



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ  
ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

Βαρβάτης Φίλιππος

Επιβλέπων: Δουμένης Γρηγόριος

ΔΕΠ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Ιωάννινα, Ιούλιος, 2025

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ  
ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Ιωάννινα, 07 Ιουλίου 2025

## ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Γρηγόριος Δουμένης,

2. Μέλος επιτροπής

Νικόλαος Γιαννακέας,

3. Μέλος επιτροπής

Φώτιος Βαρτζιώτης,

© Βαρβάτης, Φίλιππος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



### **Δήλωση μη λογοκλοπής**

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Βαρβάτης Φίλιππος,

Υπογραφή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Ιδιαίτερη μνεία οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Δουμένη, για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την πολύτιμη επιστημονική υποστήριξη που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση του έργου αυτού.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Ιωάννη Μασκλαβάνο για τη μεγάλη βοήθεια και την ουσιαστική καθοδήγηση που μου προσέφερε, συμβάλλοντας σημαντικά στη διαμόρφωση της τελικής μορφής της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη διαρκή υποστήριξη, την ενθάρρυνση και την κατανόησή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σε όλους όσους συνέβαλαν με τον τρόπο τους, εκφράζω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη διαδικασία ταχείας προτυποποίησης (rapid prototyping) μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing) για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός περιβλήματος ενσωματωμένου συστήματος. Το υπό ανάπτυξη σύστημα προορίζεται για περιβαλλοντική παρακολούθηση και περιλαμβάνει αισθητήρες, μονάδα επεξεργασίας και ενεργειακή υποστήριξη μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η έρευνα επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της μορφολογίας και της λειτουργικότητας του περιβλήματος, με χρήση παραμετρικής σχεδίασης CAD και τεχνολογίας FDM για εκτύπωση πρωτοτύπων.

Ακολουθείται μία επαναληπτική μεθοδολογία, όπου κάθε έκδοση σχεδίασης αξιολογείται, τροποποιείται και επανεκτυπώνεται, έως την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου εργονομίας, μηχανικής αντοχής και ευκολίας συναρμολόγησης. Εξετάζεται επίσης η επιλογή του κατάλληλου θερμοπλαστικού υλικού, με συγκριτική ανάλυση των PLA, ABS, ASA, PETG και Nylon, καταλήγοντας στη χρήση PETG για την τελική εκτύπωση.

Η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της ταχείας προτυποποίησης για τον σχεδιασμό λειτουργικών περιβλημάτων, ιδίως σε εφαρμογές όπου απαιτούνται διαδοχικές επαναλήψεις, προσαρμογή σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα και προετοιμασία για πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

**Λέξεις-κλειδιά::** Προτυποποίηση, FDM, Περίβλημα, Ενσωμάτωση, PETG

## **ABSTRACT**

This thesis explores the use of rapid prototyping through 3D printing for the design and development of a custom enclosure for an embedded environmental monitoring system. The system integrates sensors, processing units, and solar power support, requiring a compact, robust, and functional housing. The project focuses on iterative design using parametric CAD tools and FDM-based additive manufacturing to achieve a prototype that satisfies mechanical, ergonomic, and environmental constraints.

An iterative workflow is adopted, where each version of the enclosure is tested, refined, and reprinted, gradually improving fit, durability, and assembly accessibility. A comparative study of commonly used thermoplastics (PLA, ABS, ASA, PETG, and Nylon) is conducted to determine the most appropriate material for final production, leading to the selection of PETG for its balance of strength, flexibility, printability, and cost.

This work highlights the value of rapid prototyping in the development of functional housings for embedded systems, especially where physical iterations and adaptation to hardware layouts are essential prior to field deployment.

**Keywords:** Prototyping, Printing, Enclosure, Sensors, System

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....                                                        | ix  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....                                                            | x   |
| ABSTRACT .....                                                           | xi  |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....                                               | xii |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....                                                  | xiv |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....                                                            | xvi |
| 1 Ενσωματωμένα Συστήματα.....                                            | 1   |
| 1.1 Εισαγωγή στα Ενσωματωμένα Συστήματα .....                            | 1   |
| 1.2 Χαρακτηριστικά Ενσωματωμένων Συστημάτων.....                         | 2   |
| 1.3 Εφαρμογές των Ενσωματωμένων Συστημάτων.....                          | 4   |
| 1.4 Φυσικός Σχεδιασμός και "Συσκευασία" Ενσωματωμένων Συστημάτων .....   | 5   |
| 1.5 Τρισδιάστατες Εκτυπωμένες Συσκευασίες Ενσωματωμένων Συστημάτων ..... | 7   |
| 2 Τεχνολογίες 3D Εκτύπωσης .....                                         | 10  |
| 2.1 Εισαγωγή στην 3D Εκτύπωση .....                                      | 10  |
| 2.2 Εναπόθεση Τήγματος (Fused Deposition Modeling – FDM).....            | 11  |
| 2.3 Φωτοπολυμερισμός σε Λουτρό (SLA και DLP) .....                       | 14  |
| 2.4 Μεταλλικές και Άλλες 3D Εκτυπωτικές Τεχνολογίες .....                | 16  |
| 2.5 Επιπτώσεις για Γρήγορη, Ακριβή Προτυποποίηση .....                   | 18  |
| 3 Απαιτήσεις Σχεδιασμού Περιβλήματος.....                                | 19  |
| 3.1 Περιβαλλοντικές Απαιτήσεις .....                                     | 20  |
| 3.2 Εισροή νερού και Κατάταξη IP(Ingress Protection).....                | 21  |
| 3.3 Αντοχή σε κραδασμούς και δονήσεις .....                              | 22  |
| 3.4 Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες.....                                | 22  |
| 3.5 Αισθητήρας Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης (AMR).....                | 23  |
| 3.6 Ενεργειακή Αυτονομία και Τροφοδοσία .....                            | 24  |
| 4 Σχεδίαση περιβλήματος AMSA .....                                       | 26  |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.0.1 Δημοφιλή Παραμετρικά Λογισμικά 3D Σχεδίασης.....                                 | 26 |
| 4.0.2 Επιλογή Λογισμικού Σχεδίασης: Fusion 360 .....                                   | 28 |
| 4.1.1 Κατασκευή Περιβλήματος.....                                                      | 29 |
| 4.1.2 Έκδοση 1:Βασικό Κουτί με Εσωτερική Στερέωση .....                                | 30 |
| 4.1.3 Έκδοση 2: Προσθήκη Cutouts και νέα Μορφολογία Bosses,.....                       | 33 |
| 4.1.4 Έκδοση 3: Προσαρμογές νέων παραμέτρων και ενσωμάτωση επιπλέον<br>στοιχείων. .... | 39 |
| 4.1.5 Έκδοση 4: Βελτιστοποίηση μορφολογίας και λειτουργικότητας.....                   | 43 |
| 4.1.6 Έκδοση 5(Τελική: Υλοποίηση εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών.....                 | 50 |
| 5 Εκτύπωση Περιβλήματος και βελτιώσεις .....                                           | 54 |
| 5.0.1 Εργαλεία εκτύπωσης συσκευασίας.....                                              | 54 |
| 5.0.2 Λογισμικό Slicing: Bambu Studio.....                                             | 55 |
| 5.0.3 Υλικά Εκτύπωσης 3D: PLA, ABS (και ASA), PETG, Nylon.....                         | 56 |
| 5.1.1 Παράμετροι και Υλικά εκτύπωσης .....                                             | 58 |
| 5.1.2 Ρύθμιση εκτύπωσης και προεπισκόπηση τελικού προϊόντος .....                      | 60 |
| 5.2 Αποτελέσματα τελικής εκτύπωσης .....                                               | 62 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....                                                                      | 65 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Τεχνικά Φυλλάδια (Datasheets) Χρησιμοποιηθέντων Εξαρτημάτων .....           | 66 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....                                                                      | 67 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1.1 - - Cirrus Logic MCU on PCB Πηγή: [18].....                                                             | 1  |
| Εικόνα 1.2.α - Distinction between PC-like and embedded system designs Πηγή: [1]<br>(Πίνακας 1.2 – Σελίδα 18)..... | 2  |
| Εικόνα 1.2.β - Positioning of the topics of this book Πηγή: [1] (Σχήμα 1.7 , Σελίδα 20).....                       | 3  |
| Εικόνα 1.3 - Example structure of a cyber-physical system Πηγή:[2](Σχήμα 1.1, Σελίδα 6)....                        | 4  |
| Εικόνα 1.4 – Εμπορική συσκευασία ενσωματωμένου συστήματος Nvidia Jetson Πηγή:<br>[19].....                         | 6  |
| Εικόνα 1.5.α – Τρισδιάστατα εκτυπωμένη συσκευασία ενσωματωμένου συστήματος<br>Πηγή: [20].....                      | 8  |
| Εικόνα 1.5.β – Διαφορές Τρισδιάστατης εκτύπωσης με Injection Molding.....                                          | 9  |
| Εικόνα 2.1 – Overall workflow of the additive manufacturing process Πηγή: [5] (Σχήμα 2<br>, Σελίδα 4).....         | 10 |
| Εικόνα 2.2.α – FDM 3D printer – overview Πηγή: [21].....                                                           | 11 |
| Εικόνα 2.2.β – Yellow FDM printing Πηγή: [22].....                                                                 | 13 |
| Εικόνα 2.3 – FDM 3D printer – overview Τροποποιήθηκε από: [23](Εικόνα 8, Σελίδα 11) .                              | 14 |
| Εικόνα 2.4 - Parameters affecting laser and DLP-SLA print process. Πηγή: [23].....                                 | 16 |
| Εικόνα 3 –ESP 32 Dev Board 3D Render .....                                                                         | 19 |
| Εικόνα 3.2 – Κλίμακα IP για στερεά και υγρά.Δεδομένα πάρθηκαν από Πηγή: [24] .                                     | 21 |
| Εικόνα 3.5 – Αναπαράσταση αισθητήρα τύπου AMR μοντέλο GY-511 LSM303DLHC .....                                      | 23 |
| Εικόνα 3.6 – Τυπικό διάγραμμα ηλιακής φόρτισης με TP4056 και ESP32.....                                            | 24 |
| Εικόνα 4.0.2 – Παράδειγμα περιβάλλοντος σχεδίασης σε Autodesk Fusion360.....                                       | 28 |
| Εικόνα 4.1.2.α – Αρχική σχεδίαση γενικής δομής κουτιού.....                                                        | 30 |
| Εικόνα 4.1.2.β – Προσθήκη bosses στήριξης σε αρχικό σχέδιο .....                                                   | 31 |
| Εικόνα 4.1.2.γ – Αρχικό σχέδιο καπακιού .....                                                                      | 32 |
| Εικόνα 4.1.3.α – Αναδιαμόρφωση bosses στήριξης.....                                                                | 33 |
| Εικόνα 4.1.3.β – Νέα μορφολογία με βελτιωμένο περίβλημα .....                                                      | 34 |
| Εικόνα 4.1.3.γ– Αναδιαμόρφωση καπακιού.....                                                                        | 34 |
| Εικόνα 4.1.3.δ – Υλοποίηση cutout αισθητήρα υγρασίας.....                                                          | 35 |
| Εικόνα 4.1.3.ε– Υλοποίησή διόδου καλωδίων .....                                                                    | 36 |
| Εικόνα 4.1.3.στ – Υλοποίηση μαγνητικών εγκοπών .....                                                               | 36 |
| Εικόνα 4.1.3.ζ – Υλοποίηση φλάντζας.....                                                                           | 37 |
| Εικόνα 4.1.4.α – Υλοποίηση cutout AMR κάτω μέρος.....                                                              | 39 |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 4.1.4.β – Υλοποίηση cutout AMR πάνω μέρος, για διέλευση καλωδίων αισθητήρα ..                                                                  | 40 |
| Εικόνα 4.1.4.γ – Κύριο μέρος συσκευασίας με την βάση μπαταρίας τοποθετημένη .....                                                                     | 40 |
| Εικόνα 4.1.4.δ – Αναδιαμόρφωση καπακιού για στέγαση φωτοβολταϊκών .....                                                                               | 41 |
| Εικόνα 4.1.5.α – Διατομή συσκευασίας που δείχνει την αναδιαμόρφωση του cutout του AMR με κλίση 5 μοιρών .....                                         | 43 |
| Εικόνα 4.1.5.β – Επανατοποθέτηση προεξοχής αισθητήρα υγρασίας .....                                                                                   | 44 |
| Εικόνα 4.1.5.γ – Αναδιαμόρφωση μορφοποίησης καπακιού και πρόσθεση εσοχών για καλώδια φωτοβολταϊκών .....                                              | 45 |
| Εικόνα 4.1.5.δ – Όψη από πάνω στην οποία φαίνεται η νέα μορφολογία για την στήριξη μέσω μαγνητών .....                                                | 46 |
| Εικόνα 4.1.5.ε– Υλοποίηση τεσσάρων bosses για την στήριξη των αισθητήρων ICM-20948 .....                                                              | 47 |
| Εικόνα 4.1.5.στ – Υλοποίηση ανυψωμένης πλατφόρμας για την στήριξη του LSM303DLHC .....                                                                | 48 |
| Εικόνα 4.1.6.α – Καπάκι εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών .....                                                                                        | 50 |
| Εικόνα 4.1.6.β – Κύριο σώμα εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών .....                                                                                    | 51 |
| Εικόνα 5.0.1 – Εκτυπωτής Bambu Labs X1C με AMS Τροποποιήθηκε από [25] .....                                                                           | 54 |
| Εικόνα 5.0.2 – Περιβάλλον εργασίας Bambu Studio .....                                                                                                 | 55 |
| Εικόνα 5.1.2.α – Προεπισκόπηση μοντέλου πριν την τύπωση με ενσωματωμένα supports....                                                                  | 60 |
| Εικόνα 5.2.α – Τελική εκτυπωμένη συσκευασία με λογότυπο AMSA στο πλάι, μη συναρμολογημένη εκτός βύσματος mini jack για κεραία. ....                   | 62 |
| Εικόνα 5.2.β –Συσκευασία AMSA συναρμολογημένη εκτός βύσματος mini jack. ....                                                                          | 63 |
| Εικόνα 5.2.γ –Συσκευασία AMSA συναρμολογημένη πλήρως πάνω σε μεταλλική επιφάνεια. ....                                                                | 63 |
| Εικόνα 5.2.δ –Δύο συσκευασίες AMSA συναρμολογημένες πλήρως .και μία εξωτερική συσκευασία φωτοβολταϊκών που ρυθμίζονται προς τον μαγνητικό βορρά. .... | 64 |



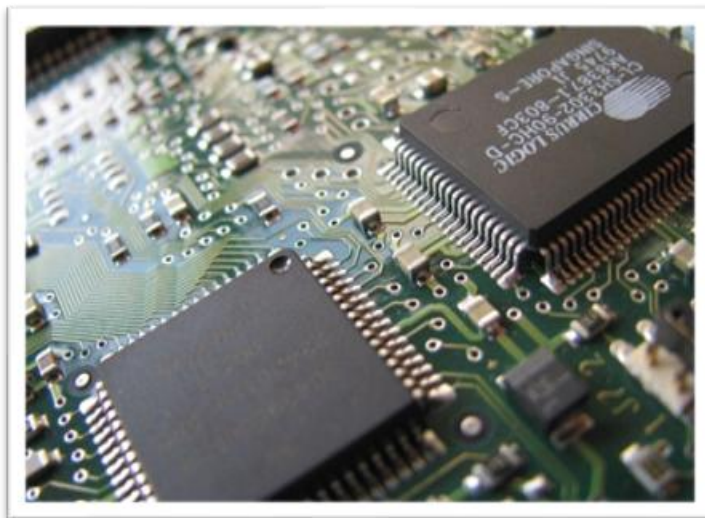
## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση ενός ενσωματωμένου συστήματος με έμφαση στην ενεργειακή αυτονομία και την αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στόχος της εργασίας είναι η σχεδίαση ενός λειτουργικού πρωτοτύπου που συνδυάζει την αποδοτική χρήση υλικών, την ακρίβεια κατασκευής και την ενεργειακή αυτονομία μέσω ηλιακής φόρτισης. Μέσα από πειραματική διαδικασία και ανάλυση, εξετάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση και τη λειτουργικότητα του συστήματος, με σκοπό την εφαρμογή του σε πραγματικές συνθήκες, όπως δυσπρόσιτες ή απομακρυσμένες περιοχές.

# 1 Ενσωματωμένα Συστήματα

## 1.1 Εισαγωγή στα Ενσωματωμένα Συστήματα

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι εξειδικευμένα συστήματα υπολογιστών ενσωματωμένα σε μια μεγαλύτερη συσκευή και σχεδιασμένα να εκτελούν εξειδικευμένες λειτουργίες ή εργασίες [1]. Σε αντίθεση με τους υπολογιστές γενικής χρήσης, ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι προσαρμοσμένο για συγκεκριμένες λειτουργίες εντός ενός περιβάλλοντος



*Εικόνα 1.1 - - Cirus Logic MCU on PCB  
Πηγή: [18]*

κεντρικού υπολογιστή. Συνήθως αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή ή μικροελεγκτή, μνήμη, διεπαφές εισόδου/εξόδου (αισθητήρες και διακόπτες) και προσαρμοσμένο υλικό και λογισμικό που είναι στενά συνδεδεμένα. Ο όρος «ενσωματωμένο» αντικατοπτρίζει ότι τέτοια συστήματα αποτελούν μέρος ενός μεγαλύτερου συνόλου, όπως ένα αυτοκίνητο, μια οικιακή συσκευή ή μια ιατρική συσκευή, αντί για αυτόνομους υπολογιστές [1][2]. Τα σύγχρονα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να κυμαίνονται από απλούς ελεγκτές με ελάχιστο υλικολογισμικό έως πολύπλοκα, δικτυωμένα συστήματα πραγματικού χρόνου. Συχνά είναι σε πραγματικό χρόνο και ταυτόχρονα, που σημαίνει ότι πρέπει να ανταποκρίνονται σε συμβάντα ή ερεθίσματα εντός αυστηρών χρονικών περιορισμών. Στην πράξη, τα ενσωματωμένα συστήματα είναι διαδεδομένα: ελέγχουν τα πάντα, από οικιακές συσκευές και smartphones έως βιομηχανικά μηχανήματα, ιατρικό εξοπλισμό και αεροδιαστημικά συστήματα [2][1]. Αυτή η μεγάλη ποικιλία εφαρμογών υπογραμμίζει τη σημασία τους στη σημερινή τεχνολογία: οι ενσωματωμένοι ελεγκτές επιτρέπουν «έξυπνη» λειτουργικότητα σε πολλές συσκευές, συχνά εργαζόμενοι συνεχώς και αξιόπιστα στο φυσικό τους περιβάλλον λειτουργίας [2][1].

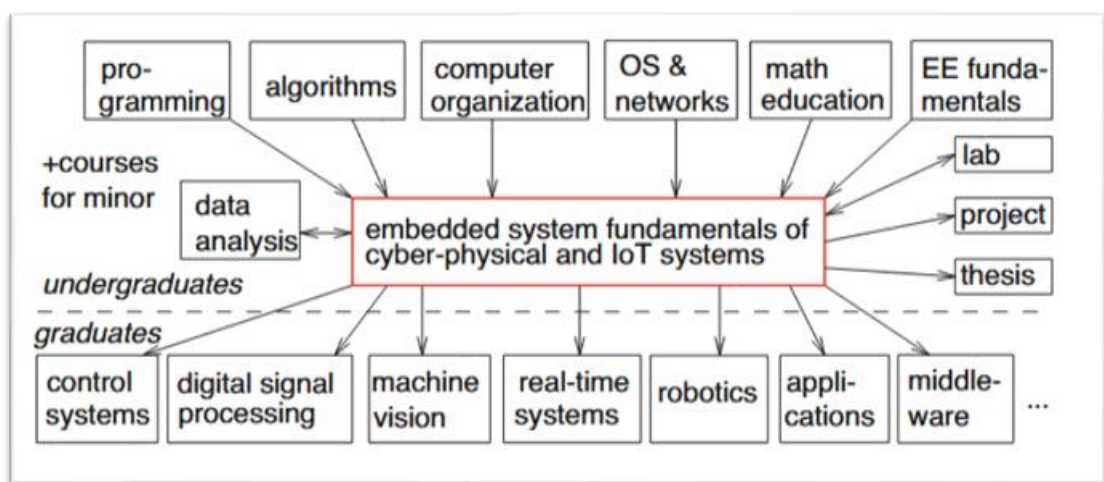
## 1.2 Χαρακτηριστικά Ενσωματωμένων Συστημάτων

Τα ενσωματωμένα συστήματα μοιράζονται πολλά βασικά χαρακτηριστικά που τα διακρίνουν από τους υπολογιστές γενικής χρήσης. Πρώτον, έχουν ειδική λειτουργικότητα: κάθε σύστημα είναι κατασκευασμένο για να εκτελεί μια συγκεκριμένη εργασία ή ένα σύνολο σχετικών εργασιών. Το υλικό και το λογισμικό του συστήματος είναι προσχεδιασμένα για να υποστηρίξουν αυτόν τον σκοπό [1]. Για παράδειγμα, ένας μικροελεγκτής σε έναν θερμοστάτη είναι αφιερωμένος σε αλγόριθμους ελέγχου θερμοκρασίας, όχι σε αυθαίρετους υπολογισμούς. Δεύτερον, τα ενσωματωμένα συστήματα συνήθως έχουν περιορισμούς πόρων [1]. Συχνά λειτουργούν με αυστηρά όρια στην ισχύ επεξεργασίας, τη μνήμη και την ενέργεια (ειδικά σε συσκευές που τροφοδοτούνται με μπαταρία ή φορητές συσκευές). Ως αποτέλεσμα, το σύστημα πρέπει να χρησιμοποιεί τους υπολογιστικούς του πόρους πολύ αποτελεσματικά [1]. Τρίτον, πολλές ενσωματωμένες εφαρμογές επιβάλλουν απαιτήσεις πραγματικού χρόνου [1]. Επειδή αλληλεπιδρούν με τον φυσικό κόσμο, τα ενσωματωμένα συστήματα συχνά πρέπει να ολοκληρώνουν εργασίες εντός αυστηρών προθεσμιών (π.χ. μετρήσεις αισθητήρων και εξόδους ενεργοποιητή εντός χιλιοστών του δευτερολέπτου). Η παράλειψη μιας προθεσμίας (για παράδειγμα σε συστήματα πέδησης ή ιατρικές οθόνες) μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη ή κίνδυνο του συστήματος, επομένως η προβλεψιμότητα σε πραγματικό χρόνο είναι ένας κοινός στόχος σχεδιασμού[1].

|                              | Embedded                                               | PC-/server-like                               |
|------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Architectures                | Frequently heterogeneous<br>very compact               | Mostly homogeneous<br>not compact (x86, etc.) |
| x86 compatibility            | Less relevant                                          | Very relevant                                 |
| Architecture fixed?          | Rarely                                                 | Yes                                           |
| Models of computation (MoCs) | C+multiple models (data flow,<br>discrete events, ...) | Mostly von Neumann (C,<br>C++, Java)          |
| Optimization objectives      | Multiple (energy, size, ...)                           | Average performance<br>dominates              |
| Safety-critical?             | Possibly                                               | Usually not                                   |
| Real-time relevant           | Frequently                                             | Hardly                                        |
| Apps. known at design time   | Yes, for real-time systems                             | Only some (e.g., WORD)                        |

*Εικόνα 1.2.α - Distinction between PC-like and embedded system designs Πηγή: [1] (Πίνακας 1.2 – Σελίδα 18)*

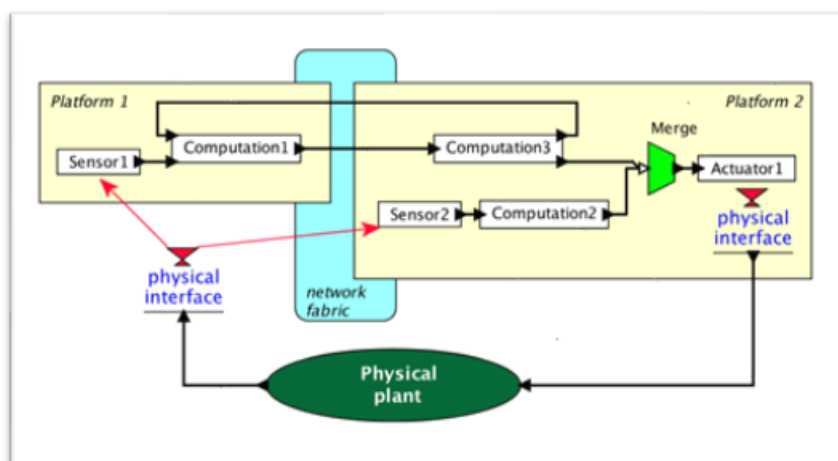
Επιπλέον, τα ενσωματωμένα συστήματα συχνά περιλαμβάνουν ενσωματωμένο σχεδιασμό υλικού-λογισμικού. Συνδυάζουν επεξεργαστές (CPU, μικροελεγκτές ή DSP) με προσαρμοσμένα κυκλώματα και υλικό σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Μπορούν να λειτουργούν σε εξειδικευμένο υλικολογισμικό ή λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου αντί για λειτουργικά συστήματα επιτραπέζιων υπολογιστών, και το λογισμικό είναι γενικά στενά συνδεδεμένο με το υλικό. Λόγω αυτής της ενσωμάτωσης, η αξιοπιστία και η ανθεκτικότητα αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους, καθώς πολλά ενσωματωμένα συστήματα είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχία λειτουργιών ή αποστολών και απαιτούν υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας, διαθεσιμότητας και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ασφάλειας [1]. Για παράδειγμα, τα κρίσιμα για την ασφάλεια ενσωματωμένα συστήματα (όπως στον έλεγχο της αεροπορίας ή της αυτοκινητοβιομηχανίας) πρέπει να εγγυώνται τη σωστή λειτουργία και συχνά περιλαμβάνουν διασφαλίσεις έναντι σφαλμάτων υλικού ή παραβιάσεων ασφαλείας. Άλλα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν το μικρό φυσικό μέγεθος, το χαμηλό κόστος και την ενεργειακή απόδοση, καθώς οι ενσωματωμένες συσκευές πρέπει συχνά να ταιριάζουν σε συμπαγή προϊόντα και να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Καθώς τα ενσωματωμένα συστήματα γίνονται πιο περίπλοκα και συνδεδεμένα (π.χ. σε δικτυωμένες ή κατακεντρωμένες διαμορφώσεις), ιδιότητες όπως η ανοχή σφαλμάτων και η ασφάλεια αποκτούν μεγαλύτερη σημασία [1]. Συνοψίζοντας, τα ενσωματωμένα συστήματα είναι εξειδικευμένες, αποτελεσματικές, συχνά πλατφόρμες πραγματικού χρόνου που δίνουν προτεραιότητα στην αξιόπιστη απόδοση σε ένα περιορισμένο πλαίσιο [1].



