



**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Συγκριτική μελέτη αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας  
σε πειραματική διάταξη με ενσωματωμένο σύστημα»**



**Του φοιτητή:  
Μουλίνου Θεόδωρου  
Αρ. Μητρώου: 514090**

**Επιβλέπων:  
Τσιακμάκης Κυριάκος  
Επίκουρος Καθηγητής**

Τίτλος Π.Ε. «Συγκριτική μελέτη αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας σε πειραματική  
διάταξη με ενσωματωμένο σύστημα»

Κωδικός Π.Ε. 26220

Ονοματεπώνυμο φοιτητή Μουλίνος Θεόδωρος

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Τσιακμάκης Κυριάκος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 26-03-2026

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 01-09-2026

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μουλίνου Θεόδωρου που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την πειραματική αξιολόγηση μιας αυτόνομης διάταξης περιβαλλοντικής καταγραφής, με επίκεντρο τη συγκριτική μελέτη τριών ευρέως διαδεδομένων αισθητήρων: του πολυπαραμετρικού Bosch BME680, του ψηφιακού Aosong DHT22 (AM2302) και του χαμηλού κόστους Aosong DHT11. Για τις ανάγκες της μελέτης αναπτύχθηκε μια προσαρμοσμένη πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (Custom PCB Carrier Board) που ενσωματώνει τον μικροελεγκτή ATmega328P (Arduino Nano), μονάδα καταγραφής δεδομένων σε κάρτα MicroSD (μέσω διαύλου SPI), οθόνη ενδείξεων OLED 0.96" I2C (ελεγκτής SSD1306), καθώς και δύο ανεξάρτητα μπουτόν ελέγχου (Reset και User Action Button). Η αρχιτεκτονική του λογισμικού (Firmware) υλοποιήθηκε σε γλώσσα C++ με μη-ανασταλτικό χρονισμό (non-blocking timing), εξασφαλίζοντας συγχρονισμένη δειγματοληψία και αυτόνομη αποθήκευση σε αρχεία CSV. Η εργασία παρέχει μια πλήρη τεχνική τεκμηρίωση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας (I2C, Single-Bus) και των αρχών λειτουργίας των αισθητήρων, θέτοντας τα θεμέλια για τη στατιστική ανάλυση των αποκλίσεων ακριβείας και των χρόνων απόκρισης των αισθητήρων.

# «Comparative study of temperature and humidity sensors in an experimental setup with an embedded system»

«MOULINOS THEODOROS»

## **Abstract**

This thesis presents the design, implementation, and experimental evaluation of an autonomous environmental data logging system, focusing on the comparative analysis of three widely used sensors: the Bosch BME680 multiparameter sensor, the Aosong DHT22 (AM2302), and the low-cost Aosong DHT11. A dedicated custom Printed Circuit Board (Custom PCB Carrier Board) was developed to integrate the ATmega328P microcontroller (Arduino Nano), a MicroSD card logging module (SPI bus), a 0.96" I2C OLED display (SSD1306 controller), and dual tactile control buttons (System Reset and User Action). The firmware was developed in C++ employing non-blocking scheduling to ensure synchronized data acquisition and autonomous CSV logging. This study provides thorough technical documentation of communication protocols (I2C, Single-Bus) and physical sensing principles, establishing a comprehensive framework for assessing sensor accuracy deviations, response dynamics, and cost-to-performance tradeoffs.

# Περιεχόμενα

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Περίληψη.....                                                           | iii |
| Abstract .....                                                          | iv  |
| Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....                                              | 1   |
| 1.1 Γενικό Πλαίσιο .....                                                | 1   |
| 1.2 Διατύπωση του Προβλήματος.....                                      | 2   |
| 1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας.....                                 | 2   |
| 1.4 Δομή της Εργασίας.....                                              | 3   |
| Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Παρόμοια Συστήματα.....               | 4   |
| 2.1 Εισαγωγή.....                                                       | 4   |
| 2.2 Αρχές Μέτρησης Περιβαλλοντικών Παραμέτρων .....                     | 4   |
| 2.2.1 Μέτρηση Θερμοκρασίας .....                                        | 4   |
| 2.2.2 Μέτρηση Σχετικής Υγρασίας .....                                   | 5   |
| 2.2.3 Μέτρηση Ατμοσφαιρικής Πίεσης .....                                | 6   |
| 2.2.4 Ανίχνευση Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (VOCs) & Ποιότητας Αέρα..... | 7   |
| 2.3 Πρωτόκολλα Ψηφιακής Επικοινωνίας Αισθητήρων & Περιφερειακών .....   | 7   |
| 2.3.1 Το Πρωτόκολλο I2C (Inter-Integrated Circuit).....                 | 7   |
| 2.3.2 Το Πρωτόκολλο Single-Bus / Custom One-Wire (DHT Sensors) .....    | 10  |
| 2.4 Παρόμοια Συστήματα & Σταθμοί Μέτρησης Περιβάλλοντος .....           | 11  |
| 2.4.1 Βιομηχανικοί Σταθμοί Παρακολούθησης Κλίματος .....                | 11  |
| 2.4.2 Οικιακοί Σταθμοί IoT Χαμηλού Κόστους.....                         | 11  |
| 2.5 Επίλογος Κεφαλαίου .....                                            | 12  |
| Κεφάλαιο 3ο: Αναλυτική Παρουσίαση Εξαρτημάτων Υλικού (Hardware) .....   | 13  |
| 3.1 Εισαγωγή.....                                                       | 13  |
| 3.2 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου: Arduino Nano (ATmega328P).....             | 13  |
| 3.2.1 Αρχιτεκτονική Μικροελεγκτή ATmega328P.....                        | 13  |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.2 Κατανομή Μνήμης και Περιορισμοί.....                                       | 14 |
| 3.2.3 Τροφοδοσία και Ενσωματωμένα Κυκλώματα .....                                | 14 |
| 3.3 Ψηφιακός Αισθητήρας Ποιότητας Αέρα Bosch BME680 .....                        | 14 |
| 3.3.1 Φιλοσοφία Σχεδίασης και MEMS Τεχνολογία .....                              | 14 |
| 3.3.2 Αρχές Ανίχνευσης ανά Παράμετρο.....                                        | 15 |
| 3.3.3 Ο Αισθητήρας Αερίων (MOX) και η Βιβλιοθήκη BSEC.....                       | 15 |
| 3.4 Ψηφιακοί Αισθητήρες Οικογένειας DHT.....                                     | 15 |
| 3.4.1 DHT22 (AM2302): Υψηλή Ανάλυση και Χωρητική Μέτρηση.....                    | 15 |
| 3.4.2 DHT11: Περιορισμοί Τεχνολογίας Αντιστατικού Πολυμερούς.....                | 16 |
| 3.4.3 Πρωτόκολλο Επικοινωνίας Single-Bus.....                                    | 16 |
| 3.5 Περιφερειακές Μονάδες Καταγραφής και Απεικόνισης.....                        | 16 |
| 3.5.1 Διασύνδεση με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή και Σειριακή Επικοινωνία (UART) ..... | 16 |
| 3.5.2 Οθόνη Απεικόνισης OLED 0.96" I2C.....                                      | 17 |
| 3.5.3 Διεπαφές Εισόδου και Διαχείριση Debouncing .....                           | 17 |
| 3.6 Συγκριτικός Πίνακας Τεχνικών Προδιαγραφών Αισθητήρων .....                   | 18 |
| 3.7 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....                                                  | 19 |
| Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση Custom PCB & Ανάπτυξη Firmware .....                       | 20 |
| 4.1 Εισαγωγή.....                                                                | 20 |
| 4.2 Διάταξη του Πειράματος (Experimental Setup).....                             | 20 |
| 4.3 Διαδικασία Καταγραφής Δεδομένων (Data Logging).....                          | 20 |
| 4.4 Σχεδίαση Τυπωμένου Κυκλώματος (Custom PCB) στο Autodesk Fusion 360 .....     | 20 |
| 4.4.1 Σύλληψη Σχηματικού (Schematic Capture): .....                              | 21 |
| 4.4.2 Χωροθέτηση Εξαρτημάτων (Component Placement):.....                         | 24 |
| 4.4.3 Δρομολόγηση και Επίπεδα Γείωσης (Routing & Ground Planes): .....           | 25 |
| 4.5 Αρχιτεκτονική Λογισμικού (Firmware) και Διαχείριση Πόρων .....               | 26 |
| 4.6 Ροογράμματα Λειτουργίας (Flowcharts).....                                    | 29 |
| 4.7 Πίνακας Αντιστοίχισης Ακροδεκτών (Pinout Mapping Table).....                 | 29 |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8 Διαδικασία Κατασκευής και Συναρμολόγησης (Assembly Process).....                                | 30 |
| Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική Διαδικασία & Αποτελέσματα .....                                            | 30 |
| 5.1 Εισαγωγή.....                                                                                   | 30 |
| 5.2 Πείραμα 1: Αξιολόγηση Σταθερότητας σε Συνθήκες Αναφοράς (Ambient Room Test)....                 | 31 |
| 5.3 Πείραμα 2: Δυναμική Απόκριση σε Σημειακή Μεταβολή (Human Breath Test).....                      | 31 |
| 5.4 Πείραμα 3: Χρονική Υστέρηση σε Περιβάλλον Υψηλού Κορεσμού (High-Humidity Environment Test)..... | 32 |
| 5.5 Στατιστική Ανάλυση Σφαλμάτων & Σύνοψη.....                                                      | 34 |
| 5.6 Εκτενέστερη Ανάλυση Χρόνων Απόκρισης (Rise & Recovery Time).....                                | 35 |
| Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα & Μελλοντικές Επεκτάσεις .....                                            | 35 |
| 6.1 Εισαγωγή.....                                                                                   | 35 |
| 6.2 Τελικά Συμπεράσματα και Αξιολόγηση Αισθητήρων .....                                             | 35 |
| Αξιολόγηση του Bosch BME680 .....                                                                   | 36 |
| Αξιολόγηση του DHT22 (AM2302) .....                                                                 | 36 |
| Αξιολόγηση του DHT11 .....                                                                          | 36 |
| 6.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις και Βελτιώσεις.....                                                      | 36 |
| 1. Ενσωμάτωση Τεχνολογιών IoT (Internet of Things): .....                                           | 37 |
| 2. Κατασκευή Κλειστού Θαλάμου Βαθμονόμησης (Calibration Chamber): .....                             | 37 |
| 3. Διαχείριση Ενέργειας (Power Optimization): .....                                                 | 38 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....                                                                                   | 39 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ .....                                                                         | 40 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΑΠΟΣΠΑΣΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ (DATASHEETS).....                                   | 47 |

