφάλιζε την αγώγιμη επαφή αλλά και τη στερέωση του πυκνωτή. Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 72) φαίνεται η συσκευασμένη συσκευή μέτρησης, κατά την επιτυχή μέτρηση της χωρητικότητας του πυκνωτή.



Εικόνα 72 – Επιτυχής μέτρηση χωρητικότητας

## 6.2 Μελλοντική Εργασία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι έτοιμη να μεταμορφώσει τον κόσμο, όπως τον ξέρουμε. Τα καταναλωτικά αγαθά θα εξατομικεύονται και θα παράγονται κατά παραγγελία, ενώ οι κατασκευαστές θα μπορούν να χρησιμοποιούν τρισδιάστατη εκτύπωση για να δημιουργήσουν ριζικά νέα σχέδια για καθημερινά αντικείμενα. Επίσης, η χρήση της FDM τεχνολογίας έχει γίνει πλέον προσβάσιμη από το ευρύ κοινό και δεν περιορίζεται σε στενούς κύκλους.

Αν και παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όπως το χαμηλό κόστος και η δημιουργία ταχέων πρωτοτύπων, όταν πρόκειται για χρήση σε περιβάλλοντα με δυσχαιρείς συνθήκες, εμφανίζονται κάποια μειονεκτήματα, όπως η θερμική αντοχή. Τα αποτελέσματα κατά την κατασκευή των συσκευασιών ήταν παραπάνω από ικανοποιητικά, όμως πάντα υπάρχει η ανάγκη για βελτίωση και εξέλιξη.

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ακόμα αρτιότερο αποτέλεσμα, αλλά και σε περίπτωση που χρειαστεί η παραγωγή παραπάνω διατάξεων, θα μπορούσαν να γίνουν οι παρακάτω αλλαγές και βελτιώσεις μελλοντικά:

- **Χρήση διαφορετικών τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης.**

Για τα μέρη της συσκευασίας, τα οποία είναι πολύ μικρά σε διαστάσεις, προτείνεται η χρήση τεχνολογίας SLA ή DLP, καθώς παρέχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια εκτύπωσης.

- **Χρήση τεχνολογιών τρισδιάστατης απεικόνισης (3D scanning)**

Για τη δημιουργία των σχεδίων ήταν απαραίτητο να γίνει διαστασιολόγηση και μετρήσεις κάθε στοιχείου. Η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να γίνει γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια, αν γινόταν χρήση τεχνολογίας απεικόνισης.

- **Χρήση άλλων υλικών εκτύπωσης**

Η κατασκευή όλων των αντικειμένων έγινε με χρήση θερμοπλαστικού PLA, καθώς πρόκειται για ένα υλικό φιλικό προς το περιβάλλον. Μελλοντικά, θα μπορούσε να γίνει με χρήση άλλων υλικών όπως ABS, PETg ή Nylon.

- **Δημιουργία καλουπιών**

Για τη μαζική παραγωγή των παραπάνω, δύναται να γίνει δημιουργία καλουπιών μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης.

## 7 Βιβλιογραφία

- [1] A. Georgas *et al.*, “ACE2-based capacitance sensor for rapid native SARS-CoV-2 detection in biological fluids and its correlation with real-time PCR,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 202, p. 114021, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.BIOS.2022.114021.
- [2] A. Georgas, K. Agiannis, V. Papakosta, S. Angelopoulos, A. Ferraro, and E. Hristoforou, “A Portable Screening Device for SARS-CoV-2 with Smartphone Readout,” *Engineering Proceedings 2022, Vol. 16, Page 7*, vol. 16, no. 1, p. 7, Feb. 2022, doi: 10.3390/IECB2022-12274.
- [3] V. G. Gokhare, D. N. Raut, and D. K. Shinde, “A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing”, [Online]. Available: [www.ijert.org](http://www.ijert.org)
- [4] Murray Leinster, *Things Pass By*. 1945.
- [5] R. F. Jones, *Tools of the Trade*. Thrilling Publishing, 1950.
- [6] “US4575330A - Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography - Google Patents.” <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>
- [7] M. Brooks, “The day the world became 3D,” *New Scientist*, vol. 232, no. 3096, pp. 40–41, Oct. 2016, doi: 10.1016/S0262-4079(16)31941-8.
- [8] “US5121329A - Apparatus and method for creating three-dimensional objects - Google Patents.” <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>
- [9] RepRap contributors, “RepRap Project,” *RepRap*, Sep. 2020. <https://reprap.org/mediawiki/index.php?title=RepRap&oldid=188189>.
- [10] “Fab@Home - Creative Machines Lab - Columbia University.” <https://www.creativemachineslab.com/fabhome.html>.
- [11] A. Su and S. J. Al’Aref, “History of 3D printing,” *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, pp. 1–10, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8.