Εικόνα 1.2.β - Positioning of the topics of this book  
Πηγή: [1] (Σχήμα 1.7, Σελίδα 20)

### 1.3 Εφαρμογές των Ενσωματωμένων Συστημάτων

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι πανταχού παρόντα σε όλους σχεδόν τους τομείς της τεχνολογίας. Τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης παρέχουν πολλά γνωστά παραδείγματα: τα smartphone, οι έξυπνες τηλεοράσεις, οι κονσόλες παιχνιδιών, οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και οι οικιακές



Εικόνα 1.3 - Example structure of a cyber-physical system  
Πηγή:[2](Σχήμα 1.1, Σελίδα 6)

συσκευές (π.χ. φούρνοι μικροκυμάτων, πλυντήρια ρούχων) βασίζονται όλα σε ενσωματωμένους ελεγκτές για την εκτέλεση συγκεκριμένων λειτουργιών. Για παράδειγμα, ένας έξυπνος θερμοστάτης χρησιμοποιεί ενσωματωμένο λογισμικό για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας, ενώ το ενσωματωμένο υλικολογισμικό μιας ψηφιακής κάμερας επεξεργάζεται εικόνες. Η αυτοκινητοβιομηχανία και οι μεταφορές είναι ένας άλλος σημαντικός τομέας: τα σύγχρονα οχήματα περιέχουν δεκάδες ή και εκατοντάδες ενσωματωμένα συστήματα που ελέγχουν τη διαχείριση του κινητήρα, το φρενάρισμα (ABS), την ανάπτυξη αερόσακων, την ψυχαγωγία και τις λειτουργίες υποβοήθησης οδηγού. Στην αεροδιαστημική και την άμυνα, οι υπολογιστές ελέγχου πτήσης, οι δορυφόροι, οι πύραυλοι και τα ναυτικά συστήματα ενσωματώνουν κρίσιμη υπολογιστική ικανότητα για τον χειρισμό λειτουργιών πλοήγησης, επικοινωνίας και ασφάλειας [2], [1]. Τα ενσωματωμένα συστήματα παίζουν επίσης βασικούς ρόλους σε βιομηχανικά και κατασκευαστικά περιβάλλοντα, όπου οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC), οι ρομποτικοί ελεγκτές και οι μονάδες ελέγχου διεργασιών διαχειρίζονται γραμμές συναρμολόγησης, αυτοματοποίηση διεργασιών και βαριά μηχανήματα. Στην ιατρική τεχνολογία, συσκευές όπως βηματοδότες, αντλίες έγχυσης, σαρωτές απεικόνισης και φορητές οθόνες υγείας ενσωματώνουν εξελιγμένη υπολογιστική ικανότητα για να διασφαλίζουν ακριβή και αξιόπιστη λειτουργία. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αντιπροσωπεύει μια άλλη ταχέως αναπτυσσόμενη κατηγορία εφαρμογών: αποτελείται από αμέτρητες ενσωματωμένες συσκευές (αισθητήρες, ενεργοποιητές, έξυπνες συσκευές) που συνδέονται μέσω δικτύων για την παροχή έξυπνων, κατανεμημένων υπηρεσιών σε σπίτια,

πόλεις, υγειονομική περίθαλψη και άλλα. Ουσιαστικά, όπου απαιτείται εξειδικευμένη υπολογιστική λειτουργικότητα — είτε στις τηλεπικοινωνίες, την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, τα έξυπνα κτίρια, τις καταναλωτικές συσκευές, τα στρατιωτικά συστήματα ή αλλού — τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν την τεχνολογία που επιτρέπει την ανάπτυξη [2], [1]

#### **1.4 Φυσικός Σχεδιασμός και "Συσκευασία" Ενσωματωμένων Συστημάτων**

Επειδή τα ενσωματωμένα συστήματα ενσωματώνονται σε απτά προϊόντα, ο φυσικός σχεδιασμός και η συσκευασία τους είναι κρίσιμες. Η «συσκευασία» ενός ενσωματωμένου συστήματος αναφέρεται συνήθως στο περίβλημα ή το πλαίσιο του και στη μηχανική ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών του εξαρτημάτων. Η σωστή συσκευασία πρέπει να αντιμετωπίζει πολλαπλά μηχανικά ζητήματα. Πρώτον, παρέχει προστασία από περιβαλλοντικούς κινδύνους: το περίβλημα προστατεύει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα από σκόνη, υγρασία, ρύπους και μηχανικούς κραδασμούς ή δονήσεις [3], [4]. Για παράδειγμα, ένας ενσωματωμένος αισθητήρας εξωτερικού χώρου μπορεί να απαιτεί αδιάβροχο περίβλημα, ενώ ένας ελεγκτής αυτοκινήτου πρέπει να αντέχει στη θερμότητα του κινητήρα και στους κραδασμούς του δρόμου. Δεύτερον, η συσκευασία είναι αναπόσπαστο κομμάτι της θερμικής διαχείρισης [4], [3]. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα παράγουν θερμότητα κατά τη λειτουργία και, χωρίς επαρκή απαγωγή, μπορούν να υπερθερμανθούν και να παρουσιάσουν βλάβη. Τα περιβλήματα συχνά περιλαμβάνουν ψύκτρες, εξαερισμό ή αγωγίμες διαδρομές για τη μεταφορά θερμότητας μακριά από ευαίσθητα μέρη [4], [3]. Τρίτον, το περίβλημα παρέχει ηλεκτρομαγνητική θωράκιση [4], [3]. Περικλείοντας την πλακέτα σε αγωγίμα ή γειωμένα υλικά, το σύστημα μπορεί να προστατευτεί από εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) και επίσης να αποτρέψει τα δικά του σήματα από το να παρεμβαίνουν σε κοντινά ηλεκτρονικά. Τέταρτον, η συσκευασία προσφέρει μηχανική στήριξη και δομική ακεραιότητα [4], [3], συγκρατώντας με ασφάλεια την πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) και τα εξαρτήματα και διασφαλίζοντας ότι οι σύνδεσμοι και οι διεπαφές είναι σωστά τοποθετημένοι. Το περίβλημα μπορεί επίσης να καλύπτει ζητήματα ασφάλειας, απομονώνοντας εξαρτήματα υψηλής τάσης ή αποτρέποντας την επαφή του χρήστη με κινούμενα μέρη.

Συνεπώς, ο σχεδιασμός του φυσικού περιβλήματος επηρεάζει την αξιοπιστία και τη λειτουργικότητα του συστήματος. Η επιλογή υλικού και η γεωμετρία επηρεάζουν το



βάρος, την ανθεκτικότητα και την κατασκευασιμότητα. Ο σχεδιασμός του περιβλήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη και εργονομικούς και αισθητικούς παράγοντες, ειδικά για τα καταναλωτικά προϊόντα. Για παράδειγμα, τα κουμπιά, οι οθόνες και οι σύνδεσμοι πρέπει να είναι προσβάσιμα και ο συντελεστής μορφής της συσκευής μπορεί να επηρεάσει τη ροή θερμότητας ή την ευκολία συναρμολόγησης. Όλες αυτές οι απαιτήσεις συσκευασίας έχουν κωδικοποιηθεί στην πρακτική της μηχανικής: όπως σημειώνουν οι Bevan και Romenesko, η ηλεκτρονική συσκευασία «παρέχει διασύνδεση ισχύος και σήματος, μια διαδρομή για τη διάχυση της θερμότητας, μηχανική υποστήριξη και ένα προστατευμένο περιβάλλον» που αποτρέπει τη μόλυνση, τις μηχανικές βλάβες και τις ηλεκτρομαγνητικές εκκενώσεις [4]. Αυτές οι λειτουργίες είναι απαραίτητες για να διασφαλιστεί ότι το ενσωματωμένο σύστημα λειτουργεί σωστά κατά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του.



[This Photo](#) by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA](#)

*Εικόνα 1.4 – Εμπορική συσκευασία ενσωματωμένου συστήματος Nvidia Jetson  
Πηγή: [19]*

## 1.5 Πρωτοτυποποίηση πριν την εμφάνιση της 3D Εκτύπωσης

Πριν η προσθετική κατασκευή γίνει ευρέως διαθέσιμη, τα λειτουργικά πλαστικά πρωτότυπα κατασκευάζονταν κυρίως μέσω έγχυσης σε καλούπι (injection molding). Η μέθοδος αυτή απαιτούσε εξειδικευμένα καλούπια, τα οποία αποτελούσαν το μεγαλύτερο κόστος και επέκτειναν σημαντικά τον χρόνο υλοποίησης. Η κατασκευή καλουπιού για ακόμη και απλά περιβλήματα μπορούσε να κοστίσει 3.000–10.000 € και να χρειαστεί 3–10 εβδομάδες για ολοκλήρωση, ενώ οποιαδήποτε αλλαγή σχεδίασης συνήθως απαιτούσε νέο καλούπι [28][30]. Ως αποτέλεσμα, οι πολλαπλές επαναλήψεις σχεδίασης ήταν χρονοβόρες και ιδιαίτερα δαπανηρές, αποτρέποντας τη γρήγορη βελτίωση [29], [31].

Αντίθετα, η 3D εκτύπωση καταργεί την ανάγκη για καλούπια, παράγει απευθείας από το CAD μοντέλο, και επιτρέπει νέες επαναλήψεις μέσα σε ώρες ή ημέρες με ελάχιστο κόστος ανά κομμάτι [28], [32].

### Σύγκριση Κόστους και Χρόνου (Πέντε Επαναλήψεις Περιβλήματος)

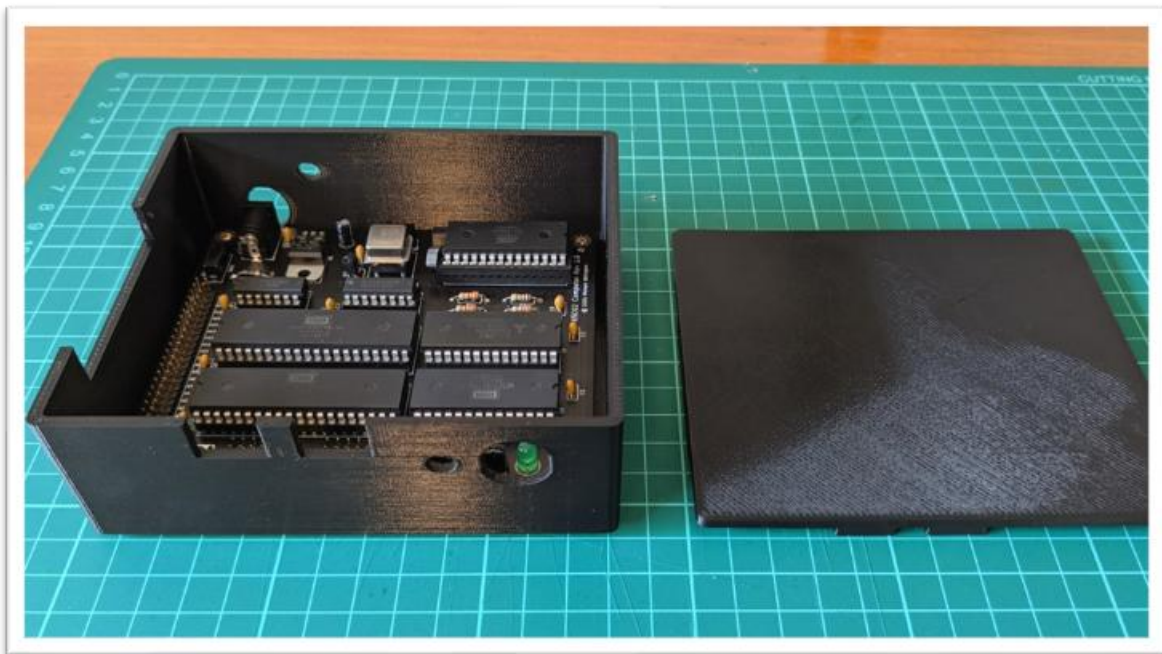
| Μέθοδος           | Κόστος καλουπιού ανά επανάληψη | Χρόνος έως τα πρώτα κομμάτια | Σύνολο για 5 επαναλήψεις          |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Έγχυση σε καλούπι | 3.000–10.000 €                 | 3–10 εβδομάδες               | 15.000–50.000 €, 15–50+ εβδομάδες |
| 3D Εκτύπωση       | 0€                             | 0,5–3 ημέρες                 | 0 € σε καλούπια, 3–15 ημέρες      |

Η αντίθεση αυτή εξηγεί γιατί η 3D εκτύπωση έχει εξελιχθεί σε πρότυπο μέθοδο για την ταχεία πρωτοτυποποίηση περιβλημάτων ενσωματωμένων συστημάτων: καταργεί τα εμπόδια των καλουπιών και επιτρέπει οικονομική, επαναληπτική σχεδίαση.



## 1.6 Τρισδιάστατες Εκτυπωμένες Συσκευασίες Ενσωματωμένων Συστημάτων

Η έλευση της τρισδιάστατης εκτύπωσης (προσθετική κατασκευή) έχει εισαγάγει νέες δυνατότητες για τον σχεδιασμό περιβλημάτων ενσωματωμένων συστημάτων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων και την προσαρμογή περιβλημάτων που ταιριάζουν με ακρίβεια σε μια συγκεκριμένη διάταξη κυκλώματος και διάταξη εξαρτημάτων. Οι σχεδιαστές μπορούν να επαναλάβουν τα σχήματα των περιβλημάτων και τα εσωτερικά χαρακτηριστικά (π.χ. προεξοχές στήριξης, κανάλια καλωδίων) γρήγορα χωρίς αλλαγές εργαλείων. Αυτή η ευελιξία είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για έργα χαμηλού όγκου ή ερευνητικά έργα όπου απαιτείται προσαρμοσμένη μηχανική ενσωμάτωση. Επιπλέον, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα περιβλήματα μπορούν να ενσωματώσουν σύνθετες γεωμετρίες - όπως περίπλοκα κανάλια ροής αέρα για ψύξη ή ενσωματωμένα σημεία στήριξης - που θα ήταν δύσκολο ή δαπανηρό να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους.



Εικόνα 1.6.α – Τρισδιάστατα εκτυπωμένη συσκευασία ενσωματωμένου συστήματος  
Πηγή: [20]

Οι σχεδιαστές πρέπει να λάβουν προσεκτικά υπόψη τις ιδιότητες των υλικών και τους περιορισμούς κατασκευής. Τα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης (πλαστικά, ρητίνες, σύνθετα υλικά) μπορεί να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά αντοχής, θερμικής αγωγιμότητας και ευφλεκτότητας από τα πλαστικά ή τα μέταλλα που έχουν χυτευτεί με έγχυση (injection molding). Η δομική και θωράκιση των τρισδιάστατα εκτυπωμένων εξαρτημάτων εξαρτάται από το πάχος του τοιχώματος, την πλήρωση και την επίστρωση, τα οποία πρέπει να βελτιστοποιηθούν για την προστασία και την ψύξη των ηλεκτρονικών. Εν ολίγοις, ενώ τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα περιβλήματα μπορούν να επιταχύνουν σημαντικά την ανάπτυξη και να επιτρέψουν την προσαρμογή των παραγόντων μορφής, πρέπει να πληρούν όλες τις τυπικές απαιτήσεις συσκευασίας (προστασία του περιβάλλοντος, θερμική διαχείριση, έλεγχος ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών κ.λπ.) όπως ακριβώς κάθε περίβλημα ενσωματωμένου συστήματος [4], [3]. Σχεδιάζοντας προσεκτικά αυτές τις πτυχές, οι μηχανικοί μπορούν να αξιοποιήσουν την προσθετική κατασκευή για να δημιουργήσουν ισχυρά περιβλήματα που ανταποκρίνονται στις εξειδικευμένες ανάγκες των σύγχρονων ενσωματωμένων συσκευών.

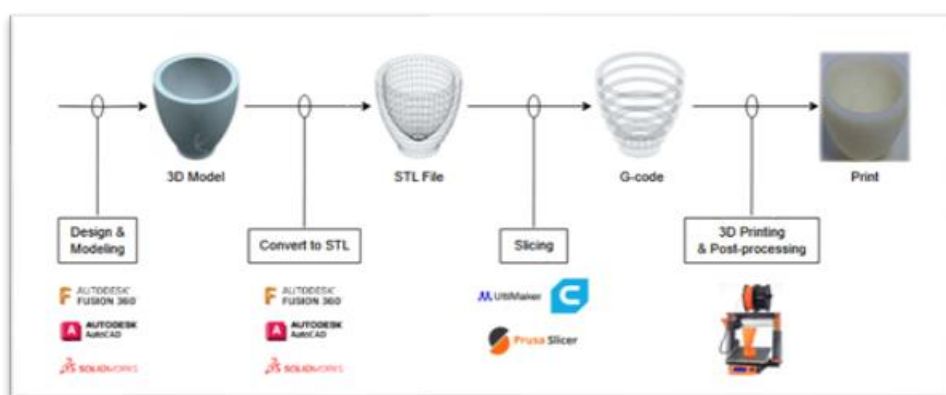
| Χαρακτηριστικό      | 3D Printing Plastics (π.χ. PLA, ABS) | Injection Molding Plastics (π.χ. ABS, Polycarbonate) |
|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Μηχανική αντοχή     | Μέτρια, εξαρτάται από infill         | Υψηλή, ομοιογενές υλικό                              |
| Θερμική αγωγιμότητα | Χαμηλή-μέτρια                        | Υψηλότερη                                            |
| Ευφλεκτότητα        | Εξαρτάται από το υλικό               | Εξαρτάται από το υλικό                               |
| Πάχος τοιχώματος    | >1,5 mm συνήθως                      | Μπορεί να είναι λεπτό (<1 mm)                        |
| Ακρίβεια διαστάσεων | Μέτρια                               | Πολύ υψηλή                                           |
| Παραγωγική κλίμακα  | Πρωτότυπα, μικρές σειρές             | Μαζική παραγωγή                                      |
| Τελική επιφάνεια    | Τραχιά (ανάλογα με layer height)     | Λεία, βιομηχανική ποιότητα                           |
| Κόστος ανά τεμάχιο  | Υψηλό για μεγάλες ποσότητες          | Χαμηλό για μεγάλες ποσότητες                         |

Εικόνα 1.6.β – Διαφορές Τρισδιάστατης εκτύπωσης με Injection Molding

## 2 Τεχνολογίες 3D Εκτύπωσης

### 2.1 Εισαγωγή στην 3D Εκτύπωση

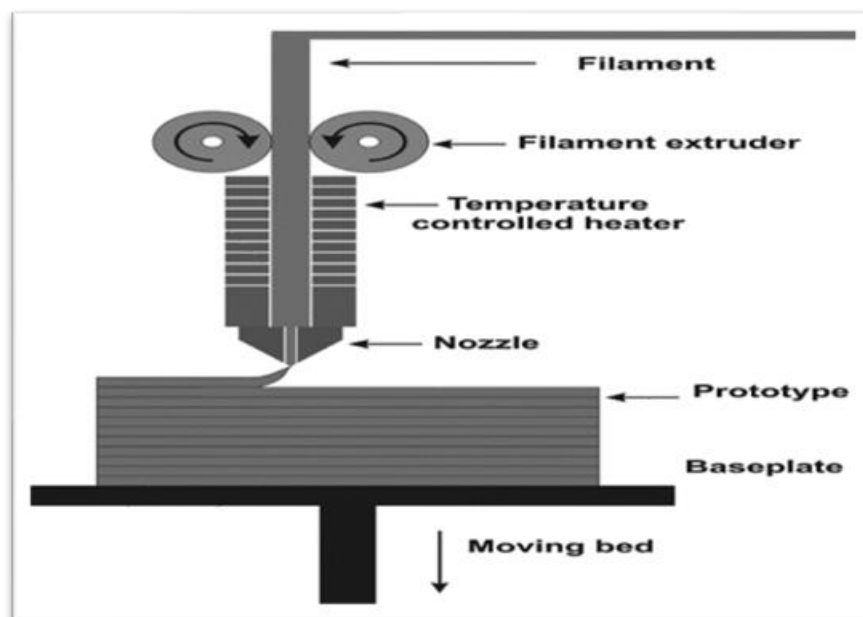
Η τρισδιάστατη εκτύπωση ή προσθετική κατασκευή (additive manufacturing, AM) αναδύθηκε τη δεκαετία του 1980 ως καινοτομία για ταχεία προτυποποίηση και από τότε εξελίχθηκε σε μια ευέλικτη βιομηχανική τεχνολογία [5][6]. Οι πρώιμες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη στερεολιθογραφία (SLA) – πατενταρισμένη από τον Chuck Hull (3D Systems) το 1986 – και την εναπόθεση τήγματος (FDM), που αναπτύχθηκε από τη Stratasys στα τέλη της δεκαετίας του 1980 [5]. Αυτές οι διαδικασίες στρώσης προς στρώση επέτρεψαν πολύπλοκες γεωμετρίες χωρίς τη χρήση καλουπιών, φέρνοντας επανάσταση στις ροές εργασίας σχεδιασμού. Στη σύγχρονη ταξινόμηση, οι διαδικασίες AM χωρίζονται σε κατηγορίες όπως εξώθηση υλικού (π.χ. FDM), φωτοπολυμερισμός σε λουτρό (vat) (SLA, DLP), σύντηξη σε κλίνη σκόνης (π.χ. SLS, SLM/DMLS), εκτόξευση υλικού (material jetting), εκτόξευση συνδετικού (binder jetting) και άλλες [5]. Κάθε κατηγορία έχει διακριτές αρχές, αλλά όλες μοιράζονται την ικανότητα να παράγουν εξαρτήματα απευθείας από CAD μοντέλα, επιτρέποντας πρωτοφανή εξατομίκευση. Με τον καιρό, η AM επεκτάθηκε σε πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά και σύνθετα υλικά [5]. Από τις ρίζες της στην προτυποποίηση η 3D εκτύπωση υποστηρίζει πλέον εφαρμογές σε αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, ιατρική, καταναλωτικά προϊόντα και ηλεκτρονικά, χάρη στην ικανότητά της να παράγει περίπλοκα σχήματα κατ' απαίτηση [5][6].



Εικόνα 2.1 – Overall workflow of the additive manufacturing process  
Πηγή: [5] (Σχήμα 2 , Σελίδα 4)

## 2.2 Εναπόθεση Τήγματος (Fused Deposition Modeling – FDM)

Το FDM είναι επί του παρόντος η πιο διαδεδομένη μέθοδος 3D εκτύπωσης για πολυμερή(πλαστικά) εξαρτήματα[5][6]. Σε αυτήν, ένα θερμοπλαστικό νήμα (π.χ. PLA, ABS, PETG κ.ά.) τροφοδοτείται σε ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο και εξωθείται σε λεπτές νημάτινες στρώσεις που στερεοποιούνται πάνω στην πλάκα κατασκευής[5]. Η κεφαλή κινείται στους άξονες X-Y για να «σχεδιάσει» κάθε στρώση, και στη συνέχεια η πλάκα κατεβαίνει για να σχηματιστεί η επόμενη. Τα τυπικά επιτραπέζια συστήματα χρησιμοποιούν ακροφύσια ~0,4 mm, προσφέροντας ύψη στρώσης περίπου 100–300 μm. Αυτό εξασφαλίζει μεσαία ανάλυση: το ελάχιστο μέγεθος λεπτομέρειας καθορίζεται από τη διάμετρο του ακροφυσίου και το πάχος της στρώσης, κάνοντας δύσκολη την εκτύπωση πολύ λεπτών χαρακτηριστικών κάτω από ~0,2mm.[6] Στην πράξη, τα εξαρτήματα FDM εμφανίζουν συχνά ορατές γραμμές στρώσεων και ανοχές διαστάσεων μερικών δεκάτων του χιλιοστού[6]. Παρ' όλα αυτά, το FDM μπορεί να παράγει εύκολα άκαμπτα κέλυφη που συναρμολογούνται και στερεώνουν στοιχεία, ενώ η βαθμονόμηση του εκτυπωτή μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια.



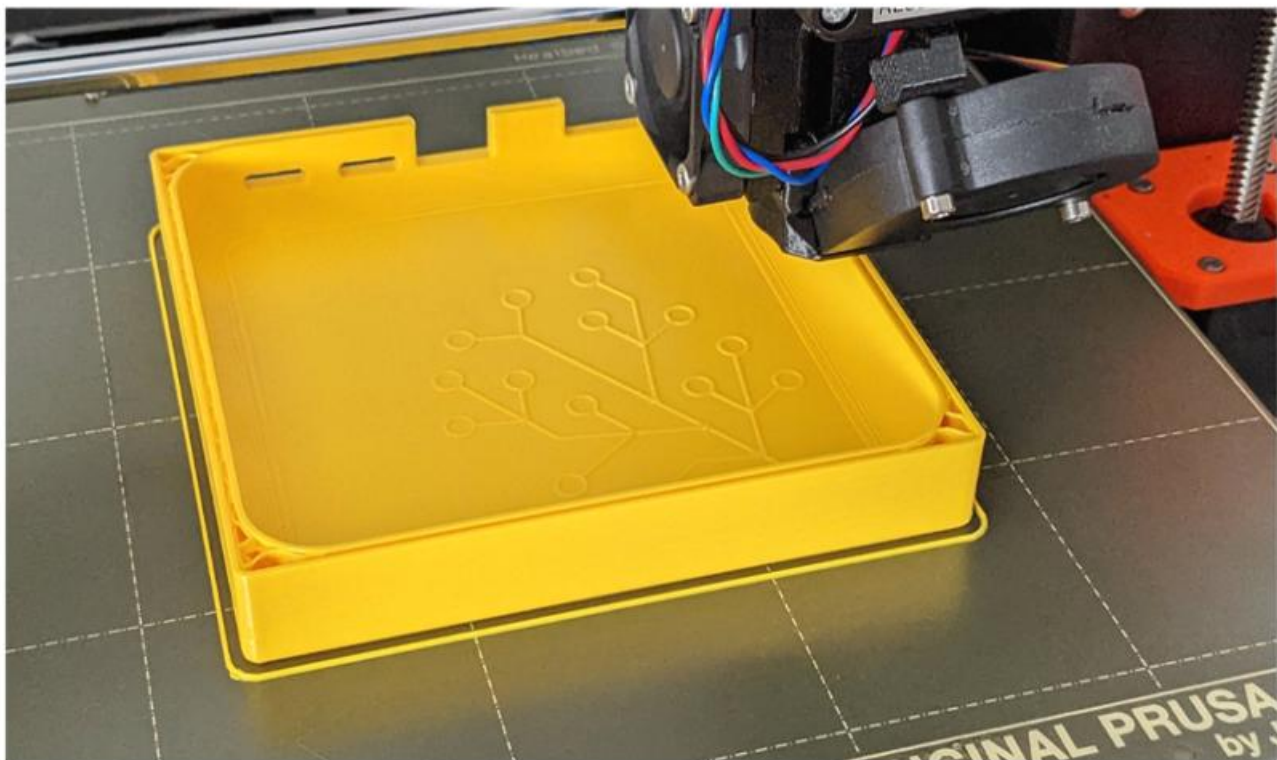
[This Photo](#) by Unknown Author is licensed under [CC BY-NC-ND](#)

Εικόνα 2.2.α – FDM 3D printer – overview Πηγή: [21]

**Υλικά.** Το FDM χρησιμοποιεί κυρίως θερμοπλαστικά, που θερμαίνονται και εξωθούνται εύκολα[5]. Το PLA είναι διαδεδομένο για το χαμηλό κόστος και τη βιοδιασπασιμότητα, το ABS και το PETG επιλέγονται για αυξημένη αντοχή ή χημική αντοχή[5]. Υπάρχουν και πιο εξελιγμένα υλικά, όπως πολυανθρακικό, νάιλον (πολυαμίδιο) και τεχνικά πλαστικά (PEEK, PEI/Ultem), τα οποία εκτυπώνονται σε εξειδικευμένα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας (π.χ.  $\sim 350$  °C για PEEK)[5]. Αυτά τα νήματα υψηλής απόδοσης επιτρέπουν κέλυφη ανθεκτικά σε θερμότητα ή μηχανικό στρες, αν και απαιτούν θωρακισμένο θάλαμο και υψηλές θερμοκρασίες ακροφυσίου[5].

**Πλεονεκτήματα.** Οι εκτυπωτές FDM και τα υλικά τους είναι σχετικά φθηνά και εύκολα προσβάσιμα[5]. Το υλικό εξοπλισμού κυμαίνεται από μικρές χόμπι συσκευές έως μεγαλύτερα βιομηχανικά μοντέλα, με μεγάλη ποικιλία νημάτων. Τα εξαρτήματα εμφανίζουν καλή ρωγμή και ακαμψία, κατάλληλα για λειτουργικά πρωτότυπα· εξαρτήματα ABS ή νάιλον αντέχουν σε μέτριες κρούσεις. Η ρύθμιση και συντήρηση είναι απλή, και η αναπαραγωγή πολλών ίδιων κομματιών απαιτεί απλώς επαναεκτύπωση του αρχείου[5]. Συνολικά, το FDM επιτρέπει γρήγορη εκτέλεση: τα πρωτότυπα παράγονται μέσα σε ώρες μόλις οριστικοποιηθεί το CAD μοντέλο.