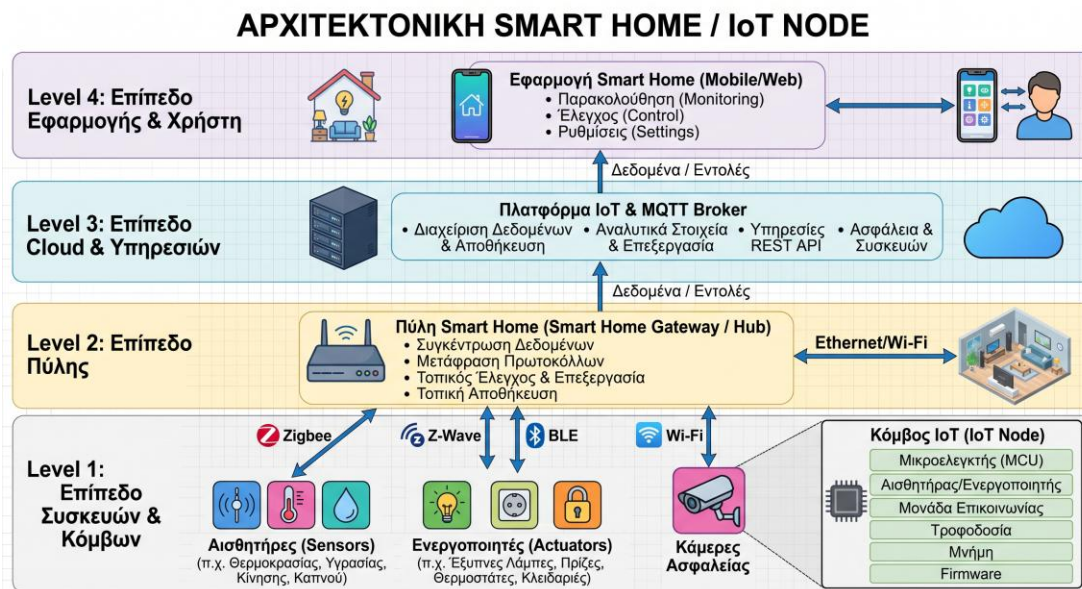
## Πίνακας Εικόνων και Σχημάτων

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 1.1: Τυπική αρχιτεκτονική ενός συστήματος παρακολούθησης IoT. ....                                                  | 2  |
| Σχήμα 2.1: Παράλληλη συνδεσμολογία αισθητήρων όπως του BME680 και οθόνης OLED στον δίαυλο I2C. ....                       | 8  |
| Πίνακας 3.1: Συγκριτικός πίνακας τεχνικών προδιαγραφών και ορίων λειτουργίας των αισθητήρων BME680, DHT22 και DHT11. .... | 18 |
| Σχήμα 4.1: Η συνδεσμολογία μεταξύ του Arduino_Nano και των περιφερειακών του συστήματος. ....                             | 21 |
| Σχήμα 4.2: Η συνδεσμολογία του αισθητήρα DHT11 και της αντίστασης pull-up R2. ....                                        | 22 |
| Σχήμα 4.3: Η συνδεσμολογία του αισθητήρα DHT22 και της αντίστασης pull-up R1. ....                                        | 22 |
| Σχήμα 4.4: Σύνδεση κουμπιού αλληλεπίδρασης χρήστη (User Action Button). ....                                              | 23 |
| Σχήμα 4.5: Σύνδεση κουμπιού επανεκκίνησης (Reset Button). ....                                                            | 23 |
| Σχήμα 4.6: Παράλληλη συνδεσμολογία του αισθητήρα BME680 και οθόνης OLED στον δίαυλο I2C. ....                             | 24 |
| Σχήμα 4.7: I2C Pull-up Resistors. ....                                                                                    | 24 |
| Σχήμα 4.8: 3D αναπαράσταση του συστήματος (3D Render). ....                                                               | 25 |
| Σχήμα 4.9: 2D αναπαράσταση των δύο επιπέδων χαλκού που τυπώθηκαν επάνω στην πλακέτα. ....                                 | 26 |
| Πίνακας 4.10: Αντιστοίχιση Ακροδεκτών (Pinout Mapping Table). ....                                                        | 29 |
| Σχήμα 5.1: Διάγραμμα μετρήσεων σε κατάσταση ηρεμίας. ....                                                                 | 31 |
| Σχήμα 5.2: Διάγραμμα μετρήσεων κατά την διάρκεια εκπομπής. ....                                                           | 32 |
| Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μετρήσεων κατά την είσοδο του συστήματος σε ένα μπάνιο με τρεχούμενο ζεστό νερό. ....                | 33 |
| Εικόνα 6.1: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική μελλοντικής επέκτασης σε περιβάλλον Cloud/IoT. ....                                | 37 |

# Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

## 1.1 Γενικό Πλαίσιο

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και των ενσωματωμένων συστημάτων έχει καταστήσει την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων μια διαδικασία άμεσα προσβάσιμη και εξαιρετικά σημαντική. Η διαρκής καταγραφή μεγεθών, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η συγκέντρωση Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (VOCs), χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε πληθώρα τομέων. Από τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των έξυπνων κτηρίων (Smart Homes) μέχρι τη διασφάλιση αυστηρών συνθηκών υγιεινής σε νοσοκομεία, βιομηχανικούς χώρους και θερμοκήπια, η ανάγκη για αξιόπιστα δεδομένα είναι αδιαμφισβήτητη.



Σχήμα 1.1: Τυπική αρχιτεκτονική ενός συστήματος παρακολούθησης IoT.

Στο επίκεντρο αυτών των συστημάτων βρίσκονται οι αισθητήρες. Η σύγχρονη βιομηχανία μικροηλεκτρονικής παρέχει αμέτρητες επιλογές: από εξαιρετικά προσιτές λύσεις που απευθύνονται σε ερασιτέχνες (open-source hardware), έως προηγμένους αισθητήρες τεχνολογίας Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (MEMS). Η σωστή επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα είναι το βήμα που καθορίζει την αξιοπιστία του τελικού συστήματος, αλλά και την πολυπλοκότητα που θα απαιτηθεί στον σχεδιασμό της πλακέτας (hardware) και του κώδικα (software).

## 1.2 Διατύπωση του Προβλήματος

Στην κοινότητα των ηλεκτρονικών μηχανικών και των κατασκευαστών (makers), αισθητήρες χαμηλού κόστους όπως οι DHT11 [6] και DHT22 [3] χρησιμοποιούνται σχεδόν καθολικά για την εκτίμηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Παρά την απλότητα στη διασύνδεσή τους, προκύπτουν συχνά σοβαρά ερωτήματα σχετικά με την πραγματική τους ακρίβεια, τη σταθερότητά τους στον χρόνο (aging drift) και την ανταπόκρισή τους σε απότομες κλιματικές αλλαγές (θερμική υστέρηση).

Στον αντίποδα, οι σύγχρονοι, βιομηχανικού επιπέδου αισθητήρες όπως ο Bosch BME680 [5], υπόσχονται μετρήσεις εργαστηριακής ακρίβειας, ενώ ενσωματώνουν ταυτόχρονα αισθητήρια βαρομετρικής πίεσης και ποιότητας αέρα. Το βασικό κενό που παρατηρείται στη διεθνή και εγχώρια βιβλιογραφία, και το οποίο φιλοδοξεί να καλύψει αυτή η εργασία, είναι η απουσία μιας άμεσης και αυστηρής συγκριτικής δοκιμής: πώς συμπεριφέρονται αυτοί οι αισθητήρες όταν τοποθετηθούν στην ίδια ακριβώς πλακέτα, κάτω από τις ίδιες μικροκλιματικές συνθήκες και διαβάζονται ταυτόχρονα από τον ίδιο μικροελεγκτή;

## 1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Ο πρωταρχικός σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και ο προγραμματισμός ενός πλήρως αυτόνομου σταθμού καταγραφής περιβαλλοντικών δεδομένων (Data Logger). Το σύστημα αυτό θα ενσωματώνει ταυτόχρονα τους αισθητήρες BME680, DHT22 και DHT11, επιτρέποντας την ακριβή συγκριτική τους αξιολόγηση.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, τέθηκαν οι εξής επιμέρους στόχοι:

1. Η ενδεδειγμένη βιβλιογραφική μελέτη των φυσικών αρχών λειτουργίας (θερμίστορ, χωρητικά στοιχεία, τεχνολογία MOX) και των ψηφιακών πρωτοκόλλων επικοινωνίας (I2C, Single-Bus).
2. Η επιλογή των βέλτιστων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (όπως ο ATmega328P, μονάδες MicroSD και οθόνες OLED) για τη συγκρότηση ενός σταθερού και αξιόπιστου κόμβου.
3. Η ηλεκτρονική σχεδίαση και κατασκευή μιας προσαρμοσμένης πλακέτας (Custom PCB), η οποία θα ελαχιστοποιεί τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο κατά τη δειγματοληψία.
4. Η ανάπτυξη ισχυρού λογισμικού (Firmware) σε γλώσσα C/C++ για τη λήψη, απεικόνιση και ασφαλή αποθήκευση των μετρήσεων χωρίς καθυστερήσεις (non-blocking code).
5. Η εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας και η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων για τον εντοπισμό των πραγματικών αποκλίσεων μεταξύ των αισθητήρων.