- [12] "ISO - ISO/ASTM 52900:2015 - Additive manufacturing — General principles — Terminology." <https://www.iso.org/standard/69669.html>
- [13] F. M. Mwema and E. T. Akinlabi, "Basics of Fused Deposition Modelling (FDM)," *Fused Deposition Modeling*, p. 1, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-48259-6\_1.
- [14] D. Kazmer, *Applied Plastics Engineering Handbook*. Elsevier Inc., 2017. doi: 10.1016/b978-0-323-39040-8.00029-8.
- [15] "Fused deposition modeling (FDM) 3D printing of oral modified release dosage forms - UCL Discovery." <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10107632/>.
- [16] "SLA 3D printing materials compared | Hubs." <https://www.hubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/>
- [17] A. Davoudinejad, "Vat photopolymerization methods in additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, pp. 159–181, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-818411-0.00007-0.
- [18] "Introduction to binder jetting 3D printing | Hubs." <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>.
- [19] "Material Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
- [20] "STL File Format for 3D Printing - Explained in Simple Terms," *All3DP*, Nov. 2016, [Online]. Available: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- [21] "Professional 3D Printing Software | Simplify3D." <https://www.simplify3d.com>
- [22] P. Czyżewski, D. Marciniak, B. Nowinka, M. Borowiak, and M. Bieliński, "Influence of Extruder's Nozzle Diameter on the Improvement of Functional Properties of 3D-Printed PLA Products," *Polymers 2022, Vol. 14, Page 356*, vol. 14, no. 2, p. 356, Jan. 2022, doi: 10.3390/POLYM14020356.

- [23] Q. Cui and Y. Zhang, "Optimization of parameters for FDM process with functional input based on LS-SVR," *AIP Advances*, vol. 12, no. 2, p. 025108, Feb. 2022, doi: 10.1063/5.0079759.
- [24] Ł. Miazio, "Impact of Print Speed on Strength of Samples Printed in FDM Technology," *Agricultural Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 33–38, Jun. 2019, doi: 10.1515/AGRICENG-2019-0014.
- [25] A. Lancaster and M. Keswani, "Integrated circuit packaging review with an emphasis on 3D packaging," *Integration, the VLSI Journal*, vol. 60, pp. 204–212, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.VLSI.2017.09.008.
- [26] B. K. Tehrani, B. S. Cook, and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed 3D interconnects for millimeter-wave system-on-package solutions," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 2016-August, Aug. 2016, doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540084.
- [27] E. S. Park, J. Jeon, V. Subramanian, and T. J. K. Liu, "Inkjet-printed microshell encapsulation: A new zero-level packaging technology," *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp. 357–360, 2012, doi: 10.1109/MEMSYS.2012.6170208.
- [28] R. Bahr, A. Nauroze, W. Su, and M. M. Tentzeris, "Self-Actuating 3D Printed Packaging for Deployable Antennas," *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1425–1430, Aug. 2017, doi: 10.1109/ECTC.2017.186.
- [29] C. Bailey, S. Stoyanov, T. Tilford, and G. Tzourloukis, "3D-printing and electronic packaging," *2016 Pan Pacific Microelectronics Symposium, Pan Pacific 2016*, Mar. 2016, doi: 10.1109/PANPACIFIC.2016.7428385.
- [30] Παπούλιας Δ. Παναγιώτης, "Αισθητήρας ανίχνευσης της φορμαλδεΐδης," ΕΜΠ, Αθήνα, 2022.
- [31] "You Can Now See the First Ever 3D Printer - Invented by Chuck Hull - In the National Inventors Hall of Fame - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing /



- Additive Manufacturing.” <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>.
- [32] “A RepRap Family Tree: Tracking the Printers That Started it All | Make:” <https://makezine.com/2015/12/02/a-reprap-family-tree-tracking-the-printers-that-started-it-all/>.
- [33] “euroceram - Fused Deposition Modeling.” <https://euroceram.org/en/eu/fused-deposition-modeling>.
- [34] “SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers.” <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>.
- [35] “Impresión 3D en resina (SLA/DLP) por Bitfab.” <https://bitfab.io/es/impresion-3d-resina/>.
- [36] “The Complete Guide to Binder Jetting in 3D printing - 3Dnatives.” <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/>.
- [37] C. Groth, N. Kravitz, P. Jones, J. Graham, and W. Redmond, “Three-dimensional printing technology,” *J Clin Orthod*, vol. 48, pp. 475–485, May 2014.