**Περιορισμοί.** Η επιφάνεια των εξαρτημάτων FDM είναι σχετικά τραχεία, με ορατές ραβδώσεις αν οι στρώσεις δεν είναι πολύ λεπτές. Υπερκείμενα χαρακτηριστικά με γωνία άνω των  $\sim 45^\circ$  απαιτούν δομικές υποστηρίξεις, οι οποίες καταναλώνουν επιπλέον υλικό και αφαιρούνται μετά την εκτύπωση[5]. Τα εξαρτήματα είναι ανισοτροπικά: η αντοχή τους είναι μικρότερη κατά τον άξονα Z σε σχέση με το επίπεδο XY, λόγω της ψύξης και συγκόλλησης των στρώσεων. Η ακρίβεια διαστάσεων περιορίζεται από τη μηχανική ακρίβεια, τη συρρίκνωση του νήματος και την τοποθέτηση στρώσεων – συχνά  $\pm 0,2\text{mm}$  ή περισσότερο[6]. Η ταχύτητα εκτύπωσης είναι μεσαία: ένα μικρό κέλυφος μπορεί να πάρει μερικές ώρες, ενώ μεγάλα ή πολύπλοκα μέρη απαιτούν περισσότερο χρόνο. Εν κατακλείδι, το FDM προσφέρει γρήγορη, χαμηλού κόστους προτυποποίηση πλαστικών κελυφών[5], εις βάρος της λείας επιφάνειας και της εξαιρετικά λεπτομερούς απεικόνισης.



[This Photo](#) by Unknown Author is licensed under [CC BY-SA-NC](#)

*Εικόνα 2.2.β – Yellow FDM printing Πηγή: [22]*

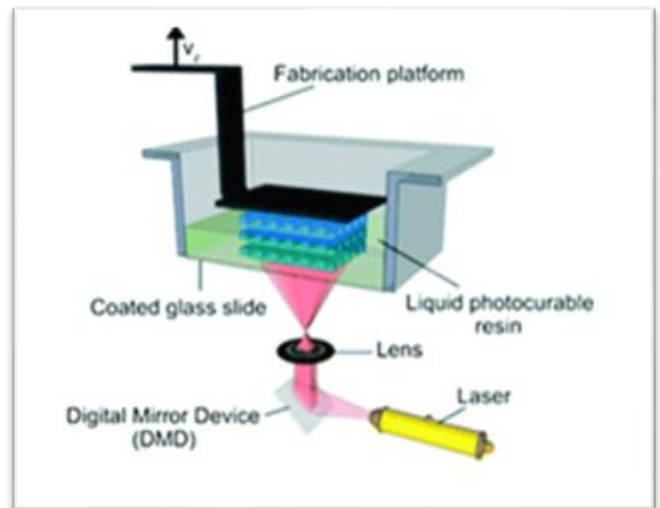


## 2.3 Φωτοπολυμερισμός σε Λουτρό (SLA και DLP)

Η μέθοδος φωτοπολυμερισμού σε λουτρό(vat photopolymerization) παράγει την υψηλότερη λεπτομέρεια και ποιότητα επιφάνειας μεταξύ των μη εργοστασιακών τεχνολογιών 3D εκτύπωσης. Η στερεολιθογραφία (SLA) χρησιμοποιεί εστιασμένη υπεριώδη ακτίνα λέιζερ για επιλεκτική σκλήρυνση υγρού

φωτοπολυμερούς ρητίνης στρώση προς στρώση[5]. Καθώς το λέιζερ σαρώνει

κάθε τομή, η ρητίνη πολυμερίζεται και στερεοποιείται· στη συνέχεια, η πλάκα κατασκευής κατεβαίνει και ένας μηχανισμός επαναφοράς απλώνει φρέσκια ρητίνη για τη νέα στρώση. Η SLA ήταν η πρώτη εμπορική τεχνολογία 3D εκτύπωσης (πατέντα 1986)[5]. Η Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (DLP) είναι σχετική μέθοδος που χρησιμοποιεί προβολέα ψηφιακού φωτός ή οθόνη LCD για την ταυτόχρονη έκθεση ολόκληρης της στρώσης. Η DLP συχνά είναι ταχύτερη από τη SLA για συγκρίσιμες αναλύσεις, καθώς κάθε έκθεση σκληραίνει ολόκληρη την τομή σε ένα βήμα[5].



Εικόνα 2.3 – FDM 3D printer – overview  
Τροποποιήθηκε από: [23](Εικόνα 8, Σελίδα 11)

**Υλικά.** SLA και DLP χρησιμοποιούν φωτοπολυμερείς ρητίνες (ακρυλικές ή εποξικές) που σκληραίνουν υπό UV φωτισμό. Υπάρχουν ρητίνες από βασικές (σκληρές, άκαμπτες) έως τεχνικές (ενισχυμένες, ανθεκτικές στη θερμοκρασία) και ακόμη και ευέλικτες ή χυτευτές. Επειδή η εκτύπωση γίνεται μέσα σε υγρό, τα εκτυπωμένα εξαρτήματα εμφανίζουν πολύ λεπτές λεπτομέρειες και λεία επιφάνεια. Μετά την εκτύπωση, απαιτείται πλύσιμο (για αφαίρεση μη σκληρυμένης ρητίνης) και τελική UV μετα-σκλήρυνση για πλήρη ιδιότητες υλικού.

**Ανάλυση.** Οι vat εκτυπωτές φτάνουν σε λεπτότατες στρώσεις 25–100  $\mu\text{m}$ , ενώ η ανάλυση XY καθορίζεται από το μέγεθος της δέσμης λέιζερ ή του pixel του προβολέα (συνήθως 50–100  $\mu\text{m}$ )[6]. Το αποτέλεσμα είναι εξαιρετικά ακριβή εξαρτήματα: SLA/DLP αναπαράγουν λεπτά στοιχεία (λεπτά τοιχώματα, γράμματα, snap-fit συνδέσεις) που θα

θόλωναν σε FDM. Για παράδειγμα, η SLA τυπικά δουλεύει με βήματα στρώσης κάτω από 50  $\mu\text{m}$ , προσφέροντας πιο ομαλές επιφάνειες και στενότερες ανοχές[6].

**Ταχύτητα.** Η ταχύτητα SLA εξαρτάται από τη διαδρομή του λέιζερ, αλλά γενικά είναι πιο αργή ανά στρώση από την DLP. Η DLP, με την ικανότητα να σκληραίνει ολόκληρη την τομή ταυτόχρονα, ολοκληρώνει μεγάλες στρώσεις γρήγορα (αν και η ανάλυση του προβολέα μπορεί να περιορίζει τη λεπτομέρεια). Στην πράξη, μικρά, περίπλοκα μοντέλα εκτυπώνονται συνήθως ταχύτερα σε DLP, ενώ η SLA μπορεί να είναι ανταγωνιστική ή ταχύτερη για πολύ ψηλά μέρη με μικρή τομή.

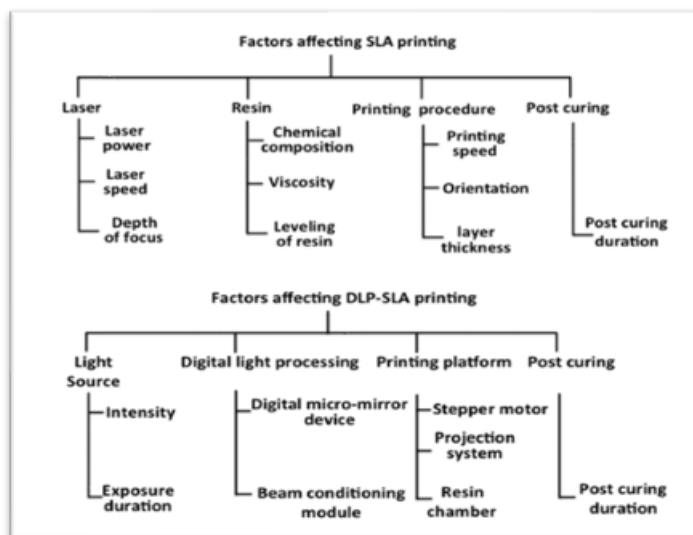
**Πλεονεκτήματα.** Το μεγαλύτερο όφελος SLA/DLP είναι η ακρίβεια και η ποιότητα επιφάνειας. Τα εκτυπώματα είναι λεία και πολύ λεπτομερή “απ’ ευθείας από τον εκτυπωτή”, συχνά απαιτώντας ελάχιστη λείανση. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για οπτικά ή ελέγχους συναρμογής πρωτοτύπων και για πολύπλοκα κέλυφη όπου χρειάζεται ακριβής σύζευξη εξαρτημάτων. Τα SLA εξαρτήματα είναι γενικά ισότροπα, με ομοιόμορφες μηχανικές ιδιότητες, σε αντίθεση με το FDM. Όπως αναφέρει μια αξιολόγηση, η SLA παρέχει “υψηλότερη ανάλυση λεπτομερειών” σε σύγκριση με το FDM[6].

**Περιορισμοί.** Οι φωτοπολυμερείς ρητίνες τείνουν να είναι πιο εύθραυστες από τα τυπικά FDM πλαστικά. Τα εκτυπώματα μπορεί να ραγίσουν υπό κρούση ή κάμψη. Επίσης, οι vat εκτυπωτές και οι ρητίνες είναι πιο ακριβοί· η ρητίνη κοστίζει σημαντικά περισσότερο ανά όγκο από το νήμα[6]. Η εκτύπωση απαιτεί υποστηρίξεις για κάθε υπερκείμενο, αν και αυτές αφαιρούνται ευκολότερα από τις ρητίνες. Τέλος, απαιτείται μετα-επεξεργασία (πλύσιμο και UV σκλήρυνση) και χειρισμός υγρής ρητίνης με προσοχή. Συνοψίζοντας, SLA/DLP επιτρέπουν γρήγορη, υψηλής ακρίβειας προτυποποίηση λεπτών κελυφών, αλλά με υψηλότερο κόστος και υλικές συμβιβασμούς (ευθραυστότητα, χειρωνακτικό καθαρίσμα)[5][6].



## 2.4 Μεταλλικές και Άλλες 3D Εκτυπωτικές Τεχνολογίες

Πέρα από τα πολυμερή, υπάρχουν και άλλες AM τεχνικές, αν και λιγότερο συχνές για απλά κέλυφη ενσωματωμένων συστημάτων. Η σύντηξη σε κλίνη σκόνης εκτείνεται σε πλαστικά και μέταλλα. Για παράδειγμα, η Επιλεκτική Σύντηξη με Λείζερ (SLS) συγχωνεύει σκόνης νάilon (π.χ. PA12) με λέιζερ, παράγοντας ανθεκτικά εξαρτήματα χωρίς ανάγκη υποστηρίξεων (η μη-συγχωνευμένη σκόνη λειτουργεί ως στήριγμα).



Εικόνα 2.4 - Parameters affecting laser and DLP-SLA print process. Πηγή: [23]

Τα SLS εξαρτήματα έχουν καλή μηχανική αντοχή και ελαφρώς υψηλότερη αντοχή στη θερμότητα από τα FDM πλαστικά, αλλά η επιφάνεια είναι τραχεία και η ανάλυση λεπτομέρειας χαμηλότερη από την SLA. Το Multi Jet Fusion (MJF) της HP είναι παραλλαγή που επίσης συγχωνεύει σκόνης νάilon και μπορεί να είναι ταχύτερη, αλλά παράγει ελαφρώς υφασμάτινες επιφάνειες. Η εκτόξευση πολυμερούς (Material Jetting) όπως PolyJet ή MultiJet εκτοξεύει μικροσταγονίδια φωτοπολυμερούς, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή ανάλυση (μέχρι ~16  $\mu\text{m}$  στρώση) και ακόμη έγχρωμα/πολυ-υλικά εξαρτήματα[5]. Οι εκτυπώσεις αυτές είναι εξαιρετικά λεπτομερείς, αλλά οι εκτυπωτές και τα υλικά είναι δαπανηρά και συνήθως έχουν μικρούς όγκους κατασκευής[5].

Η Μεταλλική 3D εκτύπωση (Selective Laser Melting – SLM ή Direct Metal Laser Sintering – DMLS) χρησιμοποιεί ισχυρά λέιζερ ή δέσμες ηλεκτρονίων για πλήρη τήξη μεταλλικών σκόνης (χάλυβας, αλουμίνιο, τιτάνιο κ.ά.), παράγοντας συμπαγή εξαρτήματα με πολύπλοκη γεωμετρία και ελάχιστη μηχανική επεξεργασία[5][7]. Για παράδειγμα, μελέτες δείχνουν ότι το SLM προσφέρει σχεδόν 100% πυκνότητα και εξαιρετική λεία επιφάνεια, συγκρίσιμη με σφυρηλατημένο μέταλλο[5]. Ωστόσο, οι μεταλλικοί εκτυπωτές είναι βιομηχανικού μεγέθους: απαιτούν προσεκτικό χειρισμό σκόνης, αδρανές αέριο και δαπανηρή μετα-επεξεργασία (αφαίρεση στηριγμάτων, θερμική κατεργασία, ισοστατική

πίεση). Επομένως, η μεταλλική AM χρησιμοποιείται κυρίως σε αεροδιαστημικές, ιατρικές και καλούπια, όχι για γρήγορη προτυποποίηση απλών κελυφών.

Άλλες λιγότερο συχνές μέθοδοι περιλαμβάνουν το binder jetting, όπου εκτοξεύεται συνδετικό υγρό σε στρώσεις σκόνης (πολυμερές ή μέταλλο) για δημιουργία “πράσινου” μέρους, το οποίο στη συνέχεια σκληραίνεται/συμπυκνώνεται[5]. Το binder jetting μπορεί να εκτυπώσει μεγάλα κομμάτια και έγχρωμα πρωτότυπα, αλλά τα πράσινα εκτυπώματα είναι εύθραυστα μέχρι να σκληρυνθούν[5]. Οι διαδικασίες Directed Energy Deposition (DED) εναποθέτουν σύρμα ή σκόνη ενώ τήκονται με λέιζερ/τάση, και χρησιμοποιούνται κυρίως για επιδιόρθωση ή επικάλυψη υπάρχουσων δομών. Το Sheet Lamination (κοπή και συγκόλληση στρώσεων υλικού) προσφέρει χαμηλή ανάλυση και σπάνια χρησιμοποιείται για κέλυφη.

Συνοψίζοντας, εκτός από FDM και SLA/DLP, οι υπόλοιπες AM διεργασίες (SLS, MJF, material jetting, binder jetting, μεταλλική σύντηξη) μοιράζονται τα πλεονεκτήματα της στρωματικής κατασκευής – γεωμετρική ελευθερία και μηδενικά καλούπια – αλλά συχνά συνοδεύονται από υψηλότερο κόστος, ειδικά υλικά ή πολύπλοκη μετα-επεξεργασία. Γι’ αυτό, για προτυποποίηση κελυφών ενσωματωμένων συστημάτων, κυριαρχούν οι πλαστικές διεργασίες FDM και SLA/DLP, καθώς προσφέρουν τον καλύτερο συνδυασμό ταχύτητας, κόστους και επαρκούς απόδοσης υλικού.

## 2.5 Επιπτώσεις για Γρήγορη, Ακριβή Προτυποποίηση

Η προσθετική φύση των FDM και SLA/DLP τα καθιστά ιδανικά για ταχεία προτυποποίηση ηλεκτρονικών κελυφών. Σε αντίθεση με τη χύτευση με έγχυση ή την κατεργασία CNC, δεν απαιτούνται καλούπια ή ειδικά εργαλεία· ο σχεδιασμός μεταφέρεται απευθείας από το CAD στο φυσικό αντικείμενο. Αυτό σημαίνει ότι μια νέα αναθεώρηση κελύφους μπορεί να εκτυπωθεί μέσα σε ώρες από την αλλαγή του σχεδίου. Για παράδειγμα, η επανάληψη ενός snap-fit καπακιού ή η βελτιστοποίηση διαδρομών καλωδίων μπορεί να γίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, επιταχύνοντας σημαντικά τους κύκλους ανάπτυξης[6]. Μελέτες επισημαίνουν ότι η προσβασιμότητα και η εξατομίκευση αυτών των μεθόδων AM έχουν καταστήσει τη 3D εκτύπωση “ευρέως χρησιμοποιούμενη” για προτυποποίηση .

Όσον αφορά την ακρίβεια, οι σύγχρονοι εκτυπωτές είναι αρκετά ακριβείς για τις περισσότερες λειτουργίες κελυφών. Τα SLA εξαρτήματα επιτυγχάνουν ανοχές χαρακτηριστικών κάτω από 0,1mm[6], επιτρέποντας στενή εφαρμογή για εξαρτήματα ή επενδυμένα καλώδια. Ακόμη και οι FDM συσκευασίες, μετά από βαθμονόμηση, φτάνουν σε ακρίβειες ~0,2–0,3 mm, που είναι αποδεκτές για πολλές ηλεκτρονικές θήκες. Κρίσιμες διαστάσεις (θέσεις οπών στερέωσης, υποδοχές πλακετών, πάχη τοιχωμάτων) μπορούν να ελεγχθούν άμεσα με εκτύπωση πρωτοτύπου, και τυχόν αποκλίσεις διορθώνονται γρήγορα στο CAD αρχείο. Έτσι, η 3D εκτύπωση μειώνει δραστικά τον κίνδυνο καθυστερημένων μηχανολογικών επανασχεδιασμών.

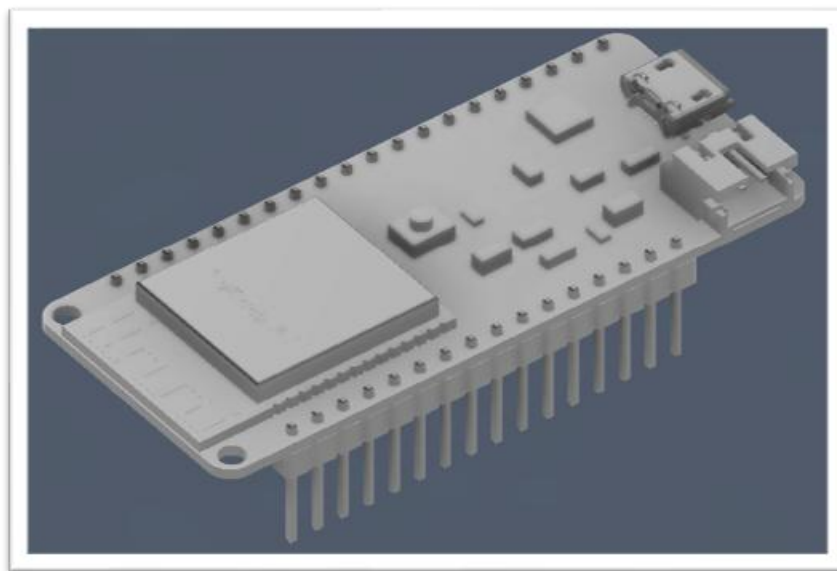
Στην πράξη, οι εταιρείες αξιοποιούν την 3D εκτύπωση για να επαναλαμβάνουν μέχρι το τελικό κέλυφος: σχεδιαστές εκτυπώνουν πολλές εκδόσεις θήκης για να δοκιμάσουν συναρμολόγηση με PCB, συνδέσμους, μπαταρίες και οθόνες. Δεδομένου ότι η εκτύπωση απαιτεί ελάχιστη προετοιμασία, αυτοί οι έλεγχοι είναι φθηνοί και γρήγοροι. Όπως συνοψίζει μια πρόσφατη αξιολόγηση, η προσθετική κατασκευή “επιτρέπει την παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών με απaráμιλλη εξατομίκευση”[5]. Αυτή η ευελιξία – σε συνδυασμό με την εξάλειψη χρόνων παράδοσης για καλούπια – καθιστά το FDM και το SLA/DLP ισχυρά εργαλεία στην ανάπτυξη ενσωματωμένων ηλεκτρονικών, επιταχύνοντας την καινοτομία στον σχεδιασμό προϊόντων[5][6].

### 3 Απαιτήσεις Σχεδιασμού Περιβλήματος

Το παρόν κεφάλαιο βασίζεται στο θεωρητικό υπόβαθρο για να καθορίσει τις απαιτήσεις σχεδίασης του περιβλήματος για το ενσωματωμένο σύστημα AMSA. Το περίβλημα πρέπει να περιέχει την πλακέτα με τον μικροεπεξεργαστή ESP32 και τους αισθητήρες (μονάδα θερμοκρασίας/υγρασίας M5Stack και μαγνητόμετρο AMR), καθώς και αρκετό χώρο για μπαταρία τύπου 18650 και δύο φωτοβολταϊκά πάνελ, ταυτόχρονα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις λειτουργίας σε περιβάλλον πλοίου. Πρέπει να παρέχει σταθερή στήριξη, να επιτρέπει την έκθεση ή τη διέλευση των αισθητήρων όπου απαιτείται, καθώς και τη σύνδεση καλωδίων, διατηρώντας τη δυνατότητα κατασκευής μέσω τεχνολογίας 3D εκτύπωσης με τήξη νήματος (FDM). Στην πράξη, αυτό σημαίνει σχεδίαση με στηρίγματα και φλάντζες εντός του κελύφους, στεγανά ανοίγματα ή μεμβράνες για τους αισθητήρες, και σωστές διελεύσεις για τους συνδέσμους ισχύος και δεδομένων, χωρίς να καταπονούνται τα καλώδια. Το περίβλημα πρέπει να επιτρέπει περιοδική συντήρηση ή αντικατάσταση αισθητήρων. Η επιλογή υλικού FDM (όπως ABS ή PETG) πρέπει να εξισορροπεί τη μηχανική αντοχή, την ανθεκτικότητα σε θερμότητα και την αντίσταση σε χημικές ουσίες.:

Κύριες λειτουργικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν:

- 



Εικόνα 3 –ESP 32 Dev Board 3D Render

- **Μηχανική στήριξη και στερέωση:** Το περίβλημα πρέπει να στηρίζει μηχανικά την πλακέτα ESP32 και τους αισθητήρες και να στερεώνεται με ασφάλεια στη δομή του πλοίου. Σημεία στήριξης ή βάσεις πρέπει να ενσωματωθούν στο 3D μοντέλο (π.χ. στηρίγματα με σπείρωμα, φλάντζες).
- **Ενσωμάτωση αισθητήρων:** Ο αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας ενδέχεται να απαιτεί διάτρητη επιφάνεια ή διαπερατή μεμβράνη για δειγματοληψία του αέρα, ενώ ο αισθητήρας AMR (μαγνητικού πεδίου) πρέπει να τοποθετηθεί με τέτοιο προσανατολισμό ώστε το φερρομαγνητικό του φιλμ να μετρά σωστά το πεδίο. Σημεία προεξοχής των αισθητήρων πρέπει να είναι στεγανά (π.χ. με φλάντζες ή επικαλυμμένες μεμβράνες εξαερισμού).
- **Σύνδεση καλωδίων και διελεύσεις:** Πρέπει να προβλέπονται στεγανές διελεύσεις ή υποδοχές για καλώδια ισχύος και δεδομένων. Τα ανοίγματα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να υποδέχονται υδατοστεγείς συνδέσμους με κατάλληλη IP κατάταξη.
- **Ευκολία κατασκευής και συναρμολόγησης:** Η γεωμετρία του περιβλήματος πρέπει να αποφεύγει αιωρούμενες προεξοχές (που δυσκολεύουν την εκτύπωση FDM) και να επιτρέπει τη συναρμολόγηση των εσωτερικών εξαρτημάτων. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η χρήση εκτυπωμένων σπειρωμάτων ή στηριγμάτων για βίδες.
- **Θερμική διαχείριση:** Αν και η κατανάλωση ισχύος είναι χαμηλή, το περιβάλλον ενός πλοίου όπως το μηχανοστάσιο είναι θερμό. Το περίβλημα πρέπει να αντέχει σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως ~60–70 °C χωρίς παραμόρφωση ή φθορά εξαρτημάτων. Η επιλογή υλικού και η ενσωμάτωση διατάξεων θερμικής διασποράς (π.χ. εσωτερικές νευρώσεις, ψύκτρες) είναι κρίσιμη.

### 3.1 Περιβαλλοντικές Απαιτήσεις

Το περιβάλλον ενός πλοίου επιβάλλει αυστηρές απαιτήσεις προστασίας. Τυπικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, υγρασία και συμπύκνωση, αναθυμιάσεις λαδιών και καυσίμων, σκόνη/ρυπαντές και μηχανικούς κραδασμούς ή κρούσεις από μηχανήματα. Το περίβλημα πρέπει επομένως να είναι στεγανό έναντι εισόδου υγρών και σκόνης, ανθεκτικό στη διάβρωση και αρκετά στιβαρό για να αντέχει σε κραδασμούς ή κρούσεις. Η προστασία από εισροή (νερού/σκόνης) και η αντοχή σε κραδασμούς/δονήσεις είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για την αξιοπιστία.

### 3.2 Εισροή νερού και Κατάταξη IP(Ingress Protection)

Η κατάταξη IP (IEC 60529) καθορίζει την αντοχή του περιβλήματος σε σκόνη και νερό. Ο κωδικός IP αποτελείται από το "IP" και δύο ψηφία: το πρώτο (0–6) για προστασία από στερεά και το δεύτερο (0–8) για υγρά[8]. Για παράδειγμα, το IP67 σημαίνει πλήρη προστασία από σκόνη (6) και προστασία από εμβάπτιση σε έως 1 m νερό για 30 λεπτά [7][8]. Στον θάλαμο μηχανής, το περίβλημα πρέπει να αντέχει σε πιτσιλιές, εκτοξευόμενο νερό και σύντομη εμβάπτιση. Η ελάχιστη αποδεκτή κατάταξη είναι IP65–IP66, ενώ για μεγαλύτερη ασφάλεια προτείνεται IP67 ή υψηλότερο. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ελαστικών παρεμβυσμάτων ή δακτυλίων O(O ring) σε ραφές και διελεύσεις καλωδίων, καθώς και ιδιαίτερη μέριμνα για τα ανοίγματα αισθητήρων (π.χ. χρήση υδρόφοβων, διαπερατών μεμβρανών εξαιρισμού για αισθητήρες υγρασίας). Η κατάταξη IP διασφαλίζει ότι ούτε συμπυκνωμένο νερό ούτε πίδακες υπό πίεση θα προκαλέσουν βλάβες στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα[8].

| Πρώτο Ψηφίο | Μηχανική Προστασία                                                    | Δεύτερο Ψηφίο | Προστασία από Νερό                                                                                  |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0           | Καμία προστασία                                                       | 0             | Καμία προστασία                                                                                     |
| 1           | Προστασία από στερεά αντικείμενα > 50mm, π.χ. τυχαία επαφή με το χέρι | 1             | Προστασία από κάθετη πτώση σταγόνων νερού π.χ. συμπύκνωση                                           |
| 2           | Προστασία από στερεά αντικείμενα > 12mm, π.χ. δάχτυλα                 | 2             | Προστασία από άμεσο ψεκασμό νερού έως 15° από την κατακόρυφο                                        |
| 3           | Προστασία από στερεά αντικείμενα > 2,5mm, π.χ. εργαλεία και καλώδια   | 3             | Προστασία από άμεσο ψεκασμό νερού έως 60° από την κατακόρυφο                                        |
| 4           | Προστασία από στερεά αντικείμενα > 1mm, π.χ. σύρματα, καρφιά          | 4             | Προστασία από πιτσιλιές νερού από όλες τις κατευθύνσεις, επιτρέπεται περιορισμένη είσοδος           |
| 5           | Προστασία από σκόνη, περιορισμένη είσοδος, χωρίς επιβλαβείς αποθέσεις | 5             | Προστασία από πίδακες χαμηλής πίεσης από όλες τις κατευθύνσεις, περιορισμένη είσοδος                |
| 6           | Απόλυτη προστασία από σκόνη                                           | 6             | Προστασία από ισχυρούς πίδακες νερού, π.χ. σε καταστρώματα πλοίων, επιτρέπεται περιορισμένη είσοδος |
| —           | —                                                                     | 7             | Προστασία από προσωρινή εμβάπτιση μεταξύ 15cm και 1m (διάρκεια δοκιμής: 30 λεπτά)                   |
| —           | —                                                                     | 8             | Προστασία από μακροχρόνια εμβάπτιση υπό πίεση                                                       |

Εικόνα 3.2 – Κλίμακα IP για στερεά και υγρά. Δεδομένα πάρθηκαν από Πηγή: [24]

### 3.3 Αντοχή σε κραδασμούς και δονήσεις

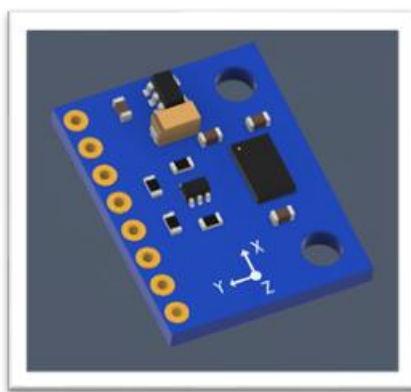
Ο εξοπλισμός υπόκειται σε σημαντικούς κραδασμούς και κρούσεις (π.χ. από εκκινήσεις/παύσεις μηχανών, κύματα, τυχαίες συγκρούσεις). Για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία, το περίβλημα πρέπει να πληροί τα αντίστοιχα πρότυπα, όπως το IEC 60068-2-27 (δοκιμή μηχανικών κρούσεων για ηλεκτρονικά) και το MIL-STD-810 (ενότητες περί κραδασμών και δονήσεων), καθώς και τα πρότυπα αυτοκινήτου όπως το ISO 16750-3. Τα πρότυπα αυτά καθορίζουν δοκιμαστικούς παλμούς (συνήθως ημημιτονοειδείς ή τραπεζοειδείς) έντασης δεκάδων έως εκατοντάδων g διάρκειας χιλιοστών του δευτερολέπτου. Για παράδειγμα, η μέθοδος 516.7 του MIL-STD-810G περιγράφει παλμούς σοκ 40 g για 6 ms. Αν και ένα πλαστικό περίβλημα FDM δεν μπορεί να ανταγωνιστεί στρατιωτικά πρότυπα βαρέως τύπου, πρέπει να αποφεύγει τη θραύση. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ABS (αντί PLA), στρογγυλεμένες γωνίες, και απορρόφηση κραδασμών (π.χ. εσωτερικά παρεμβύσματα ή αποσβεστήρες). Στην πράξη, ένας στόχος θα μπορούσε να είναι η αντοχή σε επίπεδο IEC (π.χ. 50–100 g για 11 ms), με κατάλληλη στερέωση βιδών και εσωτερικές νευρώσεις για αποφυγή ρηγμάτων ή τριγμών. Αυτές οι προβλέψεις διασφαλίζουν ότι αιφνίδιες κρούσεις ή κινήσεις πλοίου δεν θα αποκολλήσουν ή καταστρέψουν τα ηλεκτρονικά ή τις συγκολλήσεις.