## **1.4 Δομή της Εργασίας**

Το τεύχος της εργασίας διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια. Στο 1ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο, το πρόβλημα και οι στόχοι. Στο 2ο Κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς το θεωρητικό υπόβαθρο των μετρήσεων και η λειτουργία των ψηφιακών πρωτοκόλλων. Το 3ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην τεχνική ανάλυση (hardware) των επιλεγμένων εξαρτημάτων. Στο 4ο Κεφάλαιο παρατίθεται η σχεδίαση του κυκλώματος (PCB) και η αρχιτεκτονική του κώδικα (Firmware). Το 5ο Κεφάλαιο αφορά την πειραματική διαδικασία και την παρουσίαση των γραφημάτων. Τέλος, το 6ο Κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα και προτείνει μελλοντικές προσθήκες στο σύστημα.

## **Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Παρόμοια Συστήματα**

### **2.1 Εισαγωγή**

Η ακριβής και αξιόπιστη μέτρηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων αποτελεί θεμελιώδη απαίτηση σε ένα ευρύτατο φάσμα σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών. Από τον βιομηχανικό αυτοματισμό, τα κέντρα δεδομένων (data centers) και τις έξυπνες γεωργικές καλλιέργειες (Smart Agriculture), έως τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους και τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC), η συνεχής καταγραφή κρίσιμων φυσικών μεγεθών καθορίζει την ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια των εγκαταστάσεων και την ανθρώπινη υγεία.

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών και των Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (MEMS) κατέστησε εφικτή τη μαζική παραγωγή αισθητήρων μικρού μεγέθους, χαμηλού κόστους και ελάχιστης κατανάλωσης ισχύος, οι οποίοι μπορούν εύκολα να διασυνδεθούν με σύγχρονους μικροελεγκτές. Ωστόσο, η αποτελεσματική ενσωμάτωση και αξιοποίησή τους προϋποθέτει τη σε βάθος κατανόηση τόσο των φυσικοχημικών φαινομένων μετατροπής της μετρούμενης ποσότητας σε ηλεκτρικό σήμα, όσο και των ψηφιακών πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της πληροφορίας.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά το θεωρητικό υπόβαθρο των αρχών λειτουργίας των αισθητήρων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs). Επιπρόσθετα, εξετάζονται σε επίπεδο φυσικού στρώματος και σηματοδότησης τα πρωτόκολλα επικοινωνίας I2C και Single-Bus (DHT), ενώ πραγματοποιείται συγκριτική επισκόπηση των υφιστάμενων βιομηχανικών και ανοικτού κώδικα (Open-Source Hardware) σταθμών μέτρησης.

### **2.2 Αρχές Μέτρησης Περιβαλλοντικών Παραμέτρων**

#### **2.2.1 Μέτρηση Θερμοκρασίας**

Η θερμοκρασία αποτελεί μια θεμελιώδη θερμοδυναμική παράμετρο που εκφράζει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων ενός σώματος ή του περιβάλλοντος αέρα. Στα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης, η μετατροπή της θερμοκρασίας σε αντίστοιχο ηλεκτρικό μέγεθος (τάση, ρεύμα ή αντίσταση) πραγματοποιείται κυρίως μέσω δύο κυρίαρχων τεχνολογιών:

## 1. Θερμίστορ Αρνητικού Συντελεστή Θερμοκρασίας (NTC Thermistors)

Τα θερμίστορ NTC είναι κεραμικοί ημιαγωγοί των οποίων η ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω της θερμικής διέγερσης φορέων φορτίου στη ζώνη αγωγιμότητας. Η εξαιρετικά μη-γραμμική σχέση μεταξύ της αντίστασης R (σε Ohms) και της απόλυτης θερμοκρασίας T (σε Kelvin) μοντελοποιείται με υψηλή ακρίβεια από την εμπειρική εξίσωση Steinhart-Hart [1]:

$$1 / T = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3 \quad (2.1)$$

όπου A, B, και C είναι πειραματικά προσδιορισμένοι συντελεστές βαθμονόμησης που εξαρτώνται από τη σύνθεση του ημιαγωγού [1]. Τα θερμίστορ NTC (όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες DHT11 [6] και DHT22 [3]) διακρίνονται για την υψηλή ευαισθησία και τη χαμηλή θερμική μάζα, απαιτούν όμως γραμμικοποίηση και επεξεργασία μέσω Αναλογικοψηφιακού Μετατροπέα (ADC).

## 2. Αισθητήρες Ημιαγωγού (Solid-State / Silicon Bandgap Temperature Sensors)

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη φυσική συμπεριφορά μιας επαφής p-n πυριτίου (όπως ένα διπολικό τρανζίστορ BJT). Όταν η επαφή πολώνεται από δύο σταθερά και γνωστά ρεύματα διαφορετικής πυκνότητας, η διαφορά των τάσεων βάσης-εκπομπού ( $\Delta V_{BE}$ ) είναι απολύτως γραμμική συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας (Proportional to Absolute Temperature - PTAT):

$$\Delta V_{BE} = (k \cdot T / q) \cdot \ln(I_1 / I_2) \quad (2.2)$$

όπου k η σταθερά του Boltzmann, q το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $I_1 / I_2$  ο λόγος των ρευμάτων πόλωσης. Αυτή η μέθοδος ενσωματώνεται στον αισθητήρα Bosch BME680 [5], προσφέροντας εξαιρετική γραμμικότητα, αυτόματη αντιστάθμιση και ψηφιοποίηση 20-bit χωρίς απαίτηση εξωτερικών κυκλωμάτων αντιστάθμισης.

### 2.2.2 Μέτρηση Σχετικής Υγρασίας

Η Σχετική Υγρασία (Relative Humidity - RH) ορίζεται ως ο λόγος της μερικής πίεσης των υδρατμών (e) που περιέχονται στον αέρα προς την πίεση κορεσμού των υδρατμών ( $e_s$ ) στην ίδια θερμοκρασία και πίεση, εκφρασμένος επί τοις εκατό (%):

$$RH = (e / e_s) \times 100\% \quad (2.3)$$

Η κυρίαρχη τεχνική ψηφιακής μέτρησης σχετικής υγρασίας είναι η **χωρητική μέθοδος (capacitive humidity sensing)**:

- Ο αισθητήρας αποτελείται από έναν μικροπυκνωτή παράλληλων πλακών, στον οποίο το διηλεκτρικό μέσο αποτελείται από ένα υγροσκοπικό πολυμερές φιλμ πάχους λίγων μικρομέτρων.
- Καθώς η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος μεταβάλλεται, το πολυμερές απορροφά ή απελευθερώνει μόρια νερού μέσω διάχυσης.
- Επειδή η διηλεκτρική σταθερά του νερού ( $\epsilon_r \approx 80$  στους  $20^\circ\text{C}$ ) είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική σταθερά του ξηρού πολυμερούς ( $\epsilon_r \approx 2-5$ ), η συνολική χωρητικότητα  $C$  του πυκνωτή μεταβάλλεται γραμμικά και αναλογικά με τη σχετική υγρασία:

$$C(RH) = C_0 \cdot (1 + \alpha \cdot RH) \quad (2.4)$$

- Ένα εσωτερικό κύκλωμα ταλαντωτή (relaxation oscillator) μετατρέπει τη χωρητικότητα σε συχνότητα ή τάση, η οποία μετράται από τον ενσωματωμένο μικροελεγκτή του αισθητήρα [3, 5, 6].

### 2.2.3 Μέτρηση Ατμοσφαιρικής Πίεσης

Η ατμοσφαιρική πίεση εκφράζει το βάρος της στήλης του αέρα που ασκείται ανά μονάδα επιφάνειας. Στα σύγχρονα ολοκληρωμένα συστήματα, η μέτρηση πραγματοποιείται μέσω **πιεζοαντιστατικών αισθητήρων τεχνολογίας MEMS** (όπως ο Bosch BME680 [5]):

- Μια εξαιρετικά λεπτή και εύκαμπτη μεμβράνη μονοκρυσταλλικού πυριτίου δημιουργείται μέσω μικρομηχανικής επεξεργασίας πάνω από μια ερμητικά σφραγισμένη κοιλότητα αναφοράς (high vacuum reference cavity).
- Στην επιφάνεια της μεμβράνης έχουν κατασκευαστεί τέσσερις πιεζοαντιστάσεις συνδεδεμένες σε τοπολογία πλήρους γέφυρας Wheatstone.
- Όταν η εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση μεταβάλλεται, η μεμβράνη κάμπτεται, προκαλώντας μηχανική τάση (stress) στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου.
- Μέσω του πιεζοαντιστατικού φαινομένου, η μηχανική τάση μεταβάλλει την ηλεκτρική αντίσταση των στοιχείων της γέφυρας, παράγοντας μια διαφορική τάση εξόδου ( $\Delta V$ ) ανάλογη της πίεσης:

$$\Delta V = V_{in} \cdot (\Delta R / R) \propto P_{atm} \quad (2.5)$$

- Το σήμα αυτό ενισχύεται από προενισχυτή χαμηλού θορύβου και μετατρέπεται σε ψηφιακή τιμή από έναν ADC υψηλής ανάλυσης 20-bit [5].

#### 2.2.4 Ανίχνευση Πτητικών Οργανικών Ενώσεων (VOCs) & Ποιότητας Αέρα

Οι Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (Volatile Organic Compounds - VOCs) αποτελούν χημικές ουσίες με υψηλή τάση ατμών σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος (όπως αιθανόλη, ακετόνη, φορμαλδεΐδη, βενζόλιο κ.ά.), οι οποίες εκλύονται από συνθετικά υλικά, διαλύτες και ανθρώπινες δραστηριότητες επιβαρύνοντας το κλειστό περιβάλλον.

Η ανίχνευσή τους από τον αισθητήρα Bosch BME680 [5] βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του **Ημιαγωγού Μεταλλικού Οξειδίου (Metal-Oxide Semiconductor - MOX)**:

1. **Θερμαντικό Στοιχείο (Hot Plate):** Ένας μικρο-αντιστάτης MEMS θερμαίνει ελεγχόμενα την ενεργή επιφάνεια του αισθητήρα σε θερμοκρασίες μεταξύ 200°C και 400°C [5].
2. **Προσρόφηση Οξυγόνου:** Σε περιβάλλον καθαρού αέρα, τα μόρια οξυγόνου προσροφώνται στην επιφάνεια του οξειδίου του κασσιτέρου ( $\text{SnO}_2$ ), δεσμεύοντας ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και σχηματίζοντας αρνητικά ιόντα οξυγόνου ( $\text{O}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$ ). Αυτό δημιουργεί ένα επιφανειακό φράγμα δυναμικού που αυξάνει σημαντικά την ηλεκτρική αντίσταση της επιφάνειας (υψηλό  $R_{\text{gas}}$ ).
3. **Αντίδραση με Αναγωγικά Αέρια:** Όταν πτητικά αέρια (VOCs) έρθουν σε επαφή με τη θερμή επιφάνεια, οξειδώνονται αντιδρώντας με τα προσροφημένα ιόντα οξυγόνου. Η αντίδραση αυτή απελευθερώνει τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια πίσω στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού, οδηγώντας σε άμεση **μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_{\text{gas}}$**  του αισθητήρα [5].
4. **Υπολογισμός Δείκτη IAQ:** Η τιμή της αντίστασης  $R_{\text{gas}}$  (σε Ohms), σε συνδυασμό με τις ταυτόχρονες μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, τροφοδοτείται στον αλγόριθμο λογισμικού Bosch BSEC, εξάγοντας τον σταθμισμένο δείκτη Ποιότητας Εσωτερικού Αέρα (Indoor Air Quality Index - IAQ) σε κλίμακα από 0 (εξαιρετική ποιότητα) έως 500 (εξαιρετικά ρυπασμένος αέρας) [5].

### 2.3 Πρωτόκολλα Ψηφιακής Επικοινωνίας Αισθητήρων & Περιφερειακών

#### 2.3.1 Το Πρωτόκολλο I2C (Inter-Integrated Circuit)

Το πρωτόκολλο I2C [2] αποτελεί ένα σύγχρονο, ημι-αμφίδρομο (half-duplex) σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας δύο συρμάτων. Αναπτύχθηκε για τη διασύνδεση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε μικρές φυσικές αποστάσεις πάνω στην ίδια πλακέτα.

### Αρχιτεκτονική Αγωγών & Διάταξη Open-Drain

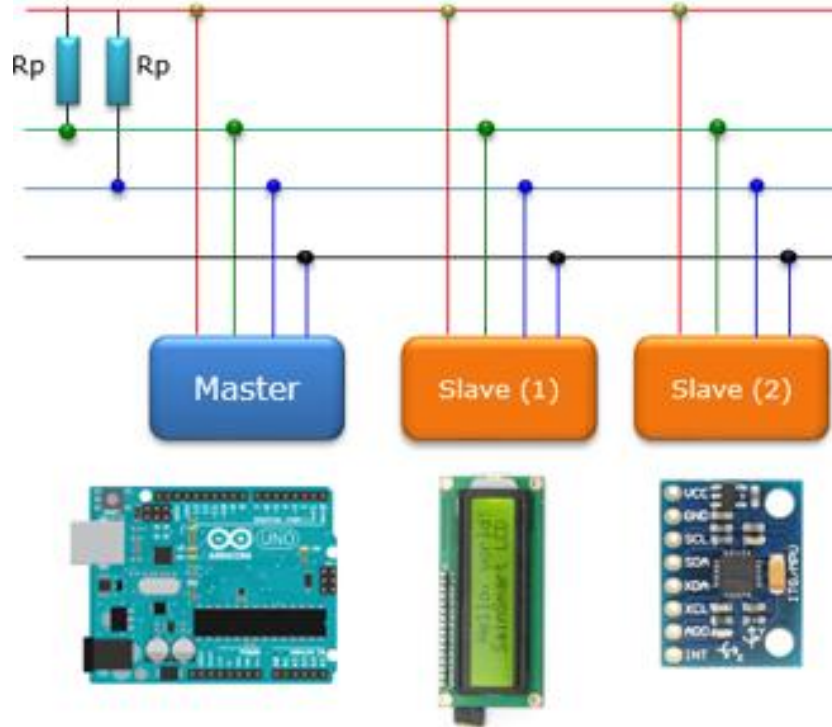
Το I2C χρησιμοποιεί αποκλειστικά δύο γραμμές σήματος [2]:

- **SCL (Serial Clock):** Γραμμή παλμών ρολογιού συγχρονισμού, την οποία οδηγεί πάντοτε η δεσπόζουσα συσκευή (Master - Arduino Nano [4]).
- **SDA (Serial Data):** Αμφίδρομη γραμμή σειριακής μεταφοράς δεδομένων και διευθύνσεων.

Και οι δύο αγωγοί είναι διαμορφωμένοι σε τοπολογία ανοικτού συλλέκτη/ανοικτής απορροής (Open-Collector / Open-Drain). Αυτό σημαίνει ότι οι συνδεδεμένες συσκευές μπορούν μόνο να οδηγήσουν τη γραμμή σε λογικό μηδέν (LOW/GND). Για τη μετάβαση σε λογικό ένα (HIGH/VCC) απαιτούνται δύο εξωτερικές αντιστάσεις ανύψωσης (Pull-up Resistors  $R_p$ , τυπικής τιμής 2.2 k $\Omega$  έως 4.7 k $\Omega$  συνδεδεμένες στη γραμμή τροφοδοσίας) [2].

### Διευθυνσιοδότηση και Πολυπλεξία στο ίδιο Bus

Κάθε υποτελής συσκευή (Slave) διαθέτει μια μοναδική διεύθυνση 7-bit [2]. Αυτό επιτρέπει τη διασύνδεση πολλών διαφορετικών περιφερειακών παράλληλα στις ίδιες ακριβώς ακίδες (A4/SDA και A5/SCL του Arduino Nano [4]). Στη σχεδίαση της παρούσας εργασίας, ο αισθητήρας Bosch BME680 (διεύθυνση I2C 0x76 [5]) και η οθόνη OLED 0.96" (διεύθυνση I2C 0x3C [8]) συνυπάρχουν αρμονικά στον ίδιο δίαυλο χωρίς ανάγκη πρόσθετων ακίδων ελέγχου.



Σχήμα 2.1: Παράλληλη συνδεσμολογία αισθητήρων όπως του BME680 και οθόνες OLED στον διάλογο I2C.

### Δομή Πλαισίου Μετάδοσης (I2C Frame Format)

Η επικοινωνία I2C ακολουθεί αυστηρό πρωτόκολλο καταστάσεων [2]:

1. **Συνθήκη Έναρξης (START Condition):** Η γραμμή SDA μεταβαίνει από HIGH σε LOW ενώ η SCL παραμένει HIGH.
2. **Αποστολή Διεύθυνσης (Address Byte):** Μετάδοση των 7 bits της διεύθυνσης του Slave, ακολουθούμενα από 1 bit κατεύθυνσης (R/W: 0 για εγγραφή, 1 για ανάγνωση).
3. **Bit Επιβεβαίωσης (ACK/NACK):** Η συσκευή-δέκτης επιβεβαιώνει τη λήψη τραβώντας τη γραμμή SDA σε στάθμη LOW κατά τον 9ο παλμό ρολογιού (Acknowledge).
4. **Μεταφορά Δεδομένων (Data Bytes):** Μετάδοση σειρών των 8 bits δεδομένων με αντίστοιχο ACK μετά από κάθε byte.
5. **Συνθήκη Τερματισμού (STOP Condition):** Η γραμμή SDA μεταβαίνει από LOW σε HIGH ενώ η SCL παραμένει HIGH, ελευθερώνοντας τον διάλογο.

### 2.3.2 Το Πρωτόκολλο Single-Bus / Custom One-Wire (DHT Sensors)

Οι ψηφιακοί αισθητήρες DHT11 [6] και DHT22 (AM2302) [3] χρησιμοποιούν ένα ιδιοπαγές, ασύγχρονο σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας ενός σύρματος (Single-Bus). Σε αντίθεση με το βιομηχανικό πρότυπο 1-Wire της Maxim/Dallas, το πρωτόκολλο Single-Bus δεν υποστηρίζει διευθυνσιοδότηση πολλαπλών αισθητήρων στο ίδιο καλώδιο, απαιτώντας ξεχωριστή ψηφιακή ακίδα GPIO για κάθε αισθητήρα.

#### Διαδικασία Χρονισμού & Σηματοδοσίας (Handshake Phase)

Η επικοινωνία ελέγχεται χρονικά σε επίπεδο μικροδευτερολέπτων ( $\mu s$ ) [3, 6]:

- **Σήμα Εκκίνησης (Start Signal):** Η γραμμή βρίσκεται σε ηρεμία HIGH μέσω εξωτερικής αντίστασης pull-up ( $4.7\text{ k}\Omega$ – $10\text{ k}\Omega$ ). Ο μικροελεγκτής τραβάει τη γραμμή σε στάθμη LOW για τουλάχιστον 18 ms (DHT11) ή 1–10 ms (DHT22) και στη συνέχεια την ελευθερώνει.
- **Απόκριση Αισθητήρα (Sensor Response):** Ο αισθητήρας ανιχνεύει το σήμα εκκίνησης, κρατάει τη γραμμή LOW για 80  $\mu s$  και ακολούθως την οδηγεί σε HIGH για άλλα 80  $\mu s$ , υποδεικνύοντας ότι είναι έτοιμος για μετάδοση δεδομένων.