### 3.4 Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες

Πέρα από το νερό και τους κραδασμούς, το περίβλημα πρέπει να αντιστέκεται στη διάβρωση από ατμόσφαιρα θαλάσσης ή αναθυμιάσεις καυσίμων/λαδιών. Χρήσιμα υλικά είναι το ABS ναυτικής ποιότητας ή το PLA με UV σταθεροποιητή. Επικαλύψεις ανθεκτικές σε χημικά (π.χ. εποξικές βαφές) και χρήση ανοξειδωτων στοιχείων στερέωσης συμβάλλουν στην προστασία. Θερμικές δοκιμές κατά MIL-STD-810 (π.χ. μέθοδοι 501/502 για ακραίες θερμοκρασίες) επιβεβαιώνουν ότι το πλαστικό δεν θα παραμορφωθεί ή ραγίσει εντός εύρους  $-20^{\circ}\text{C}$  έως  $+70^{\circ}\text{C}$ . Τέλος, επειδή στους θαλάμους μηχανής ενδέχεται να υπάρχουν εύφλεκτα αέρια (π.χ. αναθυμιάσεις βενζίνης), η σχεδίαση πρέπει να αποφεύγει πηγές ανάφλεξης (π.χ. θερμές επιφάνειες) και να είναι σφραγισμένη ώστε να αποτρέπει σπινθήρες.

### 3.5 Αισθητήρας Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης (AMR)

Ο αισθητήρας Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης (AMR) είναι τύπος μαγνητομέτρου στερεάς κατάστασης με υψηλή ευαισθησία, κατάλληλος για μέτρηση μαγνητικών πεδίων. Αποτελείται από λεπτά φιλμ φερρομαγνητικών υλικών των οποίων η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ του ρεύματος και του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Δηλαδή, το φαινόμενο μαγνητοαντίστασης προκαλεί μεταβολή στην αντίσταση ανάλογα με τον προσανατολισμό του πεδίου. Έτσι, ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει τη διεύθυνση και το μέτρο ενός μαγνητικού πεδίου εντός του επιπέδου του, λειτουργώντας ως ψηφιακή πυξίδα. Οι AMR αισθητήρες συνήθως υλοποιούνται ως γέφυρες αντιστάσεων, με τάση εξόδου που μεταβάλλεται ανάλογα με την περιστροφή του πεδίου. Στην πράξη, προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα σε μικρές διαστάσεις[9]. Χρησιμοποιούνται εκτενώς στην πλοήγηση (π.χ. για προσανατολισμό) και στην ανίχνευση ρεύματος (μέσω του πεδίου γύρω από έναν αγωγό). Στο παρόν σύστημα, ο αισθητήρας AMR θα βαθμονομηθεί ώστε να αγνοεί μαγνητικές αποκλίσεις του πλοίου και να μετρά το οριζόντιο πεδίο. Η τοποθέτησή του στο περίβλημα πρέπει να αποφεύγει την εγγύτητα με σιδηρομαγνητικά μέταλλα ή πηγές θορύβου. Δεδομένου ότι πρέπει να «βλέπει» το πεδίο, δεν απαιτείται άνοιγμα στο περίβλημα· το πλαστικό περίβλημα είναι μη μαγνητικό και δεν εμποδίζει το πεδίο, επιτρέποντας στον αισθητήρα να τοποθετηθεί πίσω από σφραγισμένο τοίχωμα[9].



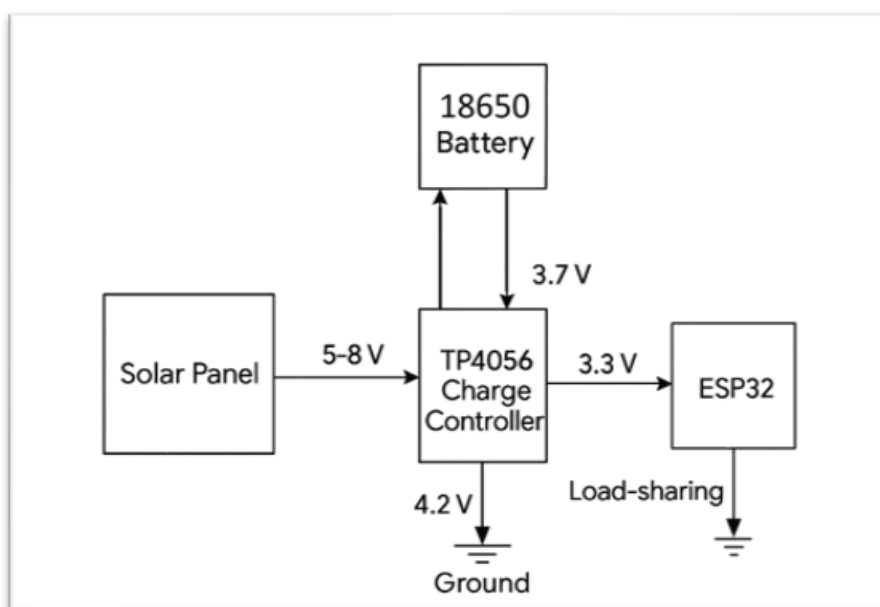
Εικόνα 3.5 – Αναπαράσταση αισθητήρα τύπου AMR μοντέλο GY-511 LSM303DLHC



### 3.6 Ενεργειακή Αυτονομία και Τροφοδοσία

Η ενεργειακή αυτονομία του συστήματος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, δεδομένου ότι τοποθετείται σε περιβάλλον χωρίς πρόσβαση σε εξωτερική τροφοδοσία. Για τον λόγο αυτό, η σχεδίαση περιλαμβάνει χρήση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ιόντων λιθίου τύπου 18650 και φωτοβολταϊκής φόρτισης μέσω δύο ηλιακών πάνελ.

Η μπαταρία 18650 αποτελεί ευρέως διαδεδομένη επιλογή σε φορητά ηλεκτρονικά λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (συνήθως 2500–3500 mAh), χαμηλής αυτοεκφόρτισης και επαναφορτιζόμενης φύσης. Η σταθερή ονομαστική της τάση είναι 3.7 V, με τάση πλήρους φόρτισης στα 4.2 V και εκφόρτισης έως περίπου 3.0 V. Η επιλογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας διασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί για πολλές ώρες (ή ημέρες) χωρίς εξωτερική παροχή ρεύματος. Με κατάλληλη διαχείριση ενέργειας στο λογισμικό (π.χ. χρήση deep sleep στον ESP32), μπορεί να επιτευχθεί χαμηλή κατανάλωση της τάξης των 50–200  $\mu\text{W}$  σε αδράνεια, παρατείνοντας σημαντικά τη διάρκεια λειτουργίας.



Εικόνα 3.6 – Τυπικό διάγραμμα ηλιακής φόρτισης με TP4056 και ESP32

Η φόρτιση της μπαταρίας επιτυγχάνεται μέσω δύο ηλιακών πάνελ, συνδεδεμένων σε παράλληλη ή σειριακή διάταξη (ανάλογα με την τάση εξόδου του καθενός), τα οποία τοποθετούνται σε κατάλληλη επιφάνεια του περιβλήματος. Η συνολική ισχύς εξόδου των πάνελ (τυπικά 5–6 V, 1–2 W το καθένα) επαρκεί για τη σταδιακή φόρτιση της μπαταρίας

κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το σύστημα ενσωματώνει κύκλωμα φόρτισης με ελεγκτή προστασίας (π.χ. TP4056 ή αντίστοιχο), το οποίο διαχειρίζεται τη ροή ενέργειας και προστατεύει από υπερφόρτιση, βαθιά εκφόρτιση ή υπερθέρμανση. Επιπλέον, μπορεί να προστεθεί κύκλωμα επιλογής τροφοδοσίας (load sharing), ώστε η συσκευή να λειτουργεί απευθείας από τον ήλιο όταν υπάρχει επαρκής ακτινοβολία, μειώνοντας τον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της.

Η τοποθέτηση των ηλιακών πάνελ πρέπει να διασφαλίζει έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία και προστασία από ρύπους, ενώ το περίβλημα πρέπει να επιτρέπει τη διέλευση καλωδίων φόρτισης με στεγανότητα. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται σχεδόν πλήρης ενεργειακή αυτονομία της συσκευής, μειώνοντας τις ανάγκες συντήρησης και επιτρέποντας μακροχρόνια εγκατάσταση σε δυσπρόσιτους χώρους χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

## 4 Σχεδίαση περιβλήματος AMSA

**Εργαλεία για τον Σχεδιασμό της Τρισδιάστατης Κατασκευής** Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό της τρισδιάστατης συσκευασίας (enclosure) του ενσωματωμένου συστήματος αισθητήρων. Παρουσιάζονται ευρέως χρησιμοποιούμενα παραμετρικά λογισμικά 3D σχεδίασης και τεκμηριώνεται η επιλογή του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της σχεδίασης της συσκευασίας.

### 4.0.1 Δημοφιλή Παραμετρικά Λογισμικά 3D Σχεδίασης

Τα παραμετρικά λογισμικά 3D σχεδίασης επιτρέπουν τη δημιουργία σύνθετων μοντέλων μέσω καθορισμού παραμέτρων και γεωμετρικών σχέσεων, επιτρέποντας αποτελεσματικές τροποποιήσεις με διατήρηση της αρχικής σχεδιαστικής πρόθεσης. Παρακάτω παρατίθενται τέσσερα από τα πιο δημοφιλή λογισμικά παραμετρικής σχεδίασης:

**SolidWorks:** Αναπτυγμένο από την Dassault Systèmes, το SolidWorks αποτελεί κορυφαίο λογισμικό στον χώρο της μηχανικής σχεδίασης και παραγωγής. Διαθέτει ισχυρές δυνατότητες, όπως διαχείριση συναρμολογήσεων, εργαλεία προσομοίωσης και φιλικό περιβάλλον χρήσης, κατάλληλο τόσο για αρχάριους όσο και για έμπειρους χρήστες. Είναι ιδιαίτερα δημοφιλές στον μηχανολογικό σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων [10].

**CATIA:** Επίσης προϊόν της Dassault Systèmes, το CATIA (Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application) είναι ένα προηγμένο λογισμικό CAD, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε τομείς όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυπηγική. Διακρίνεται για τις ικανότητές του στην πολύπλοκη επιφανειακή μοντελοποίηση, τον μηχανολογικό σχεδιασμό και την ολοκληρωμένη μηχανική συστημάτων, προσφέροντας ακρίβεια σε έργα μεγάλης κλίμακας [11].

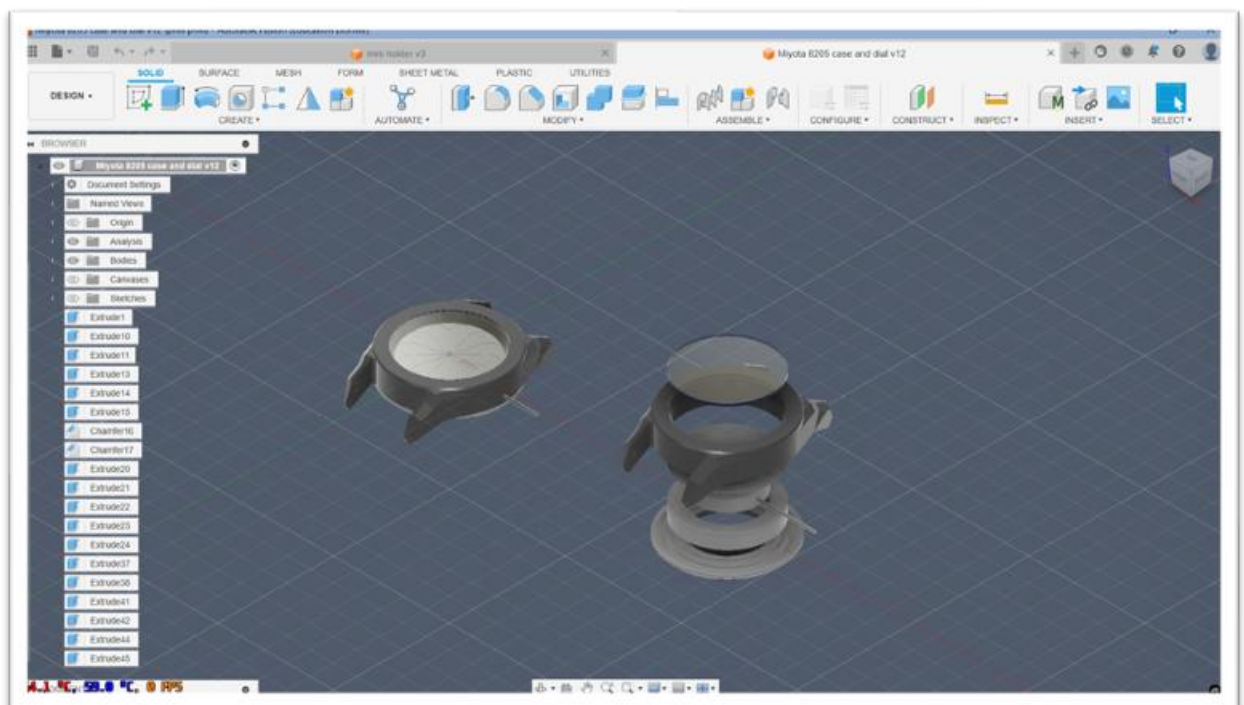
**FreeCAD:** FreeCAD is an open-source parametric 3D CAD modeler, designed for a wide range of applications including mechanical engineering, product design, and architecture. Its modular architecture supports customization through plugins, and it includes tools for

parametric modeling, finite element analysis, and sketching, making it a versatile choice for hobbyists and professionals alike

**Fusion 360:** Το Fusion 360 της Autodesk είναι ένα εργαλείο CAD, CAM και CAE βασισμένο στο cloud, το οποίο ενσωματώνει παραμετρική, άμεση και ελεύθερης μορφής σχεδίαση. Σχεδιασμένο για ανάπτυξη προϊόντων και κατασκευή, προσφέρει εκτενείς δυνατότητες και πρόσβαση από πολλές συσκευές, ενώ παρέχεται δωρεάν έκδοση για ερασιτέχνες και νεοσύστατες επιχειρήσεις [13].

#### 4.0.2 Επιλογή Λογισμικού Σχεδίασης: Fusion 360

Για τις ανάγκες του παρόντος έργου, επιλέχθηκε το Fusion 360 ως κύριο εργαλείο σχεδίασης, λόγω διαφόρων πλεονεκτημάτων. Η υποδομή cloud του λογισμικού το καθιστά σχετικά ελαφρύ και επιτρέπει την εκτέλεσή του σε ευρύ φάσμα υπολογιστικών συστημάτων, εφόσον πληρούνται οι βασικές απαιτήσεις, διευκολύνοντας την προσβασιμότητα [13]. Η διαισθητική του διεπαφή και η πληθώρα διαθέσιμων εκπαιδευτικών υλικών το καθιστούν ιδανικό για χρήστες με περιορισμένη εμπειρία στην τρισδιάστατη σχεδίαση, επιτρέποντας ταχεία εκμάθηση και αποτελεσματική ροή εργασιών [13]. Επιπλέον, η ευρεία χρήση του από επαγγελματίες και ερασιτέχνες συνοδεύεται από πλούσια τεκμηρίωση, φόρουμ και κοινότητες υποστήριξης που ενισχύουν την επίλυση προβλημάτων και την ανάπτυξη δεξιοτήτων [13].



Εικόνα 4.0.2 – Παράδειγμα περιβάλλοντος σχεδίασης σε Autodesk Fusion360

### **4.1.1 Κατασκευή Περιβλήματος**

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία σχεδίασης (CAD) του περιβλήματος για το ενσωματωμένο σύστημα AMSA, χωρίς να περιλαμβάνονται προς το παρόν οι παράμετροι και οι ενέργειες 3D εκτύπωσης, οι οποίες θα παρουσιαστούν σε επόμενο υποκεφάλαιο. Δημιουργήθηκαν πέντε διαδοχικές εκδόσεις του σχεδίου, ώστε να κατανοηθούν τα προβλήματα και οι βελτιώσεις που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια της εξέλιξης.

### **Σχεδίαση CAD**

Στη φάση της σχεδίασης στο Fusion 360, η διαδικασία ήταν εμπειρική, με κάθε έκδοση να βελτιώνεται βάση των μαθημάτων που αντλήθηκαν από την προηγούμενη. Οι κύριοι στόχοι στο αρχικό σχέδιο υλοποίησης ήταν:

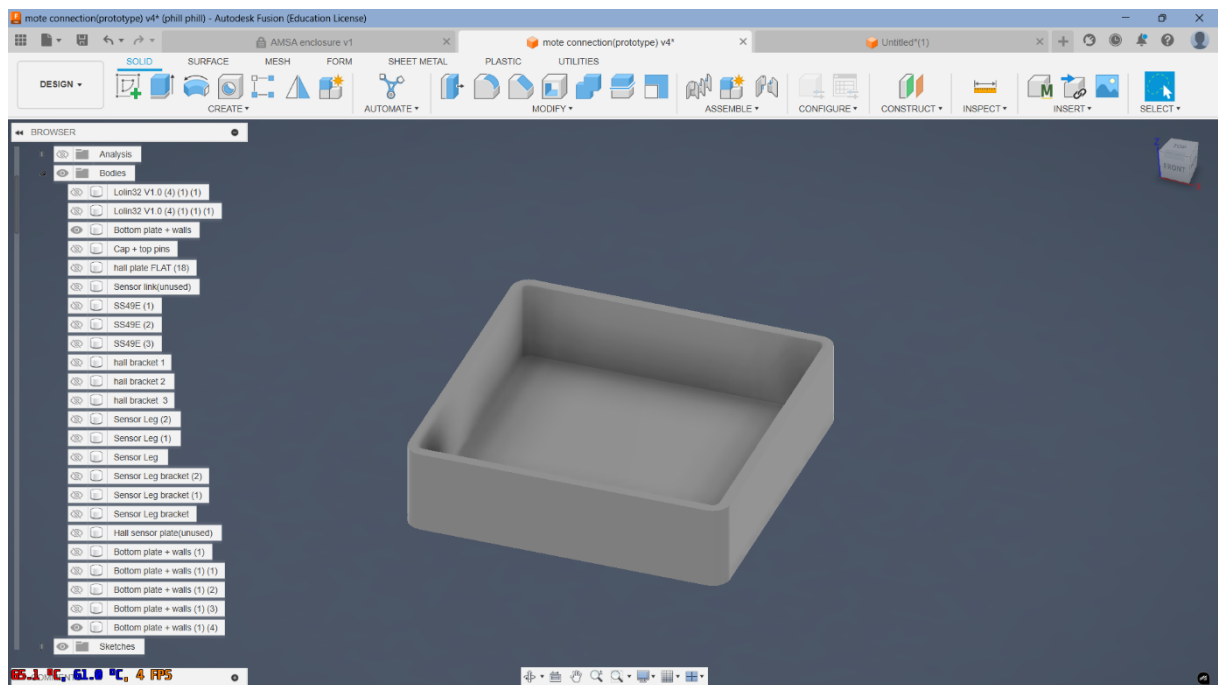
- Διασφάλιση επαρκούς εσωτερικού χώρου για την πλακέτα ESP32, τους αισθητήρες και την μπαταρία.
- Καθορισμός αρχικών θέσεων για bosses στερέωσης
- Κατανομή cutouts για αισθητήρες (θερμοκρασίας/υγρασίας και AMR) και διόδους καλωδίων με στυπιοθλίπτες IP67.
- Ελαχιστοποίηση ογκώδους σχεδίασης, ώστε να γίνεται γρήγορα προτυποποίηση.

Οι επιμέρους εκδόσεις περιγράφονται ακολούθως:

### 4.1.2 Έκδοση 1: Βασικό Κουτί με Εσωτερική Στερέωση

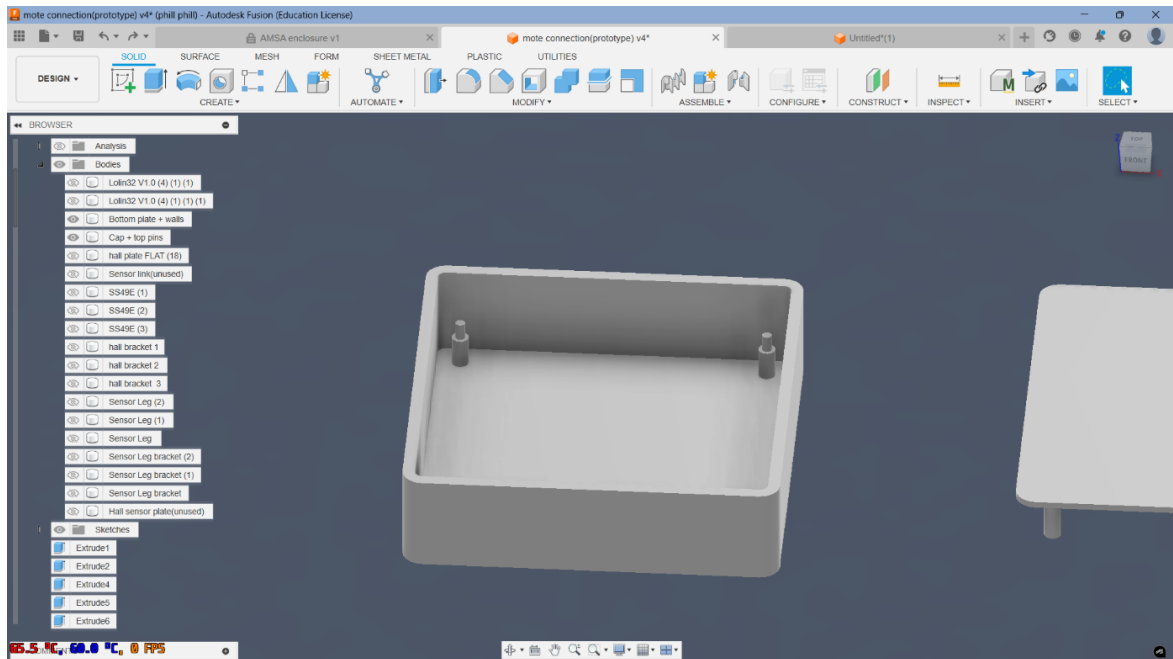
Στην πρώτη έκδοση σχεδιάστηκε ένα απλό ορθογώνιο περίβλημα διαστάσεων  $\sim 123 \times 123 \times 32\text{mm}$ , με εσωτερικά bosses (Προεξοχές) στήριξης για την πλακέτα ESP32 σταθερά τοποθετημένα στο κέντρο του πάτου.

**Γενική Δομή:** Το κύριο σώμα αποτελείται από εξωτερικό ορθογώνιο πλαίσιο (πάχος τοιχώματος 4mm).



Εικόνα 4.1.2.α – Αρχική σχεδίαση γενικής δομής κουτιού

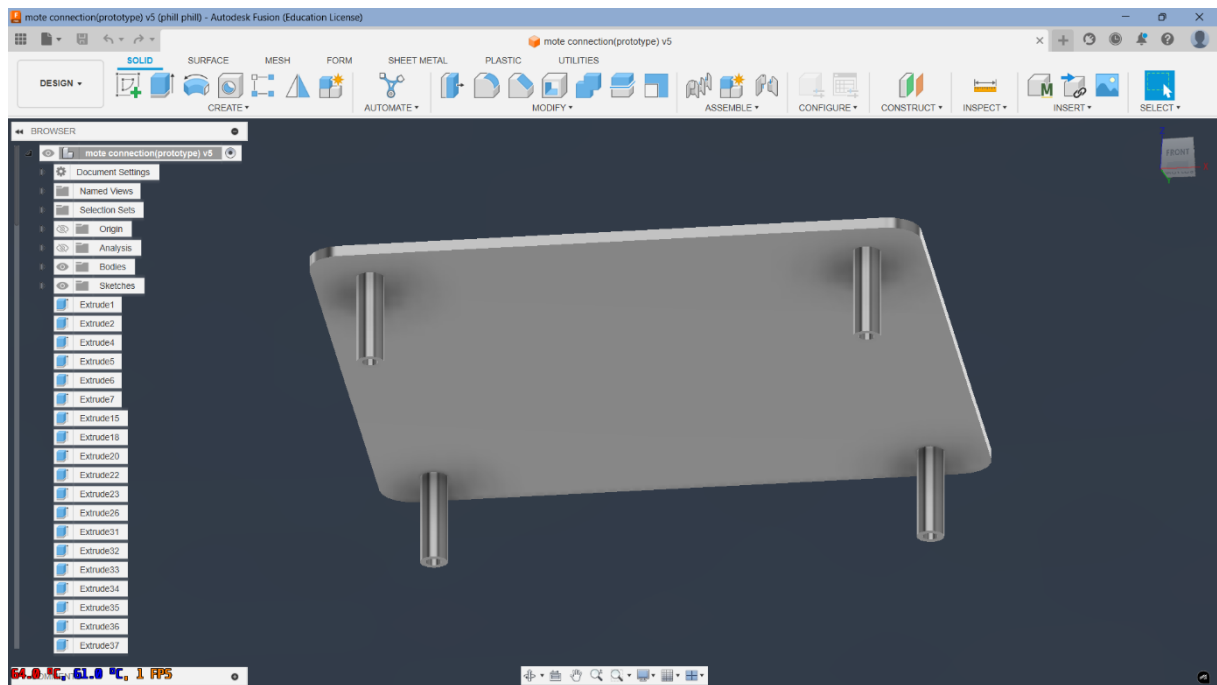
- **Bosses Στήριξης:** Τέσσερα κυλινδρικά bosses (διάμετρος βάσης 5.6mm, ύψος 10mm, και διαστάσεις εσωτερικού πυλώνα ύψος 5.6mm και 3.2 διάμετρο



Εικόνα 4.1.2.β – Προσθήκη bosses στήριξης σε αρχικό σχέδιο

- **Cutouts Αισθητήρων:** Για λόγους απλότητας, δεν σχεδιάστηκαν ακόμη συγκεκριμένα cutouts.
- **Δίοδοι Καλωδίων:** Για λόγους απλότητας, δεν σχεδιάστηκε ακόμη δίοδος.
- **Εφαρμοστό καπάκι:** Απλό καπάκι το οποίο διαθέτει προεξοχές στερέωσης, σχεδιασμένες ώστε να εφαρμόζουν ακριβώς επάνω στις αντίστοιχες του κύριου σώματος. Η σύνδεση αυτή εξασφαλίζει βασική στεγανότητα έναντι υγρασίας και μηχανική συγκράτηση χωρίς την ανάγκη πρόσθετων εξαρτημάτων.





Εικόνα 4.1.2.γ – Αρχικό σχέδιο καπακιού

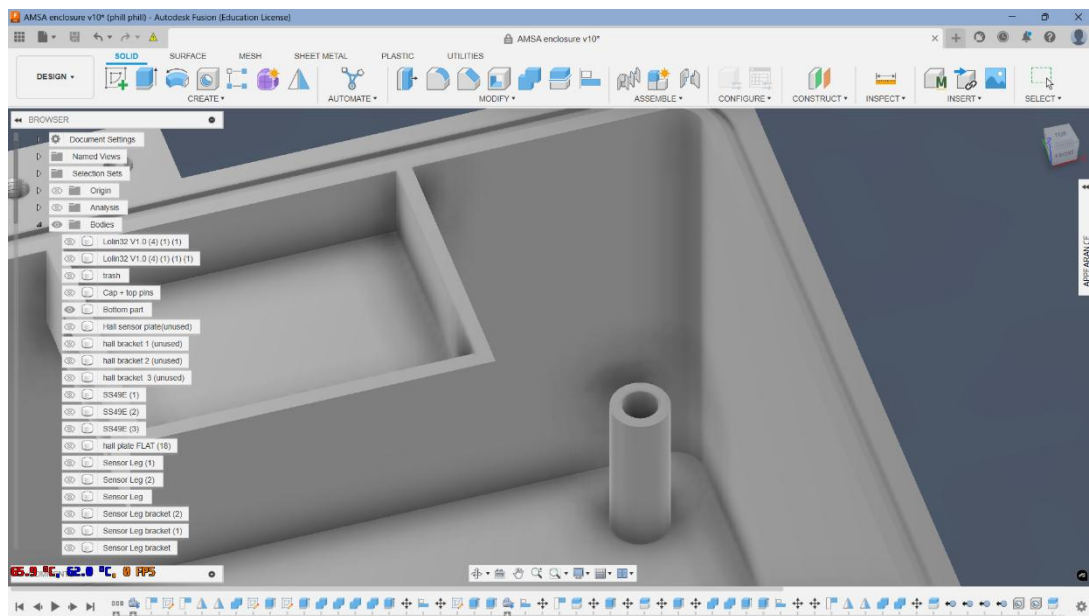
### Παρατηρήσεις από την Έκδοση 1:

Η πρώτη εκδοχή σχεδιάστηκε ως αρχικό στάδιο διερεύνησης, με στόχο την αναγνώριση πιθανών προβλημάτων στη στερέωση της πλακέτας και την αξιολόγηση της συνολικής μορφολογίας του περιβλήματος, ενόψει της συνέχισης της σχεδιαστικής διαδικασίας. Κατά την αξιολόγηση αυτής της έκδοσης, διαπιστώθηκε ότι, αν και οι προεξοχές στερέωσης (bosses) είχαν τοποθετηθεί με ακρίβεια ώστε να ευθυγραμμίζονται με τις οπές της πλακέτας, η μορφή τους παρουσίαζε σημαντικές αδυναμίες. Συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο υλοποιήθηκε η στήριξη της πλακέτας καθιστούσε τη διαδικασία εκτύπωσης πιο απαιτητική, ενώ ταυτόχρονα δυσχέραινε την ασφαλή και σταθερή τοποθέτηση της πλακέτας στο εσωτερικό του περιβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις, αποφασίστηκε στη δεύτερη έκδοση να αναθεωρηθεί η μορφολογία των προεξοχών στερέωσης, να ενσωματωθούν κατάλληλα ανοίγματα (cutouts) για την τοποθέτηση των ατμοσφαιρικών αισθητήρων και των στυπιοθλιπτών, και να επανασχεδιαστεί το εξωτερικό περίβλημα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η απαιτούμενη στεγανότητα όσο και η μηχανική σταθερότητα της πλακέτας.

#### 4.1.3 Έκδοση 2: Προσθήκη Cutouts και νέα Μορφολογία Bosses,

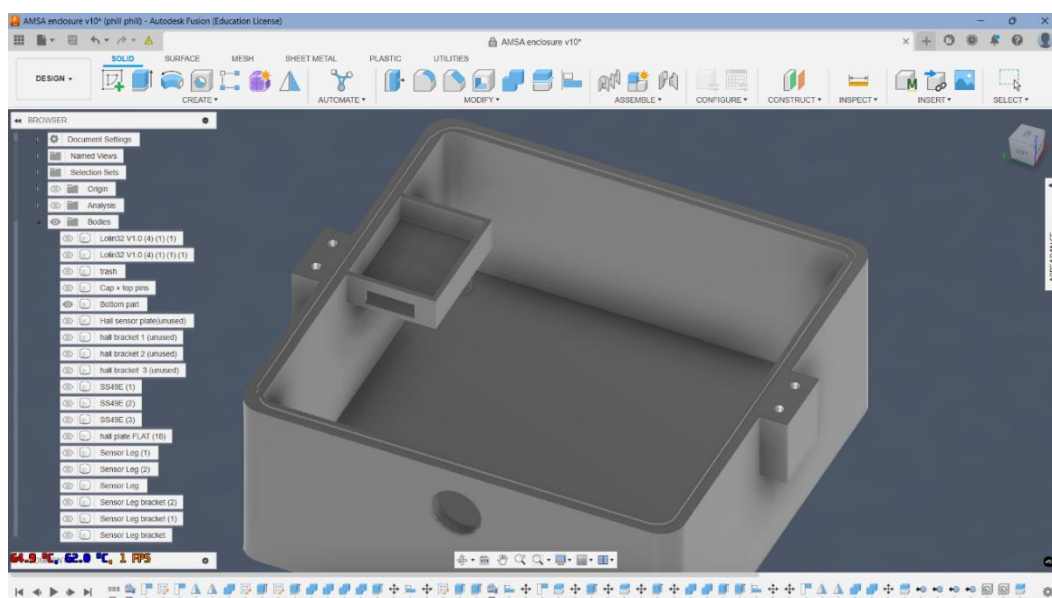
Η δεύτερη έκδοση αποσκοπεί στη διόρθωση των αδυναμιών που εντοπίστηκαν στην προηγούμενη έκδοχή, ενσωματώνοντας παράλληλα ορισμένα επιπλέον στοιχεία που κρίνονται απαραίτητα για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού.

- **Βελτιωμένα Bosses:** Η μορφολογία των bosses άλλαξε έτσι ώστε η πλακέτα να στερεώνεται πλέον πάνω στα bosses με καινούργια διάμετρο 5,6mm και ύψος 15,6mm και διάμετρο τρύπας 3,4mm. Θα βιδώνουν με M3 βίδες σε heated inserts.

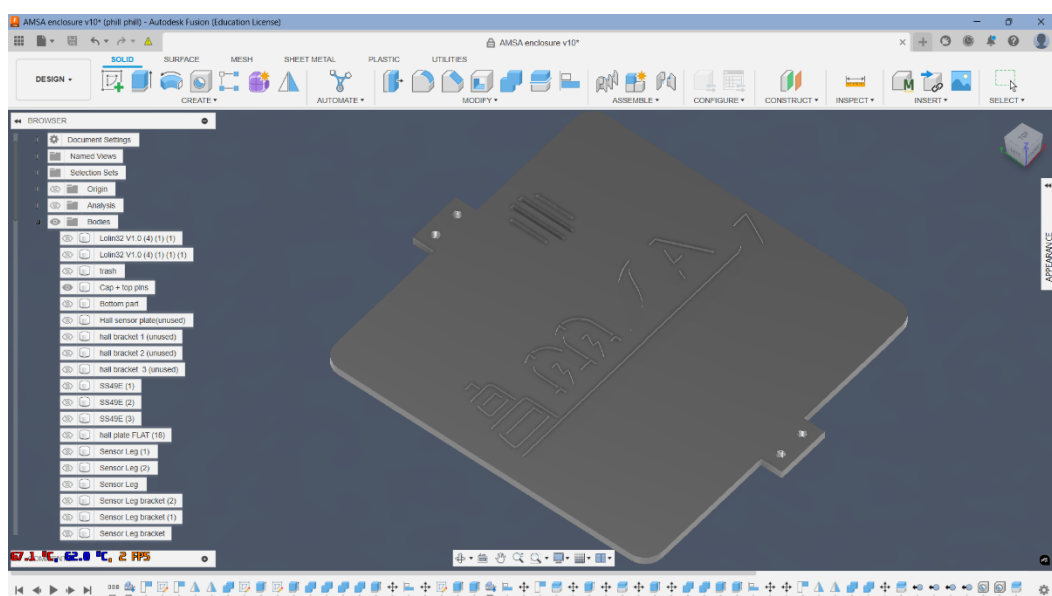


Εικόνα 4.1.3.α – Αναδιαμόρφωση bosses στήριξης

- **Βελτιωμένο εξωτερικό περίβλημα και καπάκι:** Καθώς η ασφάλιση του περιβλήματος δεν βασίζεται πλέον στις εσωτερικές προεξοχές στήριξης (bosses), το εξωτερικό κέλυφος επανασχεδιάστηκε ώστε να επιτρέπει την ασφαλή συγκράτηση μέσω δύο μεταλλικών ένθετων θερμικής τοποθέτησης (heated inserts) για βίδες M3, τα οποία ενσωματώνονται σε δύο πλευρικές προεξοχές διαστάσεων  $20 \times 20 \times 8\text{mm}$ . Αντίστοιχα, το καπάκι διαμορφώθηκε με πρόσθετες εξωτερικές προεξοχές και κατάλληλες οπές, ώστε να επιτρέπει τη στερέωσή του επάνω στο κύριο σώμα με χρήση των ίδιων βιδών, προσφέροντας σταθερότητα και δυνατότητα επανατοποθέτησης.

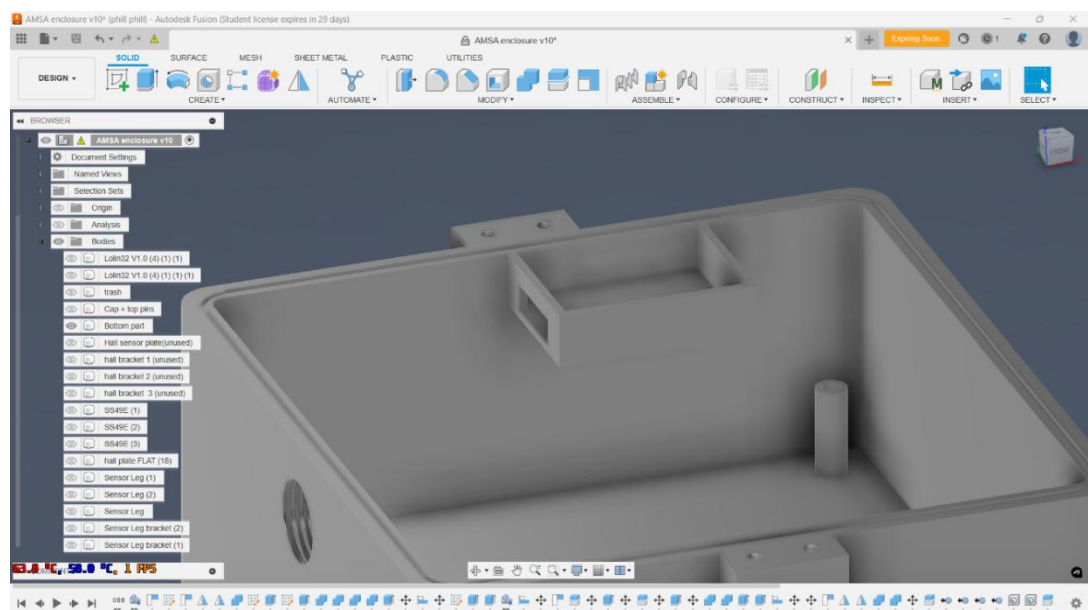


Εικόνα 4.1.3.β – Νέα μορφολογία με βελτιωμένο περίβλημα



Εικόνα 4.1.3.γ– Αναδιαμόρφωση καπακιού

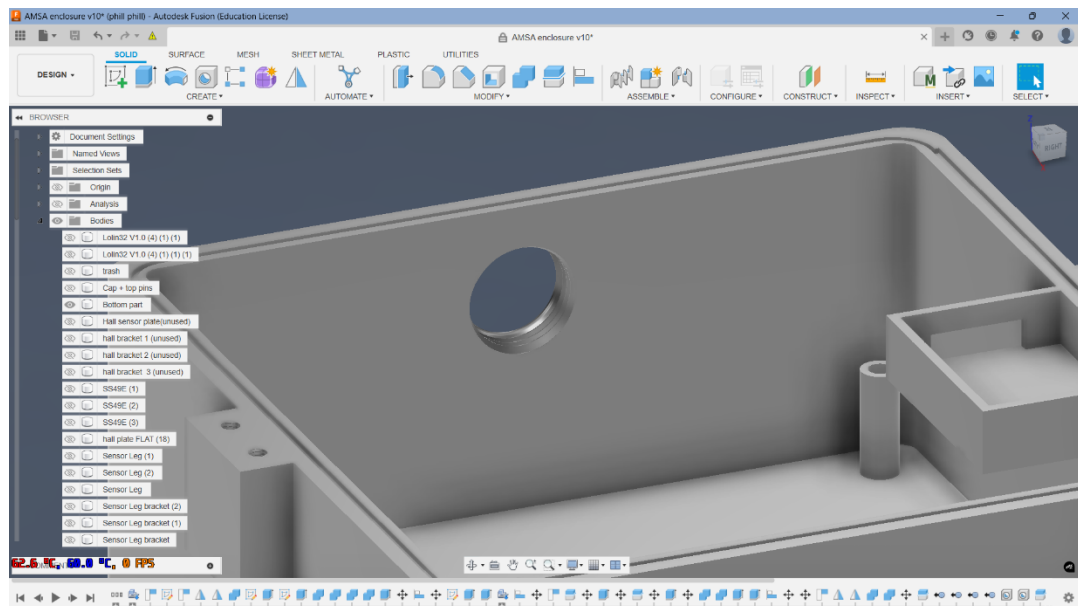
- Cutout Αισθητήρα Θερμοκρασίας:** Στο μπροστινό πλαϊνό τοίχωμα σχεδιάστηκε παραλληλόγραμμη θυρίδα διαστάσεων 32×24×8mm, η οποία επιτρέπει την εφαρμοστή τοποθέτηση του αντίστοιχου εξαρτήματος, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και προστασία από τυχόν κραδασμούς κατά τη λειτουργία. Επιπλέον, στην αριστερή πλευρά του περιβλήματος διαμορφώθηκε εγκοπή διαστάσεων 14,16×4,6mm, η οποία προορίζεται για τη διέλευση των καλωδίων του αισθητήρα, διατηρώντας παράλληλα τη μηχανική ακεραιότητα του κελύφους. Για τη διευκόλυνση των ατμοσφαιρικών μετρήσεων, στο καπάκι του περιβλήματος έχουν σχεδιαστεί κατάλληλες εγκοπές ακριβώς πάνω από τη θέση του αισθητήρα, ώστε να διασφαλίζεται η ορθή λειτουργία και η ακριβής καταγραφή των περιβαλλοντικών παραμέτρων.



Εικόνα 4.1.3.δ – Υλοποίηση cutout αισθητήρα υγρασίας

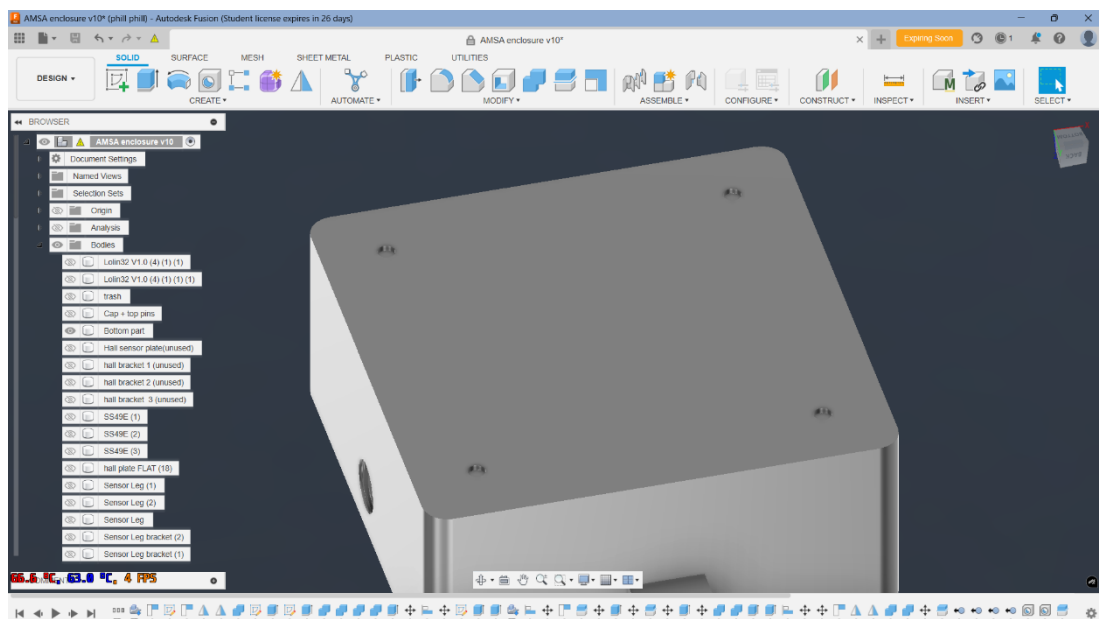
- Cutout Αισθητήρα AMR:** Για λόγους απλότητας, δεν σχεδιάστηκε το συγκεκριμένο cutout.

- **Δίοδος Καλωδίων:** Σχεδιάστηκε μία κυκλική δίοδος διαμέτρου 50mm στο αριστερό πλαϊνό τοίχωμα για στυπιοθλίπτη έτσι ώστε η δίοδος των καλωδίων να είναι στεγανή.



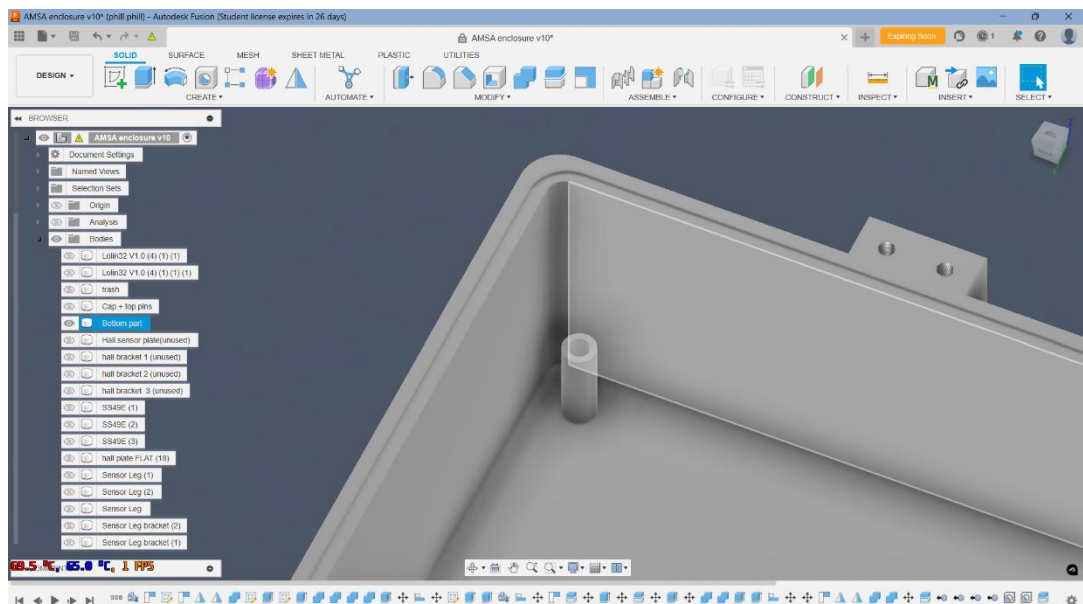
Εικόνα 4.1.3.ε– Υλοποίηση δόδου καλωδίων

- **Μαγνητικά στηρίγματα:** Στο κάτω μέρος του περιβλήματος σχεδιάστηκαν τέσσερις κυλινδρικές εγκοπές διαμέτρου περίπου 4,5 mm, προοριζόμενες για την τοποθέτηση μόνιμων μαγνητών. Η διάταξη αυτή επιτρέπει στη συσκευή να προσκολλάται με ασφάλεια σε μεταλλικές επιφάνειες, διευκολύνοντας τη σταθερή τοποθέτησή της κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



Εικόνα 4.1.3.στ – Υλοποίηση μαγνητικών εγκοπών

- **Κανάλι ελαστικής φλάντζας:** Περιμετρικά του άνω άκρου του εξωτερικού τοιχώματος της συσκευής έχει διαμορφωθεί ειδικό κανάλι διαστάσεων  $1,2 \times 0,75 \text{ mm}$ , το οποίο προορίζεται για την τοποθέτηση ελαστικής φλάντζας πάχους  $1 \text{ mm}$ . Η διάταξη αυτή στοχεύει στην επίτευξη αδιαβροχοποίησης στο σημείο επαφής μεταξύ του κυρίως περιβλήματος και του καπακιού. Η στεγανότητα επιτυγχάνεται μέσω της πίεσης που ασκεί το καπάκι κατά τη συναρμολόγηση, η οποία προκαλεί ελεγχόμενη συμπίεση και διόγκωση της φλάντζας, φράσσοντας αποτελεσματικά πιθανά σημεία εισχώρησης υγρασίας.



Εικόνα 4.1.3.ζ – Υλοποίηση φλάντζας

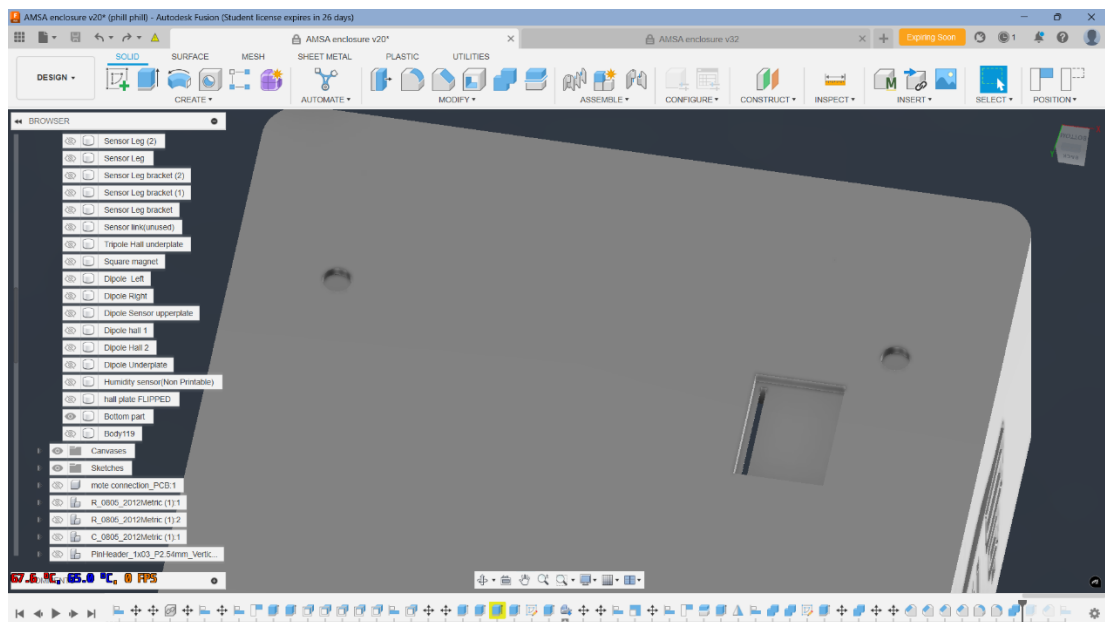
## **Παρατηρήσεις από την Έκδοση 2:**

Οι τροποποιήσεις στη μορφολογία του περιβλήματος κρίθηκαν επιτυχείς, καθώς συνέβαλαν στη βελτίωση της διαδικασίας στερέωσης της πλακέτας και στην αποτελεσματικότερη ασφάλιση του καπακιού μέσω της χρήσης βιδών M3. Παράλληλα, η ενσωμάτωση ελαστικής φλάντζας στο κανάλι περιμετρικά του σώματος του περιβλήματος εξασφάλισε ικανοποιητική αδιαβροχοποίηση στο σημείο επαφής με το καπάκι. Ο αισθητήρας ατμοσφαιρικών μετρήσεων τοποθετήθηκε με ακρίβεια στην ειδικά σχεδιασμένη προεξοχή, όπου και στερεώθηκε με ασφάλεια, εξασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία του. Αναφορικά με τα μαγνητικά στηρίγματα στη βάση του περιβλήματος, παρότι η λειτουργία τους ήταν επαρκής, διαπιστώθηκε ότι απαιτείται αύξηση των διαστάσεών τους προκειμένου να φιλοξενηθούν ισχυρότεροι μαγνήτες σε επόμενη έκδοση. Γενικά, στην Έκδοση 2 δεν εντοπίστηκαν κρίσιμα ζητήματα που να απαιτούν ριζικές σχεδιαστικές αλλαγές. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε η συνέχιση της διαδικασίας ανάπτυξης με επίκεντρο την υλοποίηση των υπολοίπων βασικών στοιχείων του συστήματος.

#### 4.1.4 Έκδοση 3: Προσαρμογές νέων παραμέτρων και ενσωμάτωση επιπλέον στοιχείων.

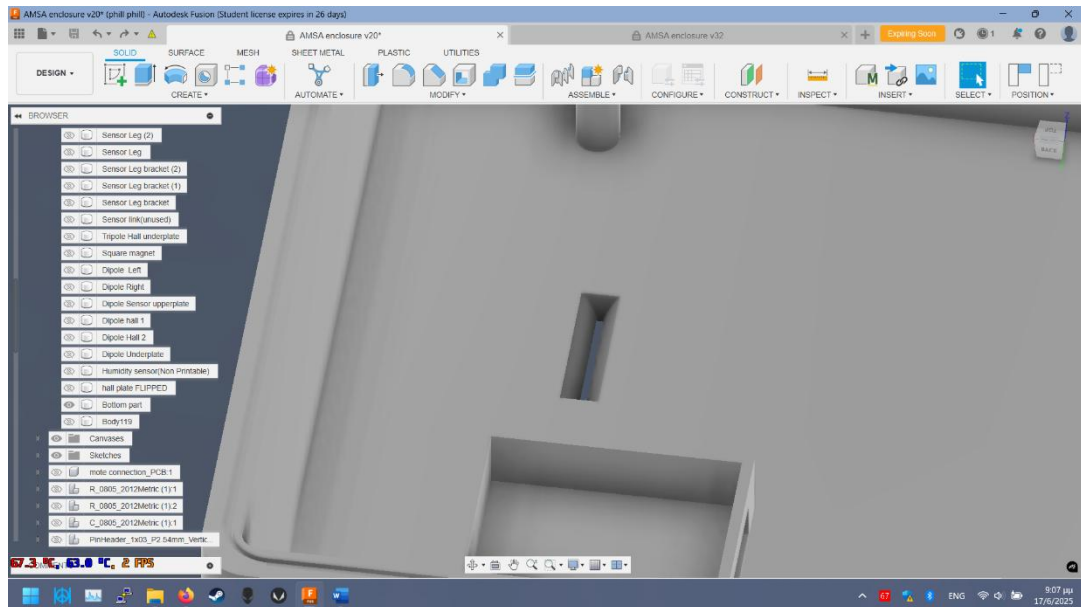
Η τρίτη εκδοχή του περιβλήματος εισάγει σειρά σημαντικών τροποποιήσεων, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργικότητας και την προσαρμογή του σχεδίου στις νέες απαιτήσεις του ηλεκτρονικού συστήματος. Οι βασικές παρεμβάσεις περιλαμβάνουν:

- **Υλοποίηση cutout για αισθητήρα AMR:** Ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου ανοίγματος (cutout) πραγματοποιήθηκε με στόχο τη σταθερή και ακριβή τοποθέτηση του αισθητήρα AMR στο κάτω μέρος του περιβλήματος, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων εξαρτημάτων ή βοηθητικών υλικών. Η διαμόρφωση του περιλαμβάνει και εσωτερική εγκοπή για τη διέλευση των καλωδίων, επιτρέποντας την απευθείας όδευσή τους προς την κάτω πλευρά της πλακέτας, έτοιμα για σύνδεση. Η εν λόγω προσέγγιση διασφαλίζει τόσο τη μηχανική σταθερότητα του αισθητήρα όσο και την απαραίτητη στεγανότητα στην περιοχή εγκατάστασής του, καλύπτοντας πλήρως τις απαιτήσεις προστασίας από υγρασία και κραδασμούς.