#### Κωδικοποίηση Δεδομένων (Pulse Width Modulation)

Ο αισθητήρας αποστέλλει ένα ψηφιακό πλαίσιο συνολικού μήκους 40 bits (5 bytes) [3, 6]. Κάθε bit ξεκινά υποχρεωτικά με έναν παλμό LOW διάρκειας 50  $\mu s$ . Η τιμή του bit (0 ή 1) κωδικοποιείται από τη διάρκεια του επόμενου παλμού HIGH:

- **Λογικό '0':** Διάρκεια παλμού HIGH μεταξύ 26  $\mu s$  και 28  $\mu s$ .
- **Λογικό '1':** Διάρκεια παλμού HIGH περίπου 70  $\mu s$ .

#### Δομή Πληροφορίας & Έλεγχος Ακεραιότητας (Checksum)

Τα 40 bits κατανέμονται σε 5 bytes ως εξής [3, 6]:

- **Byte 1:** Ακέραιο μέρος Σχετικής Υγρασίας (RH\_int).
- **Byte 2:** Δεκαδικό μέρος Σχετικής Υγρασίας (RH\_dec) — στον DHT11 είναι πάντοτε 0.
- **Byte 3:** Ακέραιο μέρος Θερμοκρασίας (T\_int).
- **Byte 4:** Δεκαδικό μέρος Θερμοκρασίας (T\_dec) — στον DHT11 είναι πάντοτε 0.
- **Byte 5:** Άθροισμα Ελέγχου (Checksum Byte).

Η ακεραιότητα των ληφθέντων δεδομένων επαληθεύεται μέσω της μαθηματικής σχέσης [3, 6]:

$$Checksum = (Byte\ 1 + Byte\ 2 + Byte\ 3 + Byte\ 4) \bmod 256 \quad (2.6)$$

Εάν το υπολογισμένο άθροισμα των τεσσάρων πρώτων bytes ταυτίζεται με το 5ο byte, τα δεδομένα θεωρούνται έγκυρα. Σε αντίθετη περίπτωση, απορρίπτονται λόγω σφάλματος μετάδοσης.

## **2.4 Παρόμοια Συστήματα & Σταθμοί Μέτρησης Περιβάλλοντος**

Η ανάγκη για περιβαλλοντική παρακολούθηση έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ευρείας γκάμας συστημάτων, τα οποία διακρίνονται παραδοσιακά σε δύο κύριες κατηγορίες:

### **2.4.1 Βιομηχανικοί Σταθμοί Παρακολούθησης Κλίματος**

Οι επαγγελματικοί και μετεωρολογικοί σταθμοί (όπως τα συστήματα των οίκων Vaisala και Campbell Scientific) είναι κατασκευασμένοι για μέγιστη ακρίβεια, σταθερότητα και αντοχή σε ακραίες εξωτερικές συνθήκες. Χρησιμοποιούν αισθητήρια στοιχεία αναφοράς (π.χ. θερμόμετρα αντίστασης πλατίνας PT100/PT1000 Class A, οπτικά υγρόμετρα chilled mirror) και βιομηχανικά πρωτόκολλα επικοινωνίας (RS-485, Modbus RTU). Παρότι προσφέρουν κορυφαία αξιοπιστία, το εξαιρετικά υψηλό κόστος κτήσης και συντήρησης (που συχνά ανέρχεται σε χιλιάδες ευρώ) καθιστά απαγορευτική τη χρήση τους σε πυκνά δίκτυα παρακολούθησης ή σε έργα περιορισμένου προϋπολογισμού.

### **2.4.2 Οικιακοί Σταθμοί IoT Χαμηλού Κόστους**

Με την εξάπλωση των πλατφορμών Ανοικτού Υλικού (όπως το Arduino, το ESP8266 και το ESP32), έχει αναπτυχθεί πλήθος ιδιοκατασκευών για σταθμούς μέτρησης καιρού και ποιότητας αέρα. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν προσιτό κόστος και εξαιρετικά εύκολη διασύνδεση στο Cloud. Ωστόσο, στην πλειονότητά τους βασίζονται στην αξιωματική παραδοχή ότι οι οικονομικοί αισθητήρες (όπως οι DHT11 και DHT22) παρέχουν έγκυρα δεδομένα, χωρίς να έχει προηγηθεί συστηματική πειραματική αξιολόγηση και σύγκρισή τους με πολυπαραμετρικούς αισθητήρες ακριβείας (όπως ο Bosch BME680).

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να καλύψει αυτό ακριβώς το ερευνητικό κενό, υλοποιώντας μια ενιαία πλακέτα φορέα (Custom PCB) για τη σύγχρονη, ισότιμη και αμερόληπτη σύγκριση των τριών αισθητήρων υπό ταυτόσημες περιβαλλοντικές συνθήκες.

## **2.5 Επίλογος Κεφαλαίου**

Στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το φυσικοχημικό και θεωρητικό υπόβαθρο των αρχών μέτρησης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και ποιότητας αέρα (VOCs). Αναλύθηκαν σε βάθος τα ψηφιακά πρωτόκολλα I2C και Single-Bus σε επίπεδο αρχιτεκτονικής σημάτων, χρονισμών και ακεραιότητας δεδομένων, ενώ τεκμηριώθηκε η ανάγκη για τη συγκριτική πειραματική αξιολόγηση των αισθητήρων. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν τη θεωρητική βάση για την τεχνική ανάλυση των εξαρτημάτων υλικού που θα ακολουθήσει στο 3ο κεφάλαιο.

## **Κεφάλαιο 3ο: Αναλυτική Παρουσίαση Εξαρτημάτων Υλικού (Hardware)**

### **3.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά τα επιμέρους εξαρτήματα υλικού (hardware) που επιλέχθηκαν για τη σύνθεση του σταθμού μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η σχεδίαση ενός αξιόπιστου ενσωματωμένου συστήματος (embedded system) απαιτεί την προσεκτική επιλογή των υποσυστημάτων του, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη συνεργασία μεταξύ του μικροελεγκτή, των αισθητήρων και των περιφερειακών μονάδων αποθήκευσης και απεικόνισης. Η επιλογή των συγκεκριμένων αισθητήρων (Bosch BME680 [5], DHT22 [3], DHT11 [6]) δεν έγινε τυχαία, αλλά με γνώμονα τη δημιουργία μιας κλιμακωτής διάταξης δοκιμών. Στόχος είναι η παράλληλη λειτουργία αισθητήρων διαφορετικών γενεών, κόστους και τεχνολογίας κατασκευής, ώστε να καταστεί εφικτή η πειραματική σύγκρισή τους. Παράλληλα, εξετάζονται σε βάθος τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, η εσωτερική τους αρχιτεκτονική, οι απαιτήσεις τους σε ρεύμα και οι περιορισμοί που επιβάλλουν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας τους στον κύριο μικροελεγκτή.

### **3.2 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου: Arduino Nano (ATmega328P)**

Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας αποτελεί τον πυρήνα κάθε συστήματος λήψης δεδομένων (Data Acquisition System - DAQ). Για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας επιλέχθηκε η πλακέτα ανάπτυξης Arduino Nano. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στο εξαιρετικά μικρό της μέγεθος (form factor), το οποίο ευνοεί την κατασκευή συμπαγών συστημάτων (compact IoT nodes), και στην πλήρη υποστήριξή της από ένα τεράστιο οικοσύστημα βιβλιοθηκών ανοικτού κώδικα [4].

#### **3.2.1 Αρχιτεκτονική Μικροελεγκτή ATmega328P**

Στην καρδιά του Arduino Nano βρίσκεται ο μικροελεγκτής 8-bit ATmega328P της Microchip (πρώην Atmel), ο οποίος βασίζεται σε αρχιτεκτονική RISC (Reduced Instruction Set Computer) τύπου Harvard [4]. Η αρχιτεκτονική Harvard διαχωρίζει φυσικά τη μνήμη προγράμματος (Flash) από τη μνήμη δεδομένων (SRAM), επιτρέποντας την ταυτόχρονη προσπέλαση εντολών και δεδομένων, γεγονός που μεγιστοποιεί την ταχύτητα εκτέλεσης σε 1 MIPS ανά MHz χρονισμού. Το Arduino Nano λειτουργεί με εξωτερικό κρύσταλλο ταλαντωτή στα 16 MHz, παρέχοντας επαρκή υπολογιστική ισχύ για την επεξεργασία των περιβαλλοντικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [4].

### 3.2.2 Κατανομή Μνήμης και Περιορισμοί

Η διαχείριση της μνήμης στον ATmega328P αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στην ανάπτυξη πολύπλοκων συστημάτων IoT. Η συσκευή διαθέτει [4]:

- Flash Memory (32 KB): Είναι μη πτητική μνήμη όπου αποθηκεύεται ο μεταγλωττισμένος κώδικας (firmware). Περίπου 2 KB δεσμεύονται από τον Bootloader, αφήνοντας 30 KB διαθέσιμα για το πρόγραμμα. Η ενσωμάτωση βαριών βιβλιοθηκών (όπως η BSEC της Bosch [5] και η βιβλιοθήκη SD [7]) καταναλώνει σημαντικό ποσοστό αυτής της μνήμης.
- SRAM (2 KB): Η στατική μνήμη τυχαίας προσπέλασης είναι πτητική και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση δυναμικών μεταβλητών κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Λόγω του εξαιρετικά περιορισμένου μεγέθους της (μόλις 2048 bytes), απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή διαρροών μνήμης (memory leaks) και στην κατασκευή μεγάλων πινάκων, καθώς η εξάντλησή της οδηγεί σε ασταθή συμπεριφορά και επανεκκινήσεις [4].
- EEPROM (1 KB): Μη πτητική μνήμη που επιτρέπει την αποθήκευση μικρού όγκου δεδομένων, όπως ρυθμίσεις χρήστη ή δεδομένα βαθμονόμησης [4].