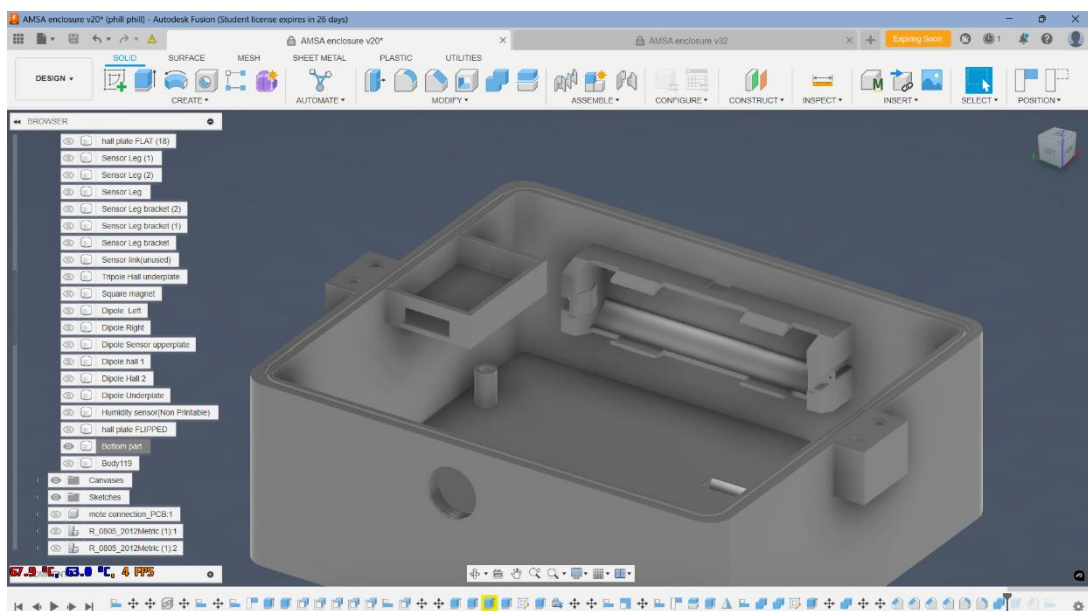
Εικόνα 4.1.4.α – Υλοποίηση cutout AMR κάτω μέρος





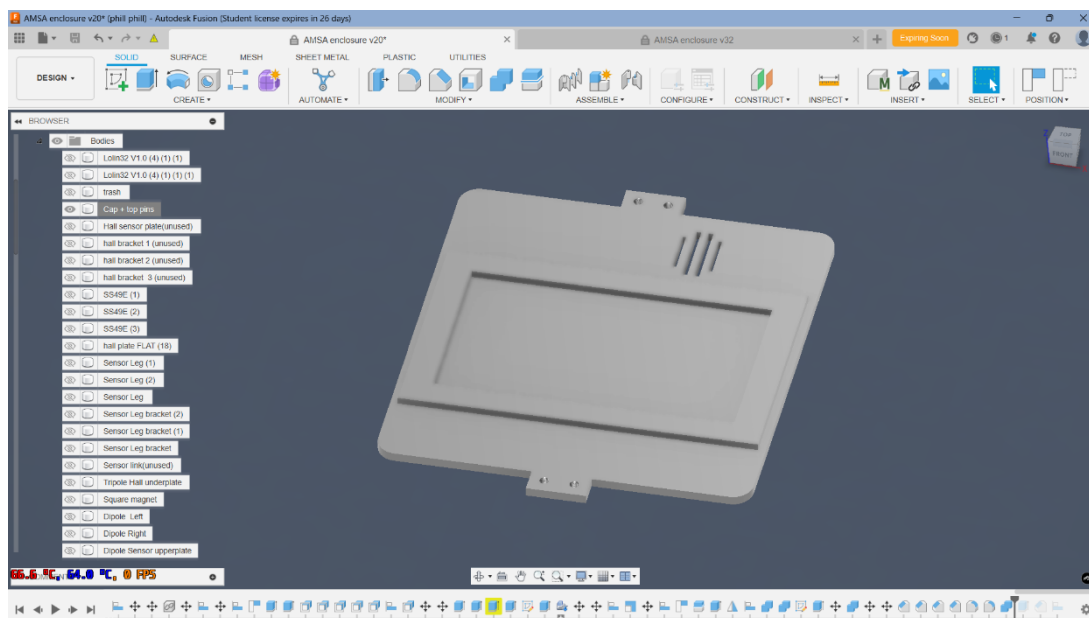
Εικόνα 4.1.4.β – Υλοποίηση cutout AMR πάνω μέρος, για διέλευση καλωδίων αισθητήρα

- **Διόρθωση διαστάσεων περιβλήματος και καπακιού:** Το κύριο σώμα και το καπάκι του περιβλήματος επανασχεδιάστηκαν ώστε να συμβαδίζουν με τις τροποποιημένες διαστάσεις της νέας πλακέτας, λαμβάνοντας υπόψη τις αυξημένες απαιτήσεις χώρου για επιπλέον κυκλώματα και συνδέσεις. Νέες διαστάσεις κουτιού ~125x142x51mm και πάχος τοιχώματος 5mm
- **Τοποθέτηση βάσης (mount) για μπαταρία 18650:** Η υποδοχή της μπαταρίας τοποθετήθηκε σε σημείο που διασφαλίζει την αποφυγή επαφής με αισθητήρες και καλώδια, διευκολύνοντας την τοποθέτηση και συντήρηση της μπαταρίας.



Εικόνα 4.1.4.γ – Κύριο μέρος συσκευασίας με την βάση μπαταρίας τοποθετημένη

- **Εσοχές για φωτοβολταϊκά στο καπάκι:** Στην άνω επιφάνεια του καπακιού ενσωματώθηκαν εσοχές με εξωτερικές διαστάσεις 120x80x2.5mm και εσωτερικές 100x60x2.5mm, σχεδιασμένες ώστε να επιτρέπουν την εφαρμογή και σταθερή συγκράτηση μικρών φωτοβολταϊκών στοιχείων, τα οποία θα χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση της ενσωματωμένης μπαταρίας.



*Εικόνα 4.1.4.δ – Αναδιαμόρφωση καπακιού για στέγαση φωτοβολταϊκών*

### Παρατηρήσεις από την Έκδοση 3:

Οι τροποποιήσεις που υλοποιήθηκαν στην τρίτη έκδοση κρίθηκαν ουσιώδεις για την προσαρμογή του σχεδίου στις αναθεωρημένες απαιτήσεις του συστήματος. Η ενσωμάτωση του ανοίγματος (cutout) για τον αισθητήρα τύπου AMR παρείχε επαρκή μηχανική σταθερότητα, ωστόσο, λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας του αισθητήρα και της θέσης των εξαρτημάτων στην πλακέτα (όπως πυκνωτές και αντιστάσεις), διαπιστώθηκε ότι απαιτείται ανασχεδίαση του εν λόγω cutout. Συγκεκριμένα, κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη μικρής κλίσης στο σημείο τοποθέτησης, προκειμένου η επιφάνεια μέτρησης του αισθητήρα να μπορεί να έρθει σε πλήρη επαφή με το αντίστοιχο εξωτερικό σημείο, χωρίς εμπλοκές ή παρεμβολές.

Παράλληλα, στο εσωτερικό μέρος του πυθμένα του περιβλήματος, η υπάρχουσα εγκοπή διέλευσης καλωδίων του αισθητήρα AMR θα πρέπει να επανασχεδιαστεί ώστε να επιτρέπει την ομαλότερη και ασφαλέστερη διάταξη των καλωδιώσεων.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι οι τρέχουσες θέσεις τοποθέτησης των μαγνητών στη βάση της συσκευής προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στη λειτουργία του αισθητήρα AMR. Ως εκ τούτου, απαιτείται αναθεώρηση τόσο της θέσης εγκατάστασης όσο και της μεθόδου ενσωμάτωσης των μαγνητικών στηριγμάτων, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα απόκλισης στις μετρήσεις.

Η αναθεώρηση των διαστάσεων του περιβλήματος συνέβαλε ουσιαστικά στη βελτίωση της εσωτερικής εργονομίας, επιτρέποντας την ασφαλή και σταθερή τοποθέτηση της μπαταρίας χωρίς να παρεμποδίζεται η δρομολόγηση των καλωδιώσεων ή άλλων κρίσιμων εξαρτημάτων. Σε μελλοντικό στάδιο προβλέπεται περαιτέρω βελτιστοποίηση των διαστάσεων με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης υλικού κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση του περιβλήματος, διατηρώντας παράλληλα την απαιτούμενη μηχανική αντοχή και λειτουργικότητα. Επιπλέον, το αρχικά προβλεπόμενο άνοιγμα για τον στυπιοθλίπτη κρίνεται πλέον μη απαραίτητο και σχεδιάζεται να αντικατασταθεί από υποδοχή κατάλληλη για σύνδεση κεραίας τύπου RP-SMA, ώστε να εξυπηρετεί τη νέα διαμόρφωση του συστήματος επικοινωνίας. Τέλος, οι διαμορφωμένες εσοχές για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων στο καπάκι προετοιμάζουν το σύστημα για μελλοντική ενεργειακή αυτονομία, χωρίς να υποβαθμίζουν τη μηχανική αντοχή ή την προστασία της συσκευής.

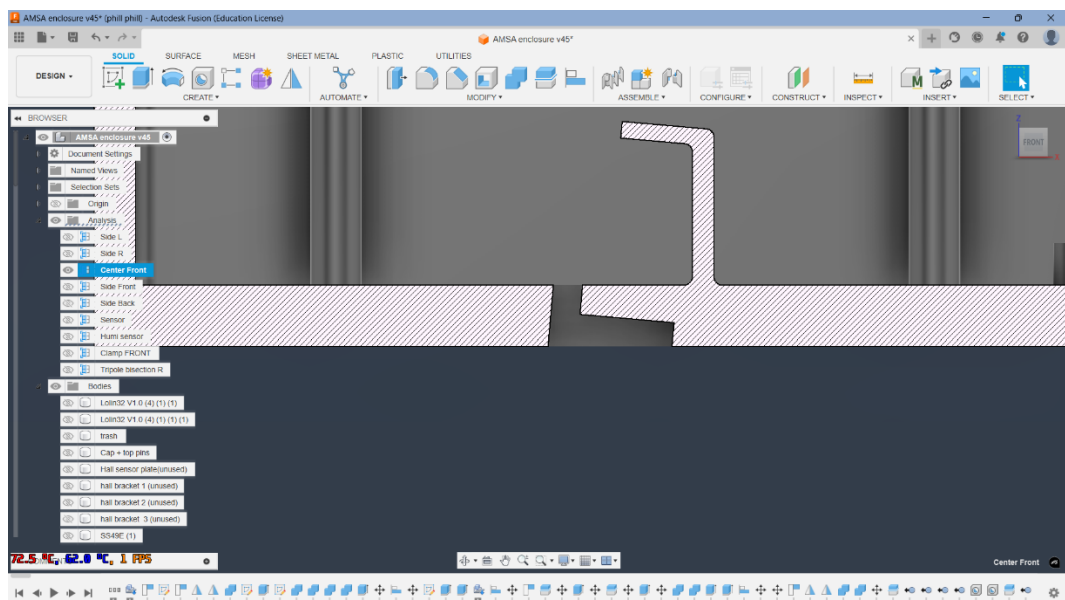
Οι παραπάνω διαπιστώσεις αποτελούν τη βάση για την επόμενη φάση σχεδίασης, η οποία θα επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση των επιμέρους στοιχείων, με έμφαση στην λειτουργικότητα, την ακρίβεια μέτρησης και τη δομική αξιοπιστία.

#### 4.1.5 Έκδοση 4: Βελτιστοποίηση μορφολογίας και λειτουργικότητας

Η τέταρτη έκδοση του περιβλήματος επικεντρώνεται στην επίλυση των θεμάτων που διαπιστώθηκαν κατά την αξιολόγηση της προηγούμενης εκδοχής και εισάγει περαιτέρω βελτιστοποιήσεις στη λειτουργικότητα, την εργονομία και τη μηχανική απόδοση του σχεδίου. Οι κύριες σχεδιαστικές παρεμβάσεις που θα υλοποιηθούν περιλαμβάνουν:

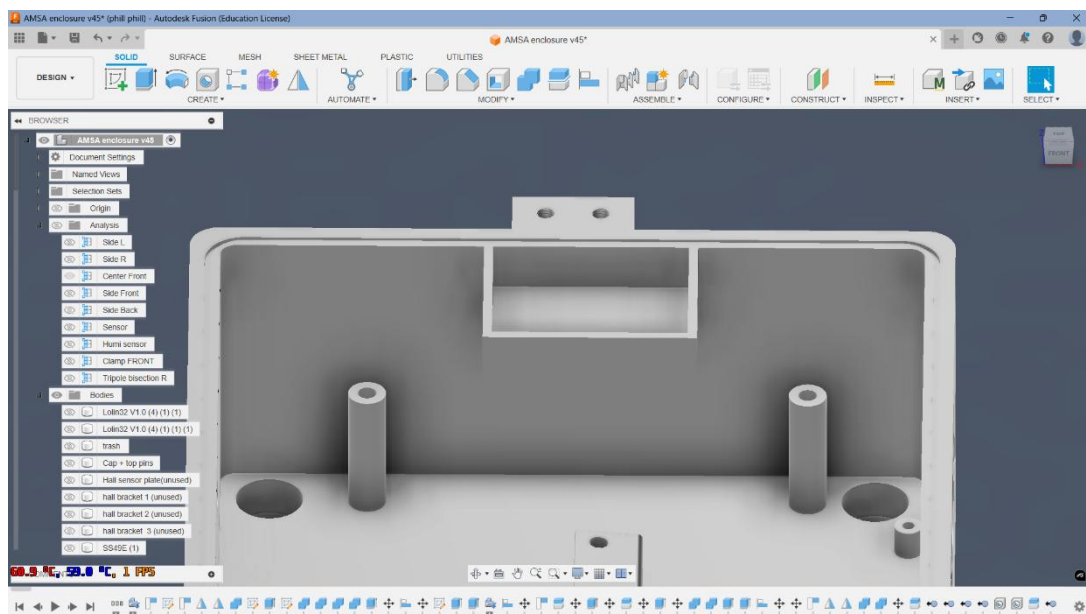
- **Ανασχεδιασμός του cutout για τον αισθητήρα AMR:**

Το άνοιγμα για τον αισθητήρα τύπου AMR θα τροποποιηθεί ώστε να ενσωματώνει κατάλληλη κλίση 5 μοιρών, επιτρέποντας στην επιφάνεια μέτρησης του αισθητήρα να έρχεται σε άμεση και ανεμπόδιστη επαφή με το εξωτερικό σημείο μετρήσεως. Η νέα γεωμετρία θα λαμβάνει υπόψη τη θέση εξαρτημάτων της πλακέτας όπως πυκνωτές και αντιστάσεις, εξασφαλίζοντας ομαλή ενσωμάτωση χωρίς μηχανικές παρεμβολές. Επιπλέον, η εγκοπή για τη διέλευση των καλωδίων του αισθητήρα AMR ανασχεδιάστηκε, με στόχο τη βελτίωση της ευθυγράμμισης και της ομαλής όδυσής τους προς το κύριο εσωτερικό τμήμα του περιβλήματος. Η νέα διαμόρφωση εξασφαλίζει μειωμένη μηχανική καταπόνηση των αγωγών και ευκολότερη συναρμολόγηση, συμβάλλοντας στη συνολική αξιοπιστία του συστήματος.



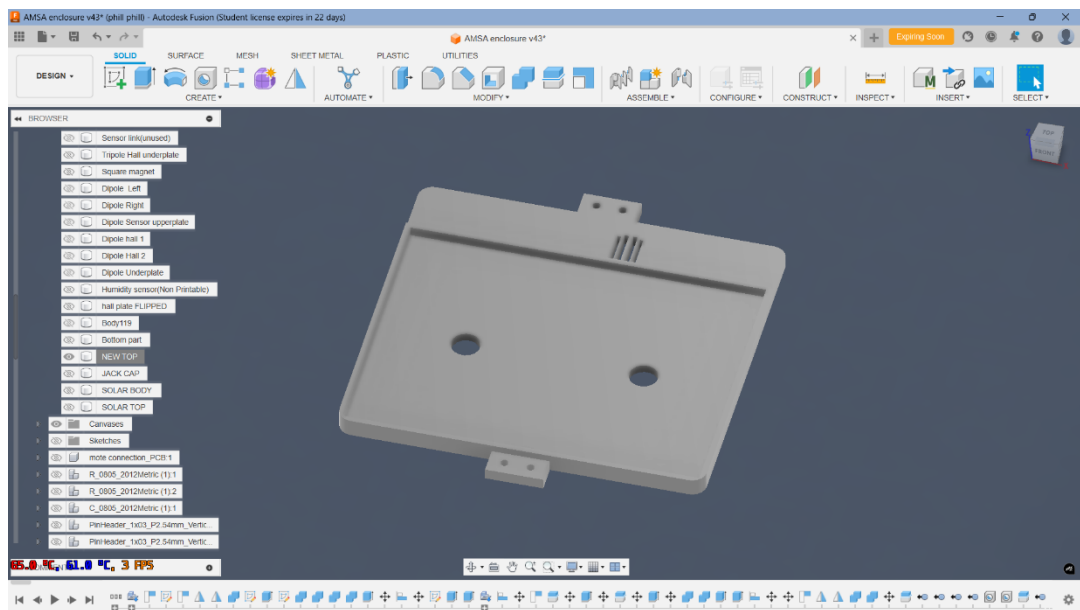
Εικόνα 4.1.5.α – Διατομή συσκευασίας που δείχνει την αναδιαμόρφωση του cutout του AMR με κλίση 5 μοιρών

- **Βελτιστοποίηση διαστάσεων συσκευασίας:** Οι διαστάσεις του περιβλήματος αναθεωρήθηκαν με στόχο τη μείωση του όγκου και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης υλικού κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση, διατηρώντας παράλληλα τη λειτουργικότητα και τη δομική σταθερότητα της κατασκευής. Συγκεκριμένα, οι διαστάσεις μεταβλήθηκαν από 142×125×51mm στην προηγούμενη έκδοση σε 117×125×52mm στη νέα έκδοχή. Η μεταβολή αυτή συνεπάγεται μείωση κατά 17,6 % στον κάθετο άξονα (μήκος), γεγονός που καθιστά τη συσκευή πιο συμπαγή και εργονομική, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη μείωση του χρόνου και του κόστους εκτύπωσης.
- **Επανατοποθέτηση cutout αισθητήρα ατμόσφαιρας:** Ο αισθητήρας επανατοποθετήθηκε σε νέα θέση πιο κοντά στο κέντρο, με στόχο την αποδοτικότερη διαχείριση των καλωδίων της συσκευασίας και την αποφυγή παρεμβολών κατά την τοποθέτηση και σύνδεση άλλων κρίσιμων εξαρτημάτων στο εσωτερικό του περιβλήματος. Η νέα διάταξη συμβάλλει στη βελτιωμένη εργονομία και στην ευκολότερη συναρμολόγηση του συστήματος.



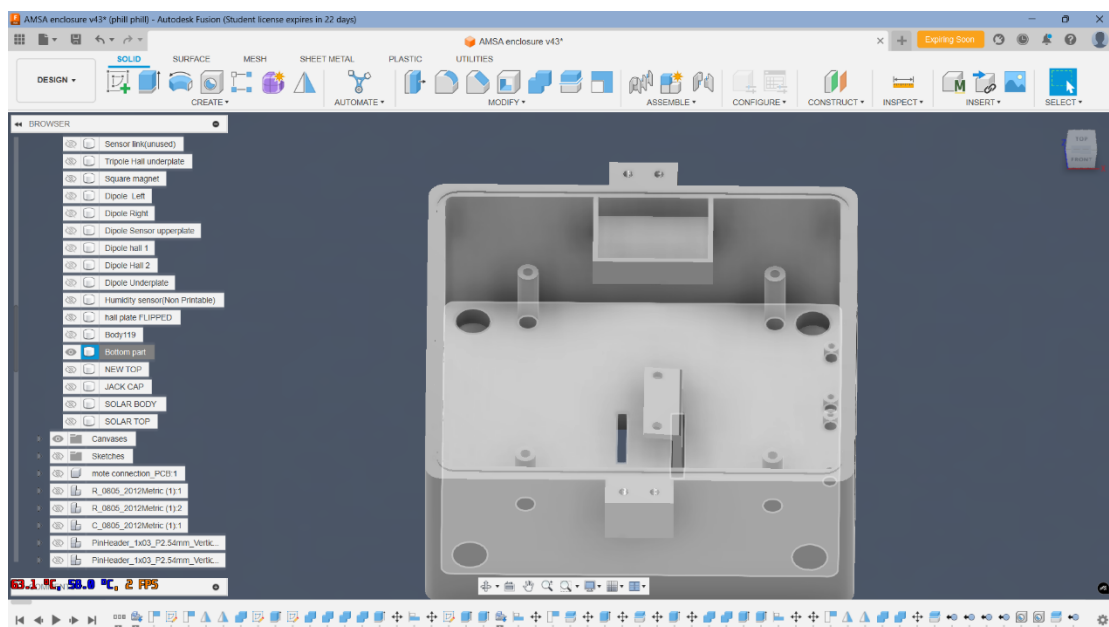
*Εικόνα 4.1.5.β – Επανατοποθέτηση προεξοχής αισθητήρα υγρασίας*

- **Καπάκι και εσοχές φωτοβολταϊκών:** Το επάνω μέρος του καπακιού, όπου βρίσκονται οι εσοχές για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ, βελτιστοποιήθηκε με στόχο την αποδοτικότερη και ταχύτερη τρισδιάστατη εκτύπωση. Παράλληλα, αναδιαμορφώθηκαν οι εγκοπές ώστε να ευθυγραμμίζονται με τη νέα θέση του αισθητήρα ατμόσφαιρας, εξασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία του. Επιπλέον, προστέθηκαν νέες οπές για τη διέλευση των καλωδίων των φωτοβολταϊκών στοιχείων προς το εσωτερικό της συσκευής, διευκολύνοντας τη σύνδεση με το κύκλωμα φόρτισης.



Εικόνα 4.1.5.γ – Αναδιαμόρφωση μορφοποίησης καπακιού και πρόσθεση εσοχών για καλώδια φωτοβολταϊκών

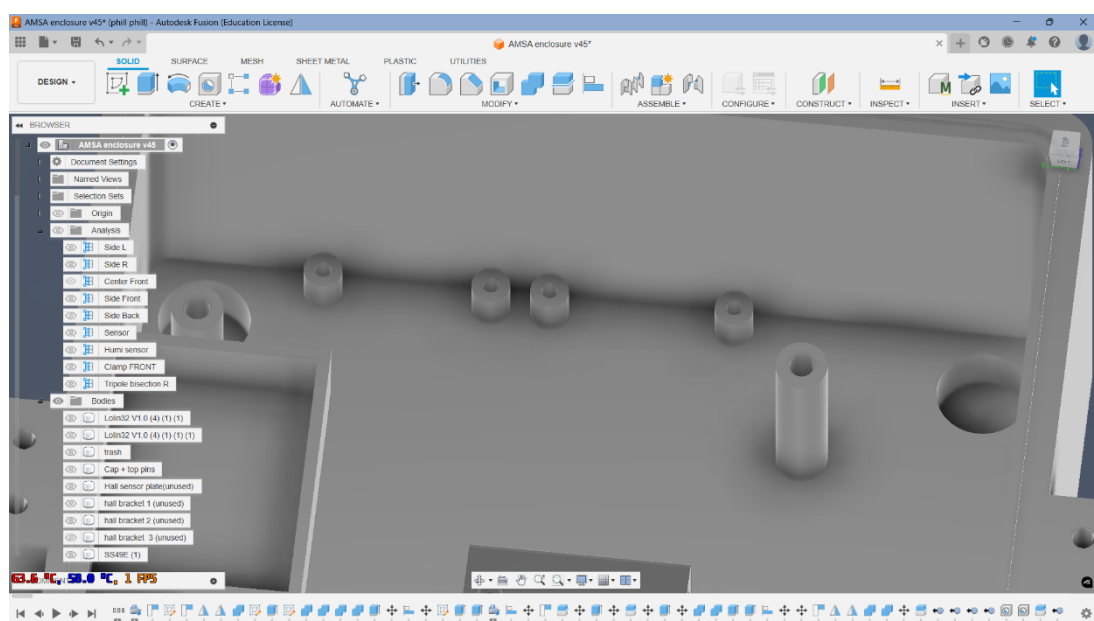
- Νέα μορφολογία μαγνητών:** Στο πλαίσιο της τέταρτης έκδοσης του περιβλήματος, πραγματοποιήθηκε συνολική αναθεώρηση της μεθόδου ενσωμάτωσης των μαγνητών, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργικότητας και την εξάλειψη των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στον αισθητήρα AMR. Συγκεκριμένα, η αρχική προσέγγιση που βασιζόταν σε εξωτερική τοποθέτηση των μαγνητών αντικαταστάθηκε από μια νέα υλοποίηση με εσωτερικές εγκοπές στο κάτω μέρος του περιβλήματος. Οι νέες κυλινδρικές υποδοχές για τους μαγνήτες έχουν διάμετρο 11mm και βάθος 6,7mm, ενώ βρίσκονται σε απόσταση 0,65mm από την εξωτερική επιφάνεια του κάτω μέρους του περιβλήματος. Η νέα αυτή διαμόρφωση επιτρέπει την πλήρη ενσωμάτωση των μαγνητών στο σώμα της συσκευής, προσφέροντας αυξημένη προστασία από μηχανικές φθορές και εξωτερικές επιδράσεις, χωρίς απώλεια της απαιτούμενης μαγνητικής πρόσφυσης. Η αλλαγή αυτή ενισχύει τόσο την αισθητική όσο και τη δομική αντοχή της κατασκευής, εξασφαλίζοντας παράλληλα πιο ελεγχόμενη και ασφαλή μαγνητική στήριξη σε μεταλλικές επιφάνειες



Εικόνα 4.1.5.δ – Όψη από πάνω στην οποία φαίνεται η νέα μορφολογία για την στήριξη μέσω μαγνητών



- **Προσθήκη επιπλέον αισθητήρων:** Λόγω των νέων απαιτήσεων του συστήματος, κρίθηκε απαραίτητη η ενσωμάτωση δύο αισθητήρων **ICM-20948** και ενός **LSM303DLHC** στο εσωτερικό του περιβλήματος. Οι δύο αισθητήρες ICM-20948 τοποθετήθηκαν στο δεξιό άκρο της συσκευασίας, σε χαμηλότερο επίπεδο από την κύρια πλακέτα, σε θέση που δεν παρεμβάλλεται με άλλα λειτουργικά στοιχεία. Η στήριξη των επιμέρους πλακετών θα πραγματοποιηθεί μέσω αποστατών, παρόμοιων με αυτών που χρησιμοποιούνται για την κύρια πλακέτα. Οι σχετικές προεξοχές στερέωσης διαθέτουν διάμετρο 4,6mm και ύψος 5mm, με κεντρική οπή διαμέτρου 2mm για την τοποθέτηση μεταλλικών ένθετων σπειρωμάτων (*heated inserts*) τύπου M2, στα οποία θα βιδώνονται οι πλακέτες των αισθητήρων. Για την ορθή λειτουργία του αισθητήρα **LSM303DLHC**, απαιτήθηκε ειδική διαμόρφωση στη βάση στήριξής του. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε ανυψωμένη πλατφόρμα τύπου “εξέδρας”, διαστάσεων  $\sim 17,7 \times 26,3 \times 2,6$ mm, η οποία περιλαμβάνει επιπλέον προεξοχή διαστάσεων  $\sim 26,3 \times 11,2 \times 2$ mm, δύο διαμπερείς οπές μεγέθους  $9,4 \times 2$ mm, καθώς και κλίση  $5^\circ$  ως προς τον οριζόντιο άξονα. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει ότι ο αισθητήρας διατηρεί το ίδιο προσανατολισμό με τον παρόμοιο αισθητήρα τύπου AMR που βρίσκεται στη βάση της συσκευής, αλλά σε ύψος αυξημένο κατά 22mm, όπως απαιτείται για τη σωστή του λειτουργία εντός του συστήματος.



Εικόνα 4.1.5.ε– Υλοποίηση τεσσάρων bosses για την στήριξη των αισθητήρων ICM-20948





#### **Παρατηρήσεις από την Έκδοση 4:**

Η τέταρτη έκδοση του περιβλήματος σηματοδότησε μία σημαντική φάση ωρίμανσης του σχεδιασμού, ενσωματώνοντας κρίσιμες βελτιώσεις στη μορφολογία, την εργονομία και τη λειτουργικότητα της συσκευής. Ο ανασχεδιασμός του cutout για τον αισθητήρα τύπου AMR, με ενσωματωμένη κλίση 5°, προσέφερε ακριβέστερη ευθυγράμμιση του αισθητήρα με το σημείο μέτρησης, εξαλείφοντας μηχανικές παρεμβολές από παρακείμενα εξαρτήματα. Η ανανεωμένη διαδρομή διέλευσης των καλωδίων του αισθητήρα συνέβαλε στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της συναρμολόγησης.

Η μείωση των διαστάσεων του περιβλήματος, κυρίως στον κάθετο άξονα, προσέφερε σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά την εξοικονόμηση υλικού και την ενίσχυση της συμπαγούς μορφής της συσκευής, χωρίς να επηρεάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά αντοχής και λειτουργικότητας. Παράλληλα, η επανατοποθέτηση του αισθητήρα ατμοσφαιρικών μετρήσεων πιο κοντά στο κέντρο του περιβλήματος διευκόλυνε την καλωδίωση και ελαχιστοποίησε τον κίνδυνο παρεμβολών από άλλα εσωτερικά στοιχεία.

Το καπάκι ανασχεδιάστηκε με στόχο την καλύτερη ευθυγράμμιση των εσοχών με τη νέα θέση του αισθητήρα και βελτιστοποιήθηκε για πιο αποτελεσματική τρισδιάστατη εκτύπωση. Η προσθήκη οπών διέλευσης για τα καλώδια των φωτοβολταϊκών συμβάλλει στον προγραμματισμό μελλοντικής ενεργειακής αυτονομίας του συστήματος.

Η υλοποίηση εσωτερικών κυλινδρικών υποδοχών για τους μαγνήτες, αντί της προηγούμενης εξωτερικής τοποθέτησης, επέλυσε πλήρως τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών με τον αισθητήρα AMR και βελτίωσε την ανθεκτικότητα και την αισθητική της κατασκευής.

Η προσθήκη δύο επιπλέον αισθητήρων ICM-20948 και ενός LSM303DLHC οδήγησε σε ειδική σχεδίαση νέων σημείων στήριξης και πλατφόρμας ανύψωσης. Ιδιαίτερη πρόβλεψη έγινε για τη γεωμετρία και την κλίση τοποθέτησης του LSM303DLHC, ώστε να εξασφαλίζεται ίδια κατεύθυνση προσανατολισμού με τον αισθητήρα AMR και συμβατότητα με τις λειτουργικές του απαιτήσεις.

Τέλος, η αναδιαμόρφωση του ανοίγματος του στυπιοθλίπτη και η προσθήκη νέου cutout για υποδοχή τύπου jack ενισχύουν τη διαλειτουργικότητα της συσκευής με εξωτερικές

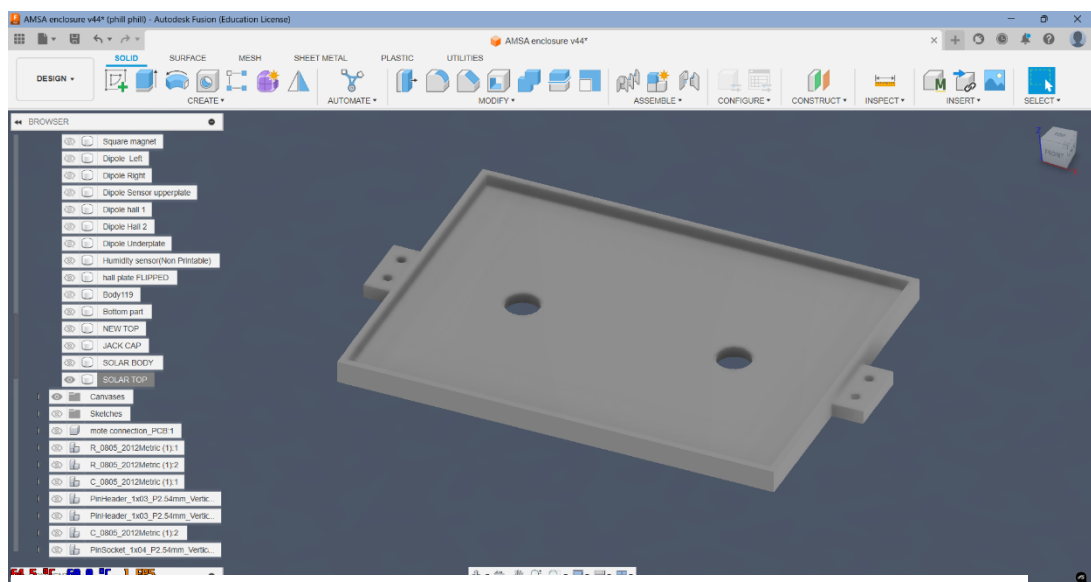
μονάδες, διευκολύνοντας τη σύνδεση με μελλοντικές ενεργειακές ή αισθητηριακές επεκτάσεις.

Συνολικά, η Έκδοση 4 πλησιάζει το τελικό στάδιο ωριμότητας του σχεδιασμού, έχοντας επιλύσει με επιτυχία τα κρίσιμα κατασκευαστικά και λειτουργικά ζητήματα της συσκευής. Κατόπιν δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη έκδοση, διαπιστώθηκε ότι η μηχανική κατασκευή πληροί τις απαιτήσεις του συστήματος, με μόνη εξαίρεση την παράμετρο της ενεργειακής αυτονομίας. Για τον λόγο αυτό, στην επόμενη και πιθανώς τελική έκδοση προβλέπεται η υλοποίηση εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών, με στόχο την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συστήματος.

#### 4.1.6 Έκδοση 5(Τελική: Υλοποίηση εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών

Με στόχο την επίτευξη πλήρους ενεργειακής αυτονομίας του συστήματος, η τελευταία φάση του σχεδιασμού επικεντρώνεται στην ανάπτυξη εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η τοποθέτηση και η λειτουργική ενσωμάτωση της φωτοβολταϊκής μονάδας με το υπόλοιπο σύστημα. Η υλοποίηση αυτή έχει τα εξής στοιχεία:

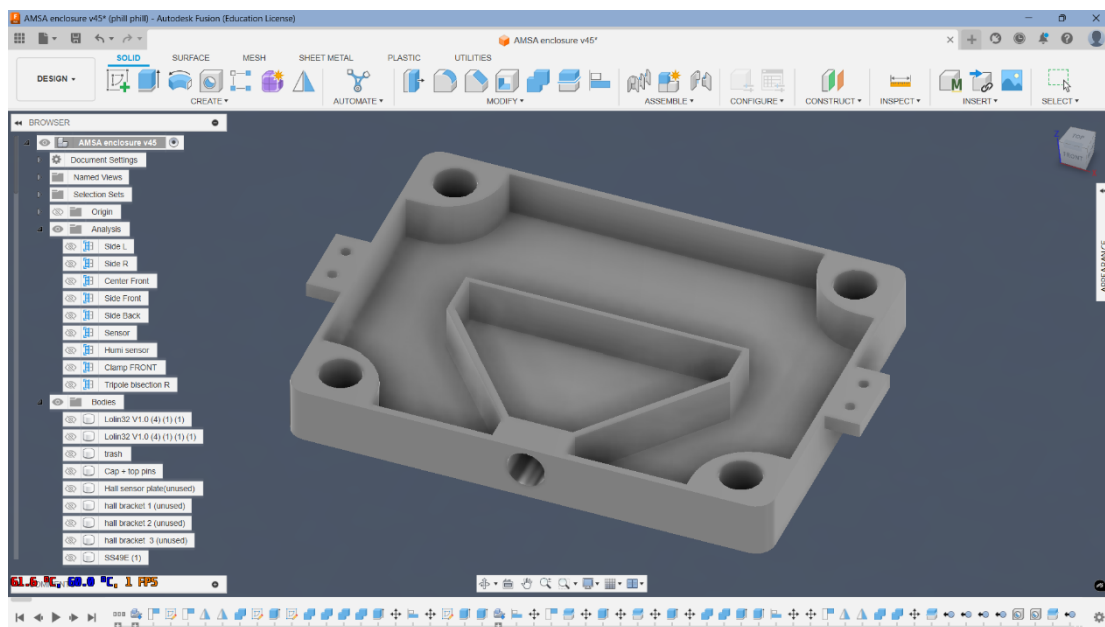
- **Καπάκι στέγασης φωτοβολταϊκών:** Δεδομένου ότι είχε προηγηθεί η σχεδίαση και υλοποίηση του τρόπου στήριξης και προστασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, το νέο καπάκι σχεδιάστηκε ως βάση για την εξωτερική μονάδα. Η διαδικασία ξεκίνησε με την αντιγραφή της γεωμετρίας του καπακιού της κύριας συσκευής, από το οποίο αφαιρέθηκε το τμήμα που περιλάμβανε τις εγκοπές για τον αισθητήρα ατμοσφαιρικών μετρήσεων, προκειμένου να διαμορφωθεί μία καθαρή επιφάνεια για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών. Το τελικό καπάκι έχει διαστάσεις **126×96×6,5mm**, με **πάχος τοιχώματος 2mm** στο τμήμα που θα στεγάζει



Εικόνα 4.1.6.α – Καπάκι εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών

τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, εξασφαλίζοντας επαρκή μηχανική αντοχή και χαμηλό βάρος. Επιπλέον, σχεδιάστηκαν **δύο διαμπερείς οπές διαμέτρου 10mm**, τοποθετημένες στο κέντρο κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ, ώστε να διευκολύνεται η δίοδος των καλωδίων προς το κύριο σώμα της συσκευής και να διασφαλίζεται η ομαλή ηλεκτρική σύνδεση με το υπόλοιπο κύκλωμα.

- **Κύριο σώμα συσκευασίας φωτοβολταϊκών:** Το κύριο σώμα της εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών σχεδιάστηκε ως παραλληλεπίπεδο περίβλημα διαστάσεων **126 × 96 × 15mm**, με **πάχος τοιχωμάτων 2mm**, ώστε να ανταποκρίνεται στις αντίστοιχες διαστάσεις του καπακιού. Ο σχεδιασμός αυτός εξασφαλίζει συμπαγή γεωμετρία και επαρκή εσωτερικό χώρο για τη στέγαση των απαραίτητων στοιχείων.



Εικόνα 4.1.6.β – Κύριο σώμα εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών

Στο εσωτερικό του περιβλήματος διαμορφώθηκε τραπεζοειδής δομή, επίσης με πάχος τοιχώματος **2mm**, η οποία χρησιμεύει ως αγωγός και θήκη για τα καλώδια των φωτοβολταϊκών πάνελ. Η γεωμετρία αυτή κατευθύνει τα καλώδια προς διαμπερή οπή διαμέτρου **10mm** που βρίσκεται στην πρόσοψη του περιβλήματος, διευκολύνοντας την προσβασιμότητα και τη σύνδεση με το κύριο σύστημα μέσω του βύσματος τύπου **jack** που έχει ήδη περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο εσωτερικός σχεδιασμός του περιβλήματος περιορίζεται αποκλειστικά στην ενσωμάτωση της τραπεζοειδούς δομής, ενώ το υπόλοιπο εσωτερικό παραμένει κενό. Η επιλογή αυτή στοχεύει στη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας υλικού κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση, διατηρώντας παράλληλα την απαραίτητη δομική ακεραιότητα. Το αποτέλεσμα είναι μια πιο ελαφριά, οικονομική και ευκολότερη στην κατασκευή συσκευασία. Επιπλέον, για τη σταθερή πρόσφυση της μονάδας σε μεταλλικές επιφάνειες, υιοθετήθηκε η ίδια προσέγγιση με αυτήν της κύριας συσκευασίας. Συγκεκριμένα, στα τέσσερα άκρα του περιβλήματος έχουν προβλεφθεί υποδοχές διαστάσεων **11×14,35mm**, στις οποίες θα τοποθετηθούν μαγνήτες, οι οποίοι απέχουν κατά **0,65mm** από τη βάση του περιβλήματος, εξασφαλίζοντας ισχυρή και σταθερή μαγνητική σύνδεση.

- **Ασφάλιση καπακιού και κυρίως σώματος:** Για την ασφάλιση των δύο τμημάτων της συσκευασίας της φωτοβολταϊκής μονάδας, υιοθετήθηκε η ίδια μεθοδολογία που εφαρμόστηκε και στην κύρια συσκευή. Συγκεκριμένα, στις οριζόντιες πλευρές του καπακιού και του κυρίως σώματος έχουν προβλεφθεί προεξοχές, καθεμία εκ των οποίων φέρει δύο οπές διαμέτρου M3. Στις οπές αυτές τοποθετούνται μεταλλικά ένθετα σπειρώματα (heated inserts), τα οποία επιτρέπουν τη μηχανική σύσφιξη των δύο μερών με τη χρήση αντίστοιχων βιδών, εξασφαλίζοντας σταθερή και επαναλαμβανόμενη συναρμολόγηση.

## Παρατηρήσεις από την Έκδοση 5

Η πέμπτη και τελική έκδοση του σχεδιασμού εστιάζει στην υλοποίηση της εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών και στην πλήρη ενσωμάτωσή της στο υπάρχον σύστημα, με σκοπό την ενεργειακή του αυτονομία και τη βελτιστοποίηση της κατασκευής.

Η σχεδίαση του νέου καπακιού φωτοβολταϊκών βασίστηκε σε υπάρχουσα γεωμετρία, με κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να δημιουργηθεί επίπεδη και ομοιογενής επιφάνεια στήριξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι διαστάσεις του και το μικρό πάχος τοιχώματος εξασφαλίζουν μηχανική επάρκεια και χαμηλό βάρος. Οι οπές διέλευσης καλωδίων είναι ορθά ευθυγραμμισμένες και επιτρέπουν απρόσκοπτη πρόσβαση. Η ενσωμάτωση μαγνητικών υποδοχών στα άκρα της μονάδας εξασφαλίζει σταθερή πρόσφυση σε μεταλλικές επιφάνειες, ενώ η υιοθέτηση της ίδιας μεθόδου ασφάλισης (μέσω προεξοχών και ένθετων μεταλλικών σπειρωμάτων) με την κύρια συσκευή προσφέρει ομοιομορφία, συμβατότητα και αξιοπιστία κατά την επαναλαμβανόμενη συναρμολόγηση.

Συνολικά, η Έκδοση 5 ενσωματώνει όλα τα επιμέρους δομικά και λειτουργικά στοιχεία που προέκυψαν από την εξέλιξη του σχεδιασμού σε προηγούμενες φάσεις. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια αποδοτική, εργονομική και μηχανικά σταθερή εξωτερική μονάδα, πλήρως συμβατή με το υπόλοιπο σύστημα. Η συγκεκριμένη έκδοση καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις που τέθηκαν εξ αρχής, και το συνολικό σύστημα είναι πλέον έτοιμο για την τελική διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης και δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

## 5 Εκτύπωση Περιβλήματος και βελτιώσεις

### 5.0.1 Εργαλεία εκτύπωσης συσκευασίας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα εργαλεία και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την τρισδιάστατη εκτύπωση τόσο της τελικής έκδοσης της κύριας συσκευασίας όσο και της εξωτερικής μονάδας φωτοβολταϊκών. Η περιγραφή περιλαμβάνει τις βασικές παραμέτρους εκτύπωσης, τον τύπο του υλικού, καθώς και τον εξοπλισμό που αξιοποιείται για την κατασκευή των εξαρτημάτων, με στόχο τη διασφάλιση της μηχανικής αντοχής, της ακρίβειας και της λειτουργικότητας των τελικών πρωτοτύπων.

#### Εκτυπωτής 3D: Bambu Lab X1C

Ο Bambu Lab X1C είναι ένας επιτραπέζιος εκτυπωτής 3D που προσφέρει ισορροπία μεταξύ απόδοσης,, προηγμένων χαρακτηριστικών και αρκετά προσιτής τιμής για τις δυνατότητες που προσφέρει, καθιστώντας τον κατάλληλο τόσο για αρχάριους όσο και για έμπειρους χρήστες. Τα βασικά του χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:



*Εικόνα 5.0.1 – Εκτυπωτής Bambu Labs X1C με AMS  
Τροποποιήθηκε από [25]*

**Πολύχρωμη Εκτύπωση:** Εξοπλισμένος με το AMS (Automatic Material System), υποστηρίζει εκτύπωση με πολλαπλά χρώματα χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης αλλαγής νημάτων [14].

**Πλήρως Αυτόματη Βαθμονόμηση:** Η λειτουργία αυτόματης βαθμονόμησης εξαλείφει τις χειροκίνητες ρυθμίσεις και εξασφαλίζει σταθερή ποιότητα εκτύπωσης [14].

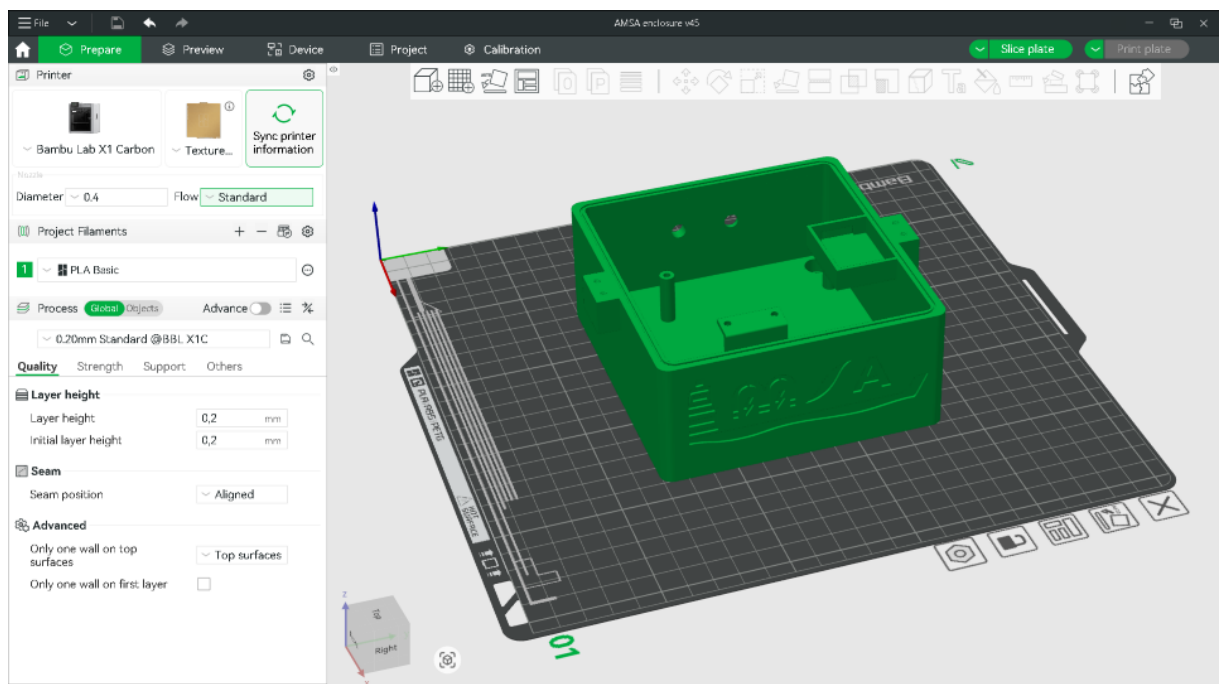
**Υψηλή Ταχύτητα με Ακρίβεια:** Με επιτάχυνση  $20.000\text{mm/s}^2$  και μέγιστη ταχύτητα εκτύπωσης  $500\text{mm/s}$ , προσφέρει ταχύτατη εκτύπωση χωρίς να θυσιάζει την ακρίβεια [14].

**Αθόρυβη Λειτουργία:** Λειτουργεί κάτω από 50dB σε σιωπηλή λειτουργία, καθιστώντας τον κατάλληλο για περιβάλλοντα με απαιτήσεις χαμηλού θορύβου [14].

**Αξιοπιστία:** Είναι γνωστός για την ποιοτική του κατασκευή και την αξιόπιστη απόδοση σε διάφορα εκτυπωτικά έργα [14].

### 5.0.2 Λογισμικό Slicing: Bambu Studio

Το Bambu Studio αποτελεί το επίσημο λογισμικό slicing της Bambu Lab για τους εκτυπωτές της, συμπεριλαμβανομένου του A1. Είναι λογισμικό ανοικτού κώδικα και διαθέτει πλήθος λειτουργιών, προσφέροντας άρτια εμπειρία εκτύπωσης. Τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:



Εικόνα 5.0.2 – Περιβάλλον εργασίας Bambu Studio



**Εργασίες με Βάση Έργα (Projects):** Υποστηρίζει διαχείριση έργων με συμβατότητα με αρχεία τύπου 3MF, καθώς και δυνατότητες όπως υποστήριξη πολλαπλών πλακών (multi-plate) και προβολή συναρμολογήσεων/εξαρτημάτων [15].

**Βελτιστοποιημένοι Αλγόριθμοι Τεμαχισμού:** Διαθέτει εξελιγμένους αλγόριθμους για εκτυπώσεις υψηλής ποιότητας, ακόμα και σε μεγάλες ταχύτητες [15].

**Φίλικό Περιβάλλον Χρήσης:** Παρέχει εύχρηστο γραφικό περιβάλλον κατάλληλο για χρήστες όλων των επιπέδων [15].

**Προηγμένα Χαρακτηριστικά:** Περιλαμβάνει δυνατότητες όπως Arch Move για ομαλή κίνηση κεφαλής, έξυπνες παραμέτρους ψύξης και πλήρη παρακολούθηση του νημάτων [15].

Μέσω της χρήσης του Bambu Studio, οι χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες του Bambu Lab A1, εξασφαλίζοντας μέγιστη ποιότητα και απόδοση στην εκτύπωση.

### 5.0.3 Υλικά Εκτύπωσης 3D: PLA, ABS (και ASA), PETG, Nylon

Το παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζει συγκριτική ανάλυση τεσσάρων βασικών θερμοπλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται ευρέως στην τρισδιάστατη εκτύπωση: PLA, ABS (και η παραλλαγή του ASA), PETG και nylon. Η αξιολόγηση βασίζεται σε μηχανικά και θερμικά χαρακτηριστικά, ιδιότητες εκτύπωσης και κόστος, με στόχο την επιλογή του καταλληλότερου υλικού για την τελική υλοποίηση του περιβλήματος του συστήματος.

- **PLA (Polylactic Acid):** Το PLA είναι βιοδιασπώμενο θερμοπλαστικό από ανανεώσιμες πρώτες ύλες (π.χ. άμυλο καλαμποκιού), που χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και ευκολία εκτύπωσης, με πολύ καλή απόδοση στην κατασκευή πρωτοτύπων. Εκτυπώνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς τη χρήση θερμαινόμενης βάσης και εμφανίζει άριστη ποιότητα επιφάνειας. Παρόλα αυτά, έχει χαμηλή θερμική σταθερότητα (μαλακώνει περίπου στους 60 °C) και αυξημένη ευθραυστότητα, γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο για τελικά εξαρτήματα με μηχανικές απαιτήσεις [16].

- **ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene):** Το ABS είναι πετρελαϊκής βάσης θερμοπλαστικό με υψηλή αντοχή σε κρούσεις και καλύτερη θερμική σταθερότητα σε σχέση με το PLA (υψηλότερο σημείο γυαλίωσης). Χρησιμοποιείται σε λειτουργικά εξαρτήματα που απαιτούν δομική ακεραιότητα. Ωστόσο, παρουσιάζει έντονο warping κατά την εκτύπωση, απαιτεί θερμαινόμενη βάση ή κλειστό θάλαμο και εκλύει δυσάρεστες οσμές, καθιστώντας απαραίτητο τον καλό αερισμό του χώρου [16].
- **ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate):** Το ASA είναι παραλλαγή του ABS με βελτιωμένη αντοχή σε υπεριώδη ακτινοβολία και καιρικές συνθήκες· δεν κιτρινίζει και παρουσιάζει μειωμένο warping σε σύγκριση με το ABS, διατηρώντας ωστόσο παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά. Το βασικό του μειονέκτημα είναι το υψηλότερο κόστος σε σχέση με το ABS [16].
- **PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified):** Το PETG συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του PLA και του ABS· έχει καλή αντοχή σε κρούσεις, ευκαμψία και θερμική σταθερότητα, εκτυπώνεται εύκολα με ελάχιστο warping και δεν παράγει οσμές κατά την εκτύπωση. Το κόστος του είναι συγκρίσιμο με αυτό του PLA και του ABS, καθιστώντας το ιδανικό για λειτουργικά πρωτότυπα και τελικά εξαρτήματα [16].
- **Νάιλον (Polyamide):** Το νάιλον παρέχει τις υψηλότερες μηχανικές αντοχές και μεγάλη ευκαμψία· είναι ανθεκτικό σε τριβή και χημικές επιδράσεις. Ωστόσο, είναι πολύ υγροσκοπικό (απορροφά υγρασία), απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες εκτύπωσης και ξηρό περιβάλλον, ενώ το κόστος του είναι σημαντικά υψηλότερο, γεγονός που περιορίζει τη μαζική του χρήση [17].

### **Συμπεράσματα:**

Κατά την ανάπτυξη των πρωτοτύπων χρησιμοποιήθηκε PLA λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας εκτύπωσης, που επιτρέπει ταχεία αξιολόγηση της μορφολογίας κάθε έκδοσης. Ωστόσο, απορρίφθηκε για το τελικό περίβλημα λόγω της ευθραυστότητας και της χαμηλής θερμικής του αντοχής [16]. Το ABS/ASA, παρά τις καλές μηχανικές ιδιότητες, δυσχεραίνει τη διαδικασία εκτύπωσης (warping, ανάγκη για θερμαινόμενη βάση, εκπομπή αερίων) και το ASA έχει υψηλότερο κόστος [16]. Το νάιλον, παρά την κορυφαία αντοχή, απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και υψηλό κόστος, καθιστώντας το μη

βιώσιμο για μαζική παραγωγή [17]. Αντιθέτως, το PETG πληροί όλες τις απαιτήσεις (αντοχή, ευκαμψία, θερμική σταθερότητα, ευκολία εκτύπωσης) με κόστος ισοδύναμο του PLA/ABS· γι' αυτό επιλέχθηκε για την τελική εκτύπωση του περιβλήματος [16].

### 5.1.1 Παράμετροι και Υλικά εκτύπωσης

Οι βασικές ρυθμίσεις εκτύπωσης που εφαρμόστηκαν στο Bambu Studio—όπως η διάμετρος ακροφυσίου, το ύψος στρώσης, το ποσοστό πλήρωσης, οι τοίχοι, η ταχύτητα και οι παράμετροι υποστηριγμάτων—καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά του νήματος PETG HF που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάζονται συνοπτικά στην παρούσα ενότητα.