### 3.2.3 Τροφοδοσία και Ενσωματωμένα Κυκλώματα

Το Arduino Nano διαθέτει ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης (LDO Voltage Regulator) που επιτρέπει την τροφοδοσία του μέσω της ακίδας VIN με τάσεις από 7V έως 12V, υποβιβάζοντας και σταθεροποιώντας την τάση στα 5V για τη λειτουργία του μικροελεγκτή. Διαθέτει 14 ψηφιακές ακίδες εισόδου/εξόδου (GPIOs), εκ των οποίων οι 6 υποστηρίζουν PWM, και 8 αναλογικές εισόδους συνδεδεμένες σε έναν Πολυπλέκτη 10-bit ADC [4]. Στην παρούσα διάταξη, κρίσιμη είναι η χρήση των ακίδων που υποστηρίζουν υλικές διακοπές (Hardware Interrupts - ακίδες D2, D3) και οι δίαυλοι επικοινωνίας I2C [2] και SPI [7].

## 3.3 Ψηφιακός Αισθητήρας Ποιότητας Αέρα Bosch BME680

### 3.3.1 Φιλοσοφία Σχεδίασης και MEMS Τεχνολογία

Ο αισθητήρας BME680 της Bosch Sensortec αποτελεί την αιχμή της τεχνολογίας στα Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (MEMS). Πρόκειται για έναν πολυπαραμετρικό (4-σε-1) αισθητήρα, ο οποίος στεγάζεται σε ένα μεταλλικό περίβλημα LGA διαστάσεων μόλις 3.0 x 3.0 x 0.93 mm [5]. Η ικανότητά του να μετρά ταυτόχρονα τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τη βαρομετρική πίεση και τις συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), τον καθιστά ιδανικό ως αισθητήρα αναφοράς (reference sensor) στην παρούσα μελέτη [5].

### 3.3.2 Αρχές Ανίχνευσης ανά Παράμετρο

Η λειτουργία του BME680 διαχωρίζεται στα επιμέρους αισθητήρια στοιχεία που ενσωματώνει [5]:

- Αισθητήρας Πίεσης: Βασίζεται στην πιεζοαντιστατική αρχή. Μια μεμβράνη πυριτίου κάμπτεται ανάλογα με την ατμοσφαιρική πίεση, μεταβάλλοντας την αντίσταση μιας ενσωματωμένης γέφυρας Wheatstone, με ψηφιοποίηση από 20-bit ADC και ακρίβεια  $\pm 0.6$  hPa [5].
- Αισθητήρας Υγρασίας: Χρησιμοποιεί ένα πολυμερές διηλεκτρικό στρώμα (χωρητικός αισθητήρας) με χρόνο απόκρισης  $\sim 8$  δευτερόλεπτα και ακρίβεια  $\pm 3\%$  RH [5].
- Αισθητήρας Θερμοκρασίας: Προσφέρει χαμηλό θόρυβο και υψηλή ανάλυση (έως  $0.01^{\circ}\text{C}$ ). Η τιμή του χρησιμοποιείται εσωτερικά για την αντιστάθμιση (temperature compensation) των μετρήσεων πίεσης και υγρασίας [5].

### 3.3.3 Ο Αισθητήρας Αερίων (MOX) και η Βιβλιοθήκη BSEC

Η καινοτομία του BME680 έγκειται στην ενσωμάτωση του αισθητήρα αερίων τεχνολογίας MOX (Metal-Oxide Semiconductor). Ο ενσωματωμένος μικρο-θερμαντήρας (micro-hotplate) αυξάνει τη θερμοκρασία της επιφάνειας πάνω από τους  $300^{\circ}\text{C}$ , όπου τα αέρια VOCs οξειδώνονται, μεταβάλλοντας δραστικά την ηλεκτρική αντίσταση του υλικού ( $R_{\text{gas}}$ ) [5].

Για την εξαγωγή του Δείκτη Ποιότητας Αέρα (IAQ Index, κλίμακα 0–500), χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη κλειστού κώδικα BSEC (Bosch Software Environmental Cluster), η οποία εφαρμόζει μοντέλα μηχανικής μάθησης στον μικροελεγκτή, καταναλώνοντας ωστόσο πάνω από 1.2 KB μνήμης SRAM [5].

## 3.4 Ψηφιακοί Αισθητήρες Οικογένειας DHT

Η σειρά αισθητήρων DHT αποτελεί μια από τις δημοφιλέστερες επιλογές στον χώρο του Open-Source Hardware λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας χρήσης, παράγοντας ψηφιακό σήμα χωρίς ανάγκη πολύπλοκων εξωτερικών κυκλωμάτων (ADCs, ενισχυτές). Ωστόσο, υπάρχουν δομικές διαφορές μεταξύ των μοντέλων της σειράς.

### 3.4.1 DHT22 (AM2302): Υψηλή Ανάλυση και Χωρητική Μέτρηση

Ο DHT22 ενσωματώνει εσωτερικό 8-bit μικροελεγκτή και χωρητικό αισθητήριο υγρασίας (capacitive polymer), μετρώντας υγρασία 0%–100% RH με ανάλυση 0.1% και ακρίβεια  $\pm 2\%$  [3]. Για τη θερμοκρασία χρησιμοποιεί θερμίστορ NTC ( $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $+80^{\circ}\text{C}$ ). Ο ρυθμός δειγματοληψίας

του περιορίζεται αυστηρά σε μέγιστο 0.5 Hz (1 μέτρηση ανά 2 δευτερόλεπτα) για την αποφυγή σφαλμάτων από εσωτερική αυτοθέρμανση (self-heating effect) [3].

### **3.4.2 DHT11: Περιορισμοί Τεχνολογίας Αντιστατικού Πολυμερούς**

Ο DHT11 αποτελεί το οικονομικό μοντέλο της σειράς και χρησιμοποιεί αντιστατικό στοιχείο υγρασίας αντί για χωρητικό [6]. Δεν διαθέτει δεκαδική ανάλυση (επιστρέφει μόνο ακέραιες τιμές), περιορίζεται σε θερμοκρασίες 0°C έως 50°C με σφάλμα  $\pm 2^\circ\text{C}$  και εύρος υγρασίας 20%–90% RH [6]. Χρησιμοποιείται στην εργασία αποκλειστικά για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης (benchmarking) της απόκλισής του έναντι του BME680.

### **3.4.3 Πρωτόκολλο Επικοινωνίας Single-Bus**

Και οι δύο αισθητήρες DHT χρησιμοποιούν το ιδιοταγές πρωτόκολλο Single-Bus [3, 6]. Η μετάδοση περιλαμβάνει πλαίσιο 40 bits (5 bytes), όπου τα δεδομένα κωδικοποιούνται βάσει της διάρκειας παλμού (Pulse Width Modulation) υψηλής στάθμης (~26-28  $\mu\text{s}$  για το '0' και ~70  $\mu\text{s}$  για το '1'), ενώ περιλαμβάνεται και byte ελέγχου ακεραιότητας (Checksum) [3, 6].

## **3.5 Περιφερειακές Μονάδες Καταγραφής και Απεικόνισης**

### **3.5.1 Διασύνδεση με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή και Σειριακή Επικοινωνία (UART)**

Η συλλογή και η καταγραφή των περιβαλλοντικών δεδομένων της διάταξης πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο μέσω απευθείας ενσύρματης διασύνδεσης με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή (Η/Υ). Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιείται το ενσωματωμένο περιφερειακό UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) του μικροελεγκτή ATmega328P.

Στην πλακέτα του Arduino Nano, η σειριακή επικοινωνία (μέσω των ψηφιακών ακίδων RX/D0 και TX/D1) μετατρέπεται σε πρωτόκολλο USB μέσω ενός ενσωματωμένου ολοκληρωμένου κυκλώματος γέφυρας (USB-to-Serial converter). Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία με τον υπολογιστή χρησιμοποιώντας ένα τυπικό καλώδιο USB, το οποίο ταυτόχρονα εξυπηρετεί και τις ενεργειακές απαιτήσεις (τροφοδοσία 5V) του σταθμού.

Η σειριακή θύρα αναλαμβάνει έναν διττό και εξαιρετικά κρίσιμο ρόλο κατά τη λειτουργία του συστήματος:

- **Αποσφαλμάτωση (Debugging):** Κατά τη φάση της εκκίνησης και της λειτουργίας, ο μικροελεγκτής εκτυπώνει μηνύματα κατάστασης (status messages). Αυτό επιτρέπει την παρακολούθηση της σωστής αρχικοποίησης του διαύλου I2C, την επιβεβαίωση της απόκρισης των αισθητήρων DHT μέσω του Single-Bus, καθώς και τον έλεγχο της κατάστασης βαθμονόμησης του αλγορίθμου BSEC του αισθητήρα BME680. Οποιαδήποτε αστοχία υλικού εντοπίζεται άμεσα.
- **Καταγραφή Δεδομένων (Data Logging):** Οι παραγόμενες τιμές θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και ποιότητας αέρα (IAQ) μεταδίδονται σειριακά στον υπολογιστή σε δομημένη μορφή. Τυπικά, τα δεδομένα εξάγονται ως τιμές διαχωρισμένες με κόμμα (μορφότυπος CSV). Μέσω κατάλληλου λογισμικού λήψης στον Η/Υ (όπως το Serial Monitor ή εξειδικευμένα προγράμματα καταγραφής θερματικού), η ροή των δεδομένων αποθηκεύεται σε αρχεία για τη μετέπειτα γραφική απεικόνιση και στατιστική ανάλυση των αποκλίσεων μεταξύ των αισθητήρων.
- Η στρατηγική επιλογή της εξωτερικής καταγραφής μέσω υπολογιστή, αντί της χρήσης τοπικής κάρτας αποθήκευσης (π.χ. MicroSD) [7], απαλλάσσει τον μικροελεγκτή από την ανάγκη διαχείρισης πολύπλοκων συστημάτων αρχείων (FAT). Αυτό εξοικονομεί πολύτιμους πόρους από την ιδιαίτερα περιορισμένη μνήμη SRAM (2 KB) του ATmega328P, η οποία ήδη επιβαρύνεται σημαντικά από τις απαιτήσεις διαχείρισης της οθόνης OLED και της βιβλιοθήκης ελέγχου του αισθητήρα MOX.