#### Ρυθμίσεις Εκτύπωσης στο Bambu Studio & PETG HF

- **Διάμετρος ακροφυσίου (Nozzle size):** Το Bambu Studio υποστηρίζει ακροφύσια 0.2, 0.4, 0.6 και 0.8 mm. Η διάμετρος του ακροφυσίου καθορίζει το ελάχιστο πλάτος γραμμής και το μέγιστο ύψος στρώσης. Για PETG HF, το σύνηθες είναι 0.4 mm, που προσφέρει καλή ισορροπία μεταξύ ταχύτητας και λεπτομέρειας.
- **Ύψος στρώσης (Layer height):** Το ύψος κάθε στρώσης επηρεάζει την ανάλυση και την ταχύτητα εκτύπωσης. Συνήθως κυμαίνεται από 0.16 έως 0.28 mm για ακροφύσιο 0.4mm. Μικρότερο ύψος στρώσης προσφέρει καλύτερη ποιότητα, αλλά αυξάνει τον χρόνο και πιθανά αυξάνει τα λάθη στην εκτύπωση.
- **Ποσοστό πλήρωσης (Infill percentage):** Το infill καθορίζει τη δομή στο εσωτερικό του αντικειμένου. Τυπικές τιμές είναι 10–25% για μηχανική αντοχή και εξοικονόμηση υλικού. Σε κρίσιμα σημεία, το infill μπορεί να αυξηθεί τοπικά με modifiers.
- **Εξωτερικοί βρόχοι τοιχώματος (Wall loops):** Τα wall loops είναι τα εξωτερικά τοιχώματα κάθε στρώσης. Περισσότεροι τοίχοι αυξάνουν την αντοχή και τη στεγανότητα. Συνήθως 2–4 loops είναι επαρκείς για PETG HF.
- **Ταχύτητα εκτύπωσης (Speed):** Το PETG HF έχει σχεδιαστεί για υψηλές ταχύτητες, έως 300mm/s, διπλάσια από το κλασικό PETG, χωρίς να θυσιάζει την ποιότητα. Προτεινόμενη ταχύτητα: 200–300mm/s, ανάλογα με το μοντέλο και την ακρίβεια που απαιτείται.

- **Υποστηρίγματα:(Supports):** Το Bambu Studio προσφέρει:
  - **Normal supports:** Κλασική κάθετη στήριξη (grid ή snug).
  - **Tree supports:** Διακλαδώσεις που "αγκαλιάζουν" το μοντέλο, εύκολες στην αφαίρεση και ιδανικές για πολύπλοκα σχήματα.
  - **Custom supports:** Χειροκίνητη τοποθέτηση υποστηριγμάτων όπου απαιτείται.

Τα supports μπορούν να γίνουν από διαφορετικό υλικό (π.χ. PVA για υδατοδιαλυτότητα).

### Επιλογή Ποσοστού Πλήρωσης (Infill)

Η επιλογή του κατάλληλου ποσοστού πλήρωσης (infill percentage) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη ισορροπίας και βελτιστοποίησης μεταξύ της απαιτούμενης μηχανικής αντοχής, της εξοικονόμησης υλικού και της ταχύτητας τύπωσης. Η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η αύξηση του ποσοστού πλήρωσης οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του PETG. Συγκεκριμένα, έρευνες δείχνουν ότι η αύξηση από 25% σε 100% infill μπορεί να αυξήσει την εφελκυστική αντοχή από 18-21 MPa έως 24-49 MPa, αντιπροσωπεύοντας βελτίωση της τάξης του 25-50%[26].

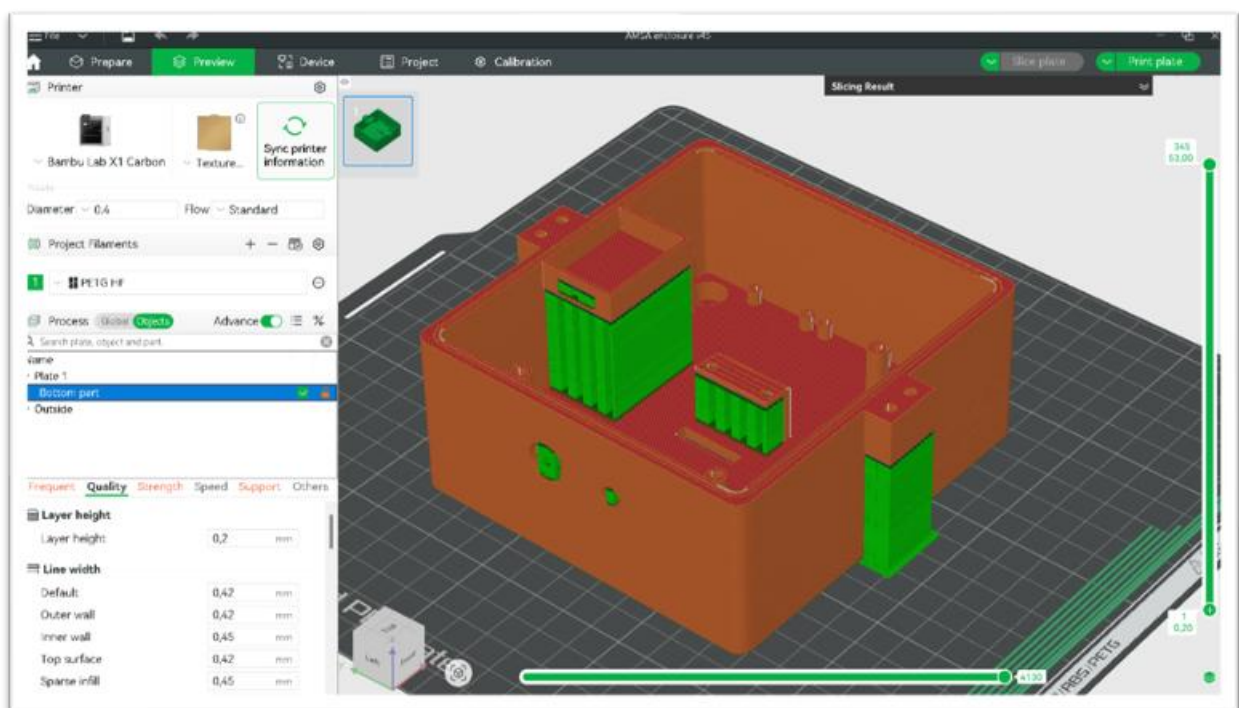
Ταυτόχρονα, μελέτες επιβεβαιώνουν ότι υπάρχουν φθίνουσες αποδόσεις πάνω από το 50-75% infill, όπου οι επιπλέον αυξήσεις στην αντοχή γίνονται οριακές σε σχέση με την αύξηση του κόστους υλικού και χρόνου εκτύπωσης[27]

Μετά από πειραματικές δοκιμές με ποσοστά infill 15%, 25% και 45%, διαπιστώθηκε ότι το απαιτούμενο ποσοστό για την επίτευξη της επιθυμητής μηχανικής αντοχής του περιβλήματος είναι 45%. Αυτή η επιλογή επιβεβαιώνεται από τα ευρήματα των παραπομπών μελετών, οι οποίες καταδεικνύουν ότι το εύρος 30-50% infill παρέχει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ αντοχής και αποδοτικότητας για λειτουργικά εξαρτήματα

### 5.1.2 Ρύθμιση εκτύπωσης και προεπισκόπηση τελικού προϊόντος

Οι ακόλουθες ρυθμίσεις εκτύπωσης τροποποιήθηκαν σε σχέση με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους, με σκοπό τη βέλτιστη εκτύπωση του περιβλήματος της συσκευής:

- **Layer height:** 0.2mm
- **Sparse infill density:** 45%
- **Sparse infill pattern:** Triangles
- **Wall Loops:** 2
- **Supports:** Enabled
- **Ταχύτητα εσωτερικών τοιχωμάτων:** 200mm/s
- **Ταχύτητα εξωτερικών τοιχωμάτων:** 300mm/s
- **Τύπος supports:** normal(auto)
- **Στυλ supports:** Snug



Εικόνα 5.1.2.a – Προεπισκόπηση μοντέλου πριν την τύπωση με ενσωματωμένα supports.

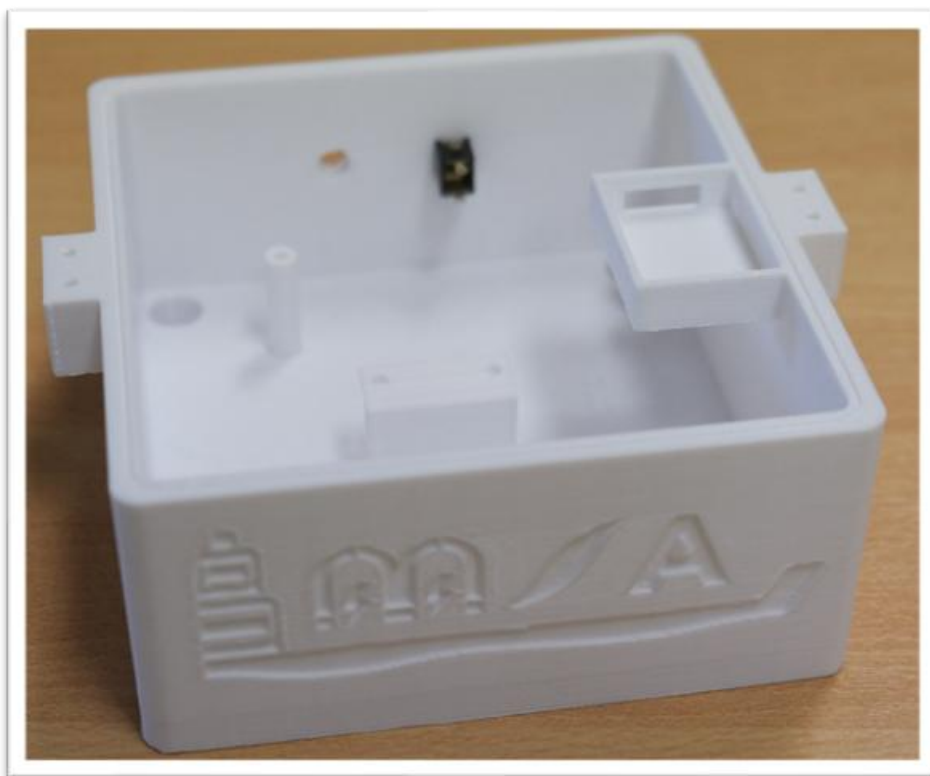
| Slicing Result        |         |           |               |         |         |
|-----------------------|---------|-----------|---------------|---------|---------|
| Color Scheme          |         | Line Type |               |         |         |
| Line Type             | Time    | Percent   | Used filament |         | Display |
| Inner wall            | 21m11s  | 7,9%      | 8,55 m        | 26,33 g | ✓       |
| Outer wall            | 30m35s  | 11,4%     | 8,03 m        | 24,72 g | ✓       |
| Overhang wall         | 1m32s   | 0,6%      | 0,04 m        | 0,12 g  | ✓       |
| Sparse infill         | 1h50m   | 41,2%     | 28,75 m       | 88,52 g | ✓       |
| Internal solid infill | 19m35s  | 7,3%      | 6,43 m        | 19,78 g | ✓       |
| Top surface           | 9m22s   | 3,5%      | 1,37 m        | 4,21 g  | ✓       |
| Bottom surface        | 6m12s   | 2,3%      | 1,09 m        | 3,35 g  | ✓       |
| Bridge                | 13m17s  | 5,0%      | 1,87 m        | 5,75 g  | ✓       |
| Gap infill            | 31s     | 0,2%      | 0,08 m        | 0,24 g  | ✓       |
| Support               | 16m19s  | 6,1%      | 3,69 m        | 11,36 g | ✓       |
| Support interface     | 2m26s   | 0,9%      | 0,31 m        | 0,97 g  | ✓       |
| Support transition    | 51s     | 0,3%      | 0,08 m        | 0,24 g  | ✓       |
| Custom                | 7m7s    | 2,7%      | 0,11 m        | 0,34 g  | ✓       |
| Travel                | 27m59s  | 10,5%     |               |         |         |
| Retract               |         |           |               |         |         |
| Unretract             |         |           |               |         |         |
| Wipe                  |         |           |               |         |         |
| Seams                 |         |           |               |         | ✓       |
| Total Estimation      |         |           |               |         |         |
| Total Filament:       | 60,39 m | 185,93 g  |               |         |         |
| Model Filament:       | 56,31 m | 173,36 g  |               |         |         |
| Cost:                 | 4,65    |           |               |         |         |
| Prepare time:         | 7m20s   |           |               |         |         |
| Model printing time:  | 4h20m   |           |               |         |         |
| Total time:           | 4h28m   |           |               |         |         |

Εικόνα 5.1.2.β – Πίνακας συσχέτισην χρωμάτων με τους αντίστοιχους τύπους γραμμών στο παράθυρο προεπισκόπησης.

## 5.2 Αποτελέσματα τελικής εκτύπωσης

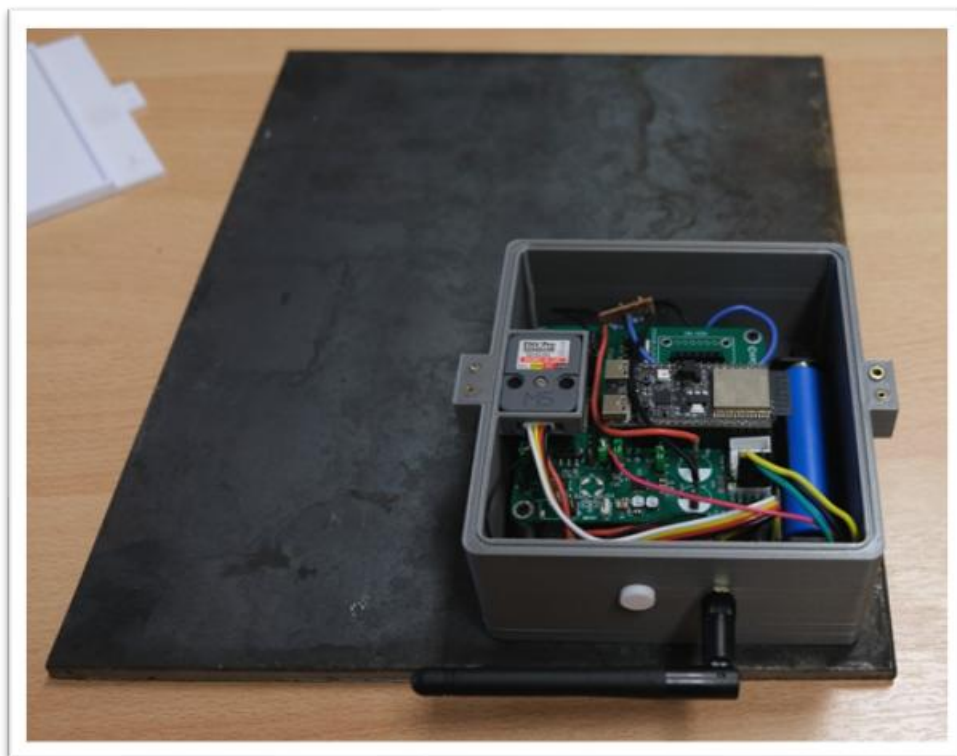
Η τελική εκτύπωση του περιβλήματος με PETG HF (0,4mm ακροφύσιο, 0,2mm ύψος στρώσης, 45% infill, 2 τοίχοι, ταχύτητα 300mm/s, κανονικά supports) απέδωσε ομοιόμορφη, ματ επιφάνεια χωρίς προβλήματα. Η διαστασιακή ακρίβεια διατηρήθηκε εντός προβλέψεων επιτρέποντας άψογη συναρμολόγηση χωρίς δυσκολίες, ενώ η υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης μείωσε τον συνολικό χρόνο παραγωγής κατά περισσότερα από 50% σε σχέση με συμβατικά PETG, χωρίς συμβιβασμό στην ποιότητα. Με αυτές τις παραμέτρους, επιτεύχθηκε βέλτιστο ισοζύγιο μεταξύ ταχύτητας, αντοχής και αισθητικής τελικού προϊόντος.

Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες από τις εκτυπώσεις του ολικού συστήματος σε διάφορα στάδια συναρμολόγησης.:



*Εικόνα 5.2.α – Τελική εκτυπωμένη συσκευασία με λογότυπο AMSA στο πλάι, μη συναρμολογημένη εκτός βύσματος mini jack για κεραία.*



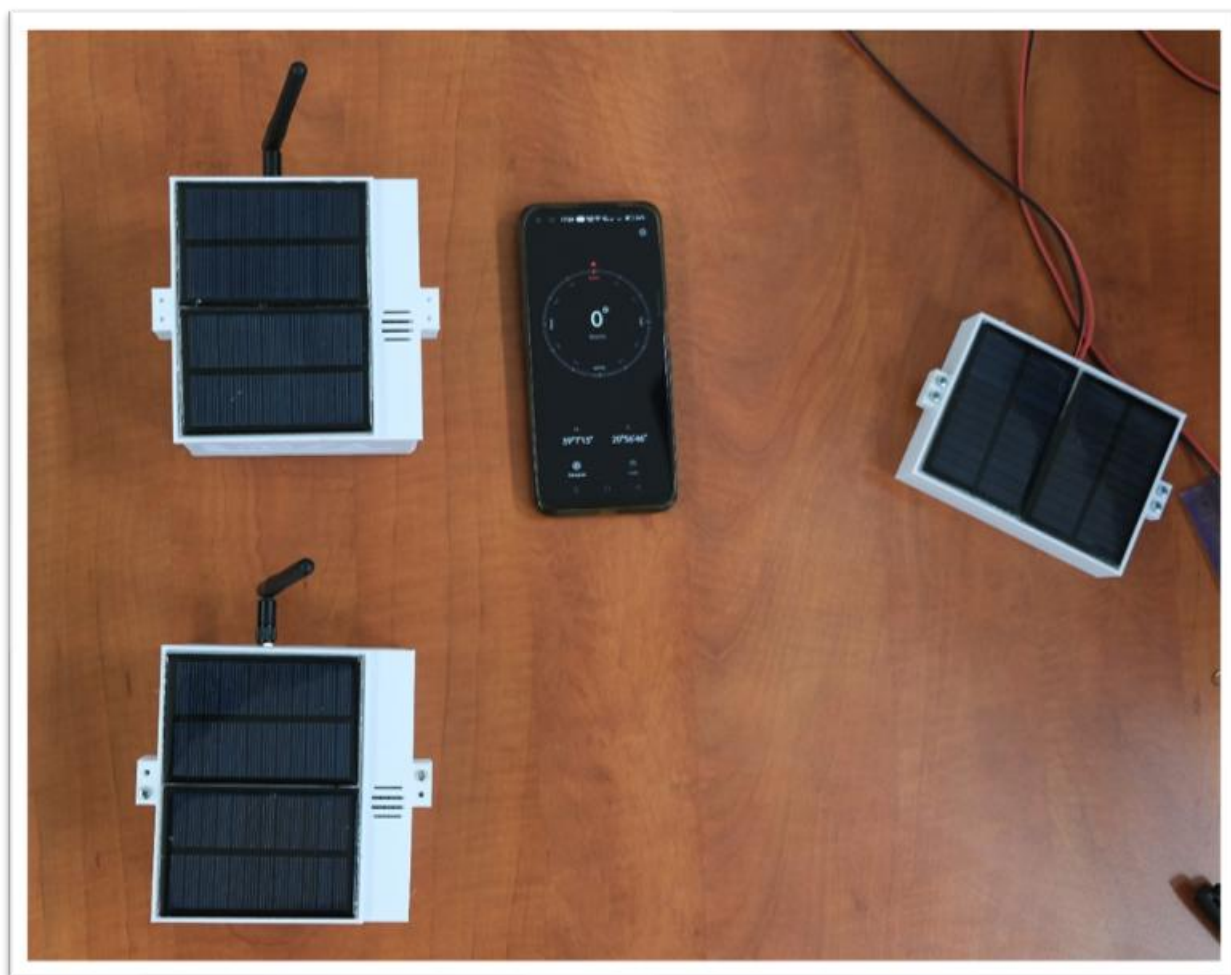


*Εικόνα 5.2.β –Συσκευασία AMSA συναρμολογημένη εκτός βύσματος mini jack.*



*Εικόνα 5.2.γ –Συσκευασία AMSA συναρμολογημένη πλήρως πάνω σε μεταλλική επιφάνεια.*





*Εικόνα 5.2.δ –Δύο συσκευασίες AMSA συναρμολογημένες πλήρως  
.και μία εξωτερική συσκευασία φωτοβολταϊκών που ρυθμίζονται  
προς τον μαγνητικό βορρά.*

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία ταχείας προτυποποίησης που ακολουθήθηκε επέτρεψε την εξέλιξη του περιβλήματος μέσα από επαναληπτικούς κύκλους σχεδίασης και εκτύπωσης, οδηγώντας σε μία λύση που πληροί τα απαιτούμενα κριτήρια αντοχής, στεγανότητας, εργονομίας και λειτουργικής ευελιξίας. Η χρήση της τεχνολογίας FDM συνέβαλε στη μείωση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης, ενώ η επιλογή του PETG ως υλικού εκτύπωσης ενίσχυσε τη μηχανική σταθερότητα του τελικού προϊόντος.

Το τελικό αποτέλεσμα αποδεικνύει πως η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί αξιόπιστο εργαλείο ταχείας προτυποποίησης για περιβλήματα ενσωματωμένων συστημάτων, ειδικά όταν απαιτείται προσαρμογή σε συγκεκριμένες γεωμετρίες και δομικές ανάγκες. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω εφαρμογές, είτε σε ερευνητικά πρωτότυπα είτε σε πιλοτικές βιομηχανικές λύσεις.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Τεχνικά Φυλλάδια (Datasheets)

### Χρησιμοποιηθέντων Εξαρτημάτων

Παρατίθενται τα τεχνικά φυλλάδια (datasheets) των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό της συσκευασίας του ενσωματωμένου συστήματος. Οι πληροφορίες που αντλήθηκαν από τα φυλλάδια αυτά ήταν απαραίτητες για τη σωστή χωροθέτηση, τη θερμική αξιολόγηση και τη γενικότερη μηχανολογική προσαρμογή των εξαρτημάτων εντός του περιβλήματος.

#### Αισθητήρες & Μονάδες Περιβάλλοντος

- **LSM303DLHC – Accelerometer & Magnetometer**  
STMicroelectronics  
 <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm303dlhc.html>
- **ICM-20948 – 9-DOF IMU Sensor**  
Adafruit / TDK InvenSense  
 <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-tdk-invensense-icm-20948-9-dof-imu.pdf>
- **ENV Pro Unit – Περιβαλλοντικός αισθητήρας (Temp/Humidity/Pressure/Gas)**  
M5Stack  
 <https://docs.m5stack.com/en/unit/ENV%20Pro%20Unit>

#### Μικροελεγκτής & Επεξεργαστική Μονάδα

- **Wemos LOLIN32 – ESP32 Development Board**  
Wemos  
 <https://megma.ma/wp-content/uploads/2021/08/Wemos-ESP32-Lolin32-Board-BOOK-ENGLISH.pdf>

#### Εξοπλισμός Εκτύπωσης

- **Bambu Lab X1 Carbon – Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εκτυπωτή**  
Bambu Lab  
 <https://public-cdn.bambulab.com/store/bambulab-X1-carbon-tech-specs.pdf>

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Marwedel, *Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems*, 2nd ed. Springer, 2010.
- [2] E. A. Lee and S. A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach*. MIT Press, 2016..
- [3] A. Lancaster and M. Keswani, l“Integrated circuit packaging review with an emphasis on 3D packaging,” *Integration, the VLSI Journal*, vol. 61, pp. 1–12, 2018..
- [4] Y. Zhang, H. Li, X. Wang, and J. Liu, "Review on the impact of marine environment on the reliability of electronic packaging materials," *Frontiers in Materials*, vol. 12, art. 1584349, 2025.
- [5] Zhou L, Miller J, Vezza J, Mayster M, Raffay M, Justice Q, Al Tamimi Z, Hansotte G, Sunkara LD, Bernat J. *Additive Manufacturing: A Comprehensive Review*. *Sensors (Basel)*. 2024 Apr 23;24(9):2668. doi: 10.3390/s24092668. PMID: 38732776; PMCID: PMC11085389
- [6] Abbasi M, Váz P, Silva J, Martins P. *Head-to-Head Evaluation of FDM and SLA in Additive Manufacturing: Performance, Cost, and Environmental Perspectives*. *Applied Sciences*. 2025; 15(4):2245.  
<https://doi.org/10.3390/app15042245>
- [7]. Gao B, Zhao H, Peng L, Sun Z. *A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM)*. *Micromachines (Basel)*. 2022 Dec 25;14(1):57. doi: 10.3390/mi14010057. PMID: 36677118; PMCID: PMC9861605.
- [8] T. Sperber, D. Lange, and M. Werner, "Designing reliable electronics for harsh environments using IP ratings," *ResearchGate*, Mar. 2019. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/ngress-protection-code-20\\_fig3\\_331880116](https://www.researchgate.net/figure/ngress-protection-code-20_fig3_331880116)

[9] Honeywell Aerospace, *Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems*, Honeywell International Inc., Technical Article, 2008. [Online].

[10] Dassault Systèmes, “SolidWorks,” [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>

[11] Dassault Systèmes, “CATIA,” [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/catia/>

[12] FreeCAD, “FreeCAD: Your own 3D parametric modeler,” [Online]. Available: <https://www.freecad.org/>

[13] Autodesk, “Fusion 360,” [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

[14] Bambu Lab, “Bambu Lab X1C,” [Online]. Available: <https://bambulab.com/en/x1>

[15] Bambu Lab, “Bambu Studio,” [Online]. Available: <https://bambulab.com/en/download/studio>

[16] J. Sedlak, Z. Joska, J. Jansky κ.ά., “Analysis of the Mechanical Properties of 3D-Printed Plastic Samples Subjected to Selected Degradation Effects,” *Materials*

[17] M. Ichakpa, M. Goodyear, J. Duthie κ.ά., “Investigation on Mechanical and Thermal Properties of 3D-Printed Polyamide 6, Graphene Oxide and Glass-Fibre-Reinforced Composites under Dry, Wet and High Temperature Conditions,” *Journal of Composite Science*.

[18] Republica, “Cirrus Logic MCU on PCB”, 2013. [Online]. Available: <https://pixabay.com/photos/main-board-chips-electronics-89050/>

[19] Unknown, “NVIDIA Jetson Enclosure”, 2019. [Online]. Available: [https://www.electronics-lab.com/wp-content/uploads/2019/08/pgal\\_190618\\_he9029.jpg](https://www.electronics-lab.com/wp-content/uploads/2019/08/pgal_190618_he9029.jpg), 2019.

[20] Unknown, “Designing a 3D printed enclosure for my KiCad project in Blender”, 2021. [Online]. Available: <https://mike42.me/blog/2021-11-designing-a-3d-printed-enclosure-for-my-kicad-project-in-blender>

[21] Q. Bénéthuille, «Fab Academy,» 2021. [Online]. Available: <https://fabacademy.org/2021/labs/digiscope/students/quentin-benethuillere/assignments/week05/>.

[22] @HomeAssistant\_105347, «Home Assistant Yellow Enclosure,» *Printables*, 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.printables.com/model/295651-home-assistant-yellow-enclosure?lang=it>.

[23] S. C. L. Yeo, S. K. S. Fan, and H. L. T. Lee, “Microfluidic devices for bioapplications,” *Lab on a Chip*, vol. 16, no. 9, pp. 1740–1760, 2016, doi: 10.1039/C6LC00284F.

[24] Igus GmbH, “IP Ratings Explained – Ingress Protection Rating System,” Clarion UK, 2021. [Online]. Available: <https://clarionuk.com/resources/ip-ratings/>

- [25] Benlisquare, "Bambu Lab X1 Carbon with AMS module," Wikimedia Commons. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bambu\\_Lab\\_X1\\_Carbon\\_with\\_AMS\\_module.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bambu_Lab_X1_Carbon_with_AMS_module.jpg). [Accessed: 06-Jul-2025].
- [26] O. F. Taresh, M. T. Mezher, and E. G. Daway, "Mechanical properties of 3D-printed PETG samples: The effect of varying infill patterns," *Revue des Composites et des Matériaux Avancés-Journal of Composite and Advanced Materials*, vol. 33, no. 5, pp. 339–345, 2023, doi: 10.18280/rcma.330508.
- [27] G. A. Johnson and J. J. French, "Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials", *Adv. technol. innov.*, vol. 3, no. 4, pp. 179–184, Jul. 2018.
- [28] D. S. Thomas and S. W. Gilbert, *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*. NIST SP 1176, 2014.
- [29] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product Design and Development*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2019.
- [30] S. D. M. Lopes, "Processing of Polymers in Short Series Production," *M.Sc. thesis, Lund Univ.*, 2012.
- [31] M. Lozano et al., "Analysis and advances in additive manufacturing as a sustainable technology," *MRS Commun.*, vol. 9, no. 3, pp. 846–859, 2019.
- [32] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 2010.
-