### 3.5.2 Οθόνη Απεικόνισης OLED 0.96" I2C

Η τοπική προβολή γίνεται μέσω μονόχρωμης οθόνης OLED διαγωνίου 0.96 ιντσών, με ελεγκτή SSD1306 και ανάλυση  $128 \times 64$  pixels [8]. Συνδέεται στον δίαυλο I2C στη διεύθυνση 0x3C, λειτουργώντας παράλληλα στον ίδιο δίαυλο με τον BME680 (0x76) χωρίς διευθυντικές διενέξεις [2, 5, 8].

### 3.5.3 Διεπαφές Εισόδου και Διαχείριση Debouncing

Η αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα γίνεται μέσω απλών διακοπών (Push Buttons). Ωστόσο, οι μηχανικοί διακόπτες πάσχουν από το φαινόμενο της αναπήδησης επαφών (Contact Bouncing), το οποίο απαιτεί προσεκτική διαχείριση:

- Μπουτόν Επαναφοράς (Reset Button): Συνδέεται απευθείας στην ακίδα RESET του ATmega328P για υλική επανεκκίνηση του συστήματος [4].
- Μπουτόν Επιλογής (Action Button): Συνδέεται στην ακίδα D2 (Hardware Interrupts) [4]. Για την αποφυγή του φαινομένου αναπήδησης των μηχανικών επαφών, εφαρμόζεται λογισμικό φιλτράρισμα (Software Debouncing) με καθυστέρηση 50–100 ms, εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη αλλαγή σελίδων στην οθόνη OLED.

### 3.6 Συγκριτικός Πίνακας Τεχνικών Προδιαγραφών Αισθητήρων

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των τριών αισθητήρων βάσει των επίσημων τεχνικών φυλλαδίων (datasheets) [3, 5, 6].

Πίνακας 3.1: Συγκριτικός πίνακας τεχνικών προδιαγραφών και ορίων λειτουργίας των αισθητήρων BME680 [5], DHT22 [3] και DHT11 [6].

| Χαρακτηριστικό           | Bosch BME680          | DHT22 (AM2302)      | DHT11             |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| Εύρος Θερμοκρασίας       | -40°C έως +85°C [5]   | -40°C έως +80°C [3] | 0°C έως +50°C [6] |
| Ακρίβεια Θερμοκρασίας    | ±0.5°C [5]            | ±0.5°C [3]          | ±2.0°C [6]        |
| Ανάλυση Θερμοκρασίας     | 0.01°C [5]            | 0.1°C [3]           | 1.0°C [6]         |
| Εύρος Υγρασίας           | 0% έως 100% [5]       | 0% έως 100% [3]     | 20% έως 90% [6]   |
| Ακρίβεια Υγρασίας        | ±3% RH [5]            | ±2% RH [3]          | ±5% RH [6]        |
| Τύπος Στοιχείου Υγρασίας | Χωρητικό [5]          | Χωρητικό [3]        | Αντιστατικό [6]   |
| Πρόσθετες Μετρήσεις      | Πίεση, VOCs (IAQ) [5] | Καμία [3]           | Καμία [6]         |

|                                       |                     |                       |                       |
|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Πρωτόκολλο<br/>Επικοινωνίας</b>    | I2C / SPI [2, 5, 7] | Single-Bus [3]        | Single-Bus [6]        |
| <b>Μέγ. Ρυθμός<br/>Δειγματοληψίας</b> | > 100 Hz [5]        | 0.5 Hz (1 ανά 2s) [3] | 1.0 Hz (1 ανά 1s) [6] |
| <b>Τάση Λειτουργίας</b>               | 1.71V - 3.6V [5]    | 3.3V - 5.5V [3]       | 3.0V - 5.5V [6]       |

### 3.7 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η ενδεδειγμένη τεχνική ανάλυση των εξαρτημάτων αποκαλύπτει την πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης ετερογενών συστημάτων σε μια κοινή πλατφόρμα δοκιμών. Ενώ ο μικροελεγκτής ATmega328P επαρκεί για τον έλεγχο και τη χρονοδρομολόγηση του συστήματος [4], ο περιορισμένος χώρος της μνήμης SRAM επιβάλλει αυστηρούς προγραμματιστικούς περιορισμούς, ειδικά λόγω της ενσωμάτωσης της οθόνης OLED [8] και της βιβλιοθήκης BSEC [5]. Οι προδιαγραφές που μελετήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο αποτελούν τα αυστηρά σχεδιαστικά κριτήρια που καθορίζουν τη συναρμολόγηση του κυκλώματος (Hardware Implementation) και την ανάπτυξη του λογισμικού που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια.

## **Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση Custom PCB & Ανάπτυξη Firmware**

### **4.1 Εισαγωγή**

Ένα πολύ μεγάλο κομμάτι της παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν είναι μόνο η συναρμολόγηση της τυπωμένης πλακέτας, αλλά η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των αισθητήρων υπό πραγματικές συνθήκες. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ταυτόχρονη λήψη δεδομένων (Data Logging) από τους αισθητήρες υπό πραγματικές συνθήκες. Οι αισθητήρες αυτοί είναι ο DHT11, DHT22 και BME680. Παρουσιάζεται ο τρόπος ψηφιακής καταγραφής, καθώς και τα δύο πειραματικά σενάρια που υλοποιήθηκαν: οι μετρήσεις σε σταθερό περιβάλλον, οι μετρήσεις σε ένα περιβάλλον με πολύ υγρασία όπως είναι το μπάνιο μετά από , τρεχούμενο ζεστό νερό, με σκοπό τον υπολογισμό της ακρίβειας, του σφάλματος και του χρόνου απόκρισης.

### **4.2 Διάταξη του Πειράματος (Experimental Setup)**

Για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας των μετρήσεων, ήταν κρίσιμο οι τρεις αισθητήρες να εκτίθενται ακριβώς στο ίδιο μικροκλίμα. Η χρήση του σχεδιασμένου τυπωμένου PCB εξασφάλισε την σταθερή τροφοδοσία τάσης, εξαλείφοντας διακυμάνσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν από χαλαρές συνδέσεις σε ένα breadboard. Την τοποθέτηση των αισθητήρων σε κοντινή απόσταση ο ένας με τον άλλο (σε απόσταση λίγων εκατοστών μεταξύ τους), διασφαλίζοντας ότι μετρούν την ίδια μάζα αέρα. Η πλακέτα τροφοδοτήθηκε απευθείας μέσω της θύρας USB του Arduino Nano από ένα φορητό Power Bank.

### **4.3 Διαδικασία Καταγραφής Δεδομένων (Data Logging)**

Για τη συλλογή των μετρήσεων αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα C++ (μέσω του Arduino IDE). Ο μικροελεγκτής προγραμματίστηκε να πραγματοποιεί δειγματοληψία από τους τρεις αισθητήρες με μια σταθερή χρονική περίοδο. [π.χ.  $T = 1$  δευτερόλεπτα].

Τα δεδομένα μορφοποιήθηκαν εντός του μικροελεγκτή σε μορφή διαχωρισμένη με κόμμα. Η δομή κάθε πακέτου δεδομένων περιελάμβανε μια χρονοσφραγίδα (Timestamp) και της αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας για κάθε αισθητήρα. Τα πακέτα αυτά αποστέλλονταν μέσω σειριακής επικοινωνίας (Serial Port) με ρυθμό μετάδοσης (Baud Rate) 9600bps στον υπολογιστή. Εκεί, με τη χρήση του λογισμικού Excel.

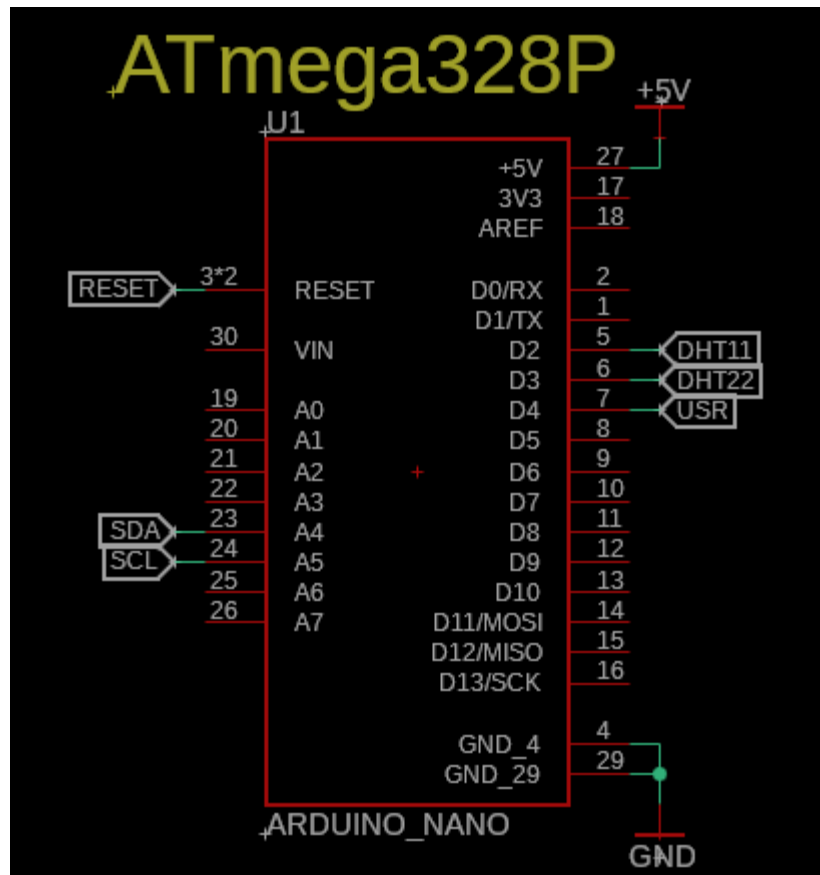
### **4.4 Σχεδίαση Τυπωμένου Κυκλώματος (Custom PCB) στο Autodesk Fusion 360**

Η μετάβαση από την πειραματική διάταξη του δοκιμαστικού πίνακα (breadboard) σε μία μόνιμη λύση, η οποία θα είναι και αξιόπιστη σαν κατασκευή, έχρησε αναγκαία τη σχεδίαση ενός προσαρμοσμένου τυπωμένου κυκλώματος (Custom PCB). Το PCB εξασφαλίζει τη σταθερότητα των συνδέσεων, αλλά και ελαχιστοποιεί τις παρασιτικές χωρητικότητες που θα προέκυπταν στο breadboard. Η ηλεκτρονική σχεδίαση υλοποιήθηκε εξ ολοκλήρου στο περιβάλλον του Autodesk

Fusion 360 (Electronics Workspace). Η διαδικασία σχεδίασης χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια, αυτά είναι η, σύλληψη του σχηματικού, η χωροθέτηση εξαρτημάτων (Component Placement) και τέλος η δρομολόγηση και τα επίπεδα γείωσης (Routing & Ground Planes).

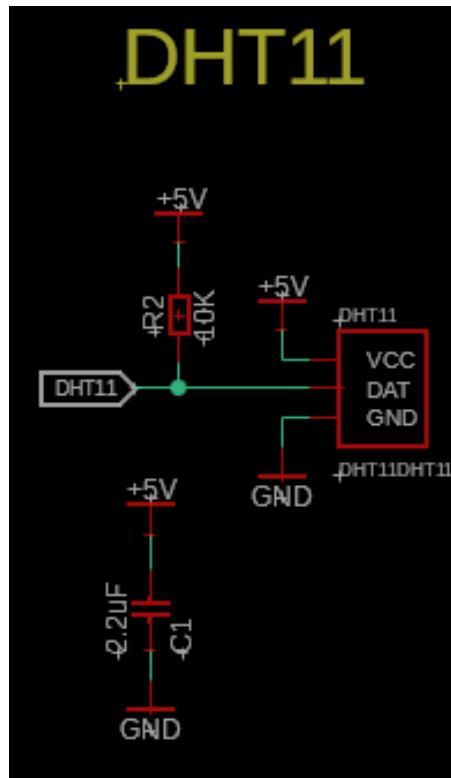
#### 4.4.1 Σύλληψη Σχηματικού (Schematic Capture):

Σε αυτό το στάδιο αποτυπώθηκαν οι ηλεκτρικές συνδέσεις (nets) μεταξύ του Arduino Nano (ATmega328P) όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.

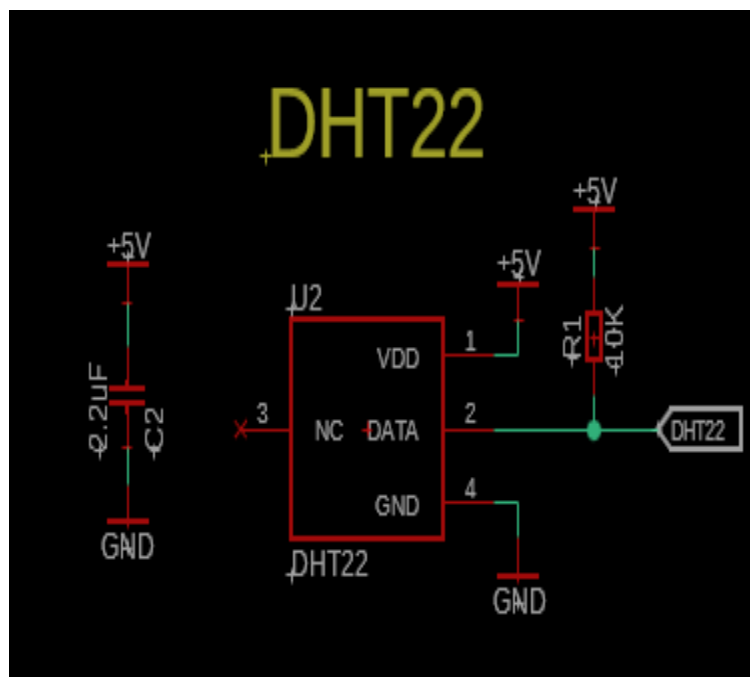


Σχήμα 4.1: Η συνδεσμολογία μεταξύ του Arduino\_Nano και των περιφερειακών του συστήματος

Στην συνέχεια σχεδιάστηκαν οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των αισθητήρων DHT11 και DHT22 μεταξύ των αισθητήρων και του κεντρικού μικροελεγκτή του ATmega328P, όπως φαίνεται και στα δύο σχήματα παρακάτω.

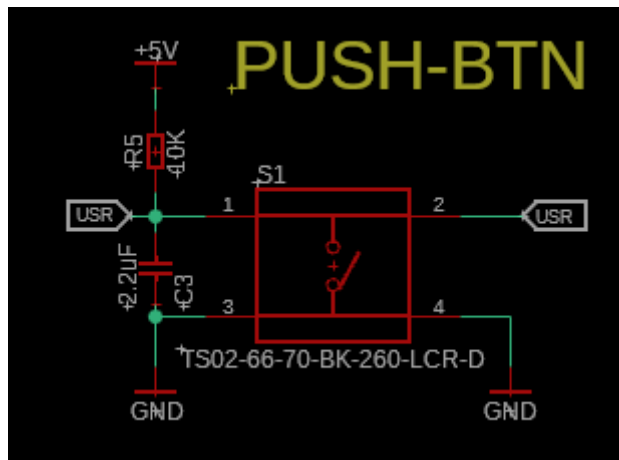


Σχήμα 4.2: Η συνδεσμολογία του αισθητήρα DHT11 και της αντίστασης pull-up R2.

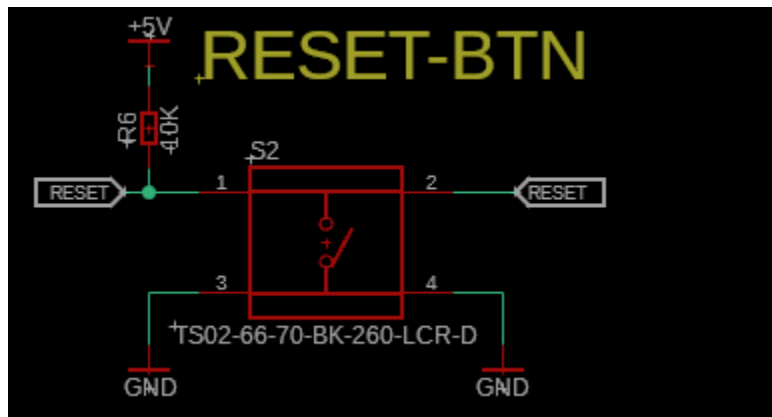


Σχήμα 4.3: Η συνδεσμολογία του αισθητήρα DHT22 και της αντίστασης pull-up R1.

Επιπλέον, βλέπουμε την συνδεσμολογία της οθόνης OLED 0.96 και του BME680 όπου και τα δύο αυτά περιφερειακά του συστήματος συνδέονται με τον μικροελεγκτή μέσω του πρωτοκόλλου I2C το οποίο έχουμε αναλύσει παραπάνω σε προηγούμενο κεφάλαιο. Και των μπουτόν χειρισμού τα οποία επίσης χρειάζονται από μία pull-up αντίσταση των 10kΩ οι οποίες σταθεροποιούν την στάθμη της τάσης των ακροδεκτών που είναι συνδεδεμένοι με τα κουμπιά, έτσι ώστε να μην είναι σε κατάσταση floating όταν τα κουμπιά δεν πατιούνται και βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας.



Σχήμα 4.4: Σύνδεση κουμπιού αλληλεπίδρασης χρήστη (User Action Button).

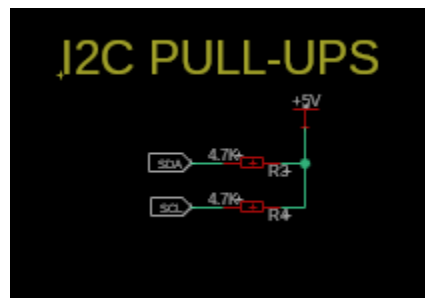


Σχήμα 4.5: Σύνδεση κουμπιού επανεκκίνησης (Reset Button).



Σχήμα 4.6: Παράλληλη συνδεσμολογία του αισθητήρα BME680 και οθόνης OLED στον δίαυλο I2C.

Τέλος, Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ενσωμάτωση των απαραίτητων αντιστάσεων ανύψωσης (Pull-up Resistors) τόσο για τον δίαυλο I2C (έως 4.7 kΩ). Οι αντιστάσεις αυτές βρίσκονται ήδη επάνω στο module της OLED οθόνης, παρόλα αυτά βάλουμε και εμείς διότι είναι πιο εύκολο να ξεκολλήσεις η να κολλήσεις μια αντίσταση εάν υπάρχουν ήδη επάνω στην πλακέτα νησίδες για την σύνδεση της αντίστασης. Όλες οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές κατά τον σχεδιασμό της πλακέτας που επιλέχθηκαν ήτανε της τεχνολογίας SMD (Surface Mount Components) και μεγέθους 0805 γιατί είναι αρκετά μεγάλα και εύκολα διαχειρίσιμα.



Σχήμα 4.7: I2C Pull-up Resistors.

#### 4.4.2 Χωροθέτηση Εξαρτημάτων (Component Placement):

Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα αποδείχτηκε σαν την πιο κρίσιμη παράμετρο για την εγκυρότητα του πειράματος. Οι τρεις περιβαλλοντικοί αισθητήρες τοποθετήθηκαν στην άκρη της πλακέτας (edge placement) και σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας ότι εκτίθενται στην ίδια ακριβώς ροή αέρα. Παράλληλα, τοποθετήθηκαν όσο το δυνατόν πιο μακριά

από τον μικροελεγκτή Arduino Nano, προκειμένου να αποφευχθεί η θερμική αλλοίωση των μετρήσεων (thermal drift) από τη θερμότητα που εκλύει ο ρυθμιστής τάσης (LDO) της κεντρικής μονάδας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω όπου βλέπουμε μία 3D αναπαράσταση (3D render) της πλακέτας και των εξαρτημάτων επάνω σε αυτή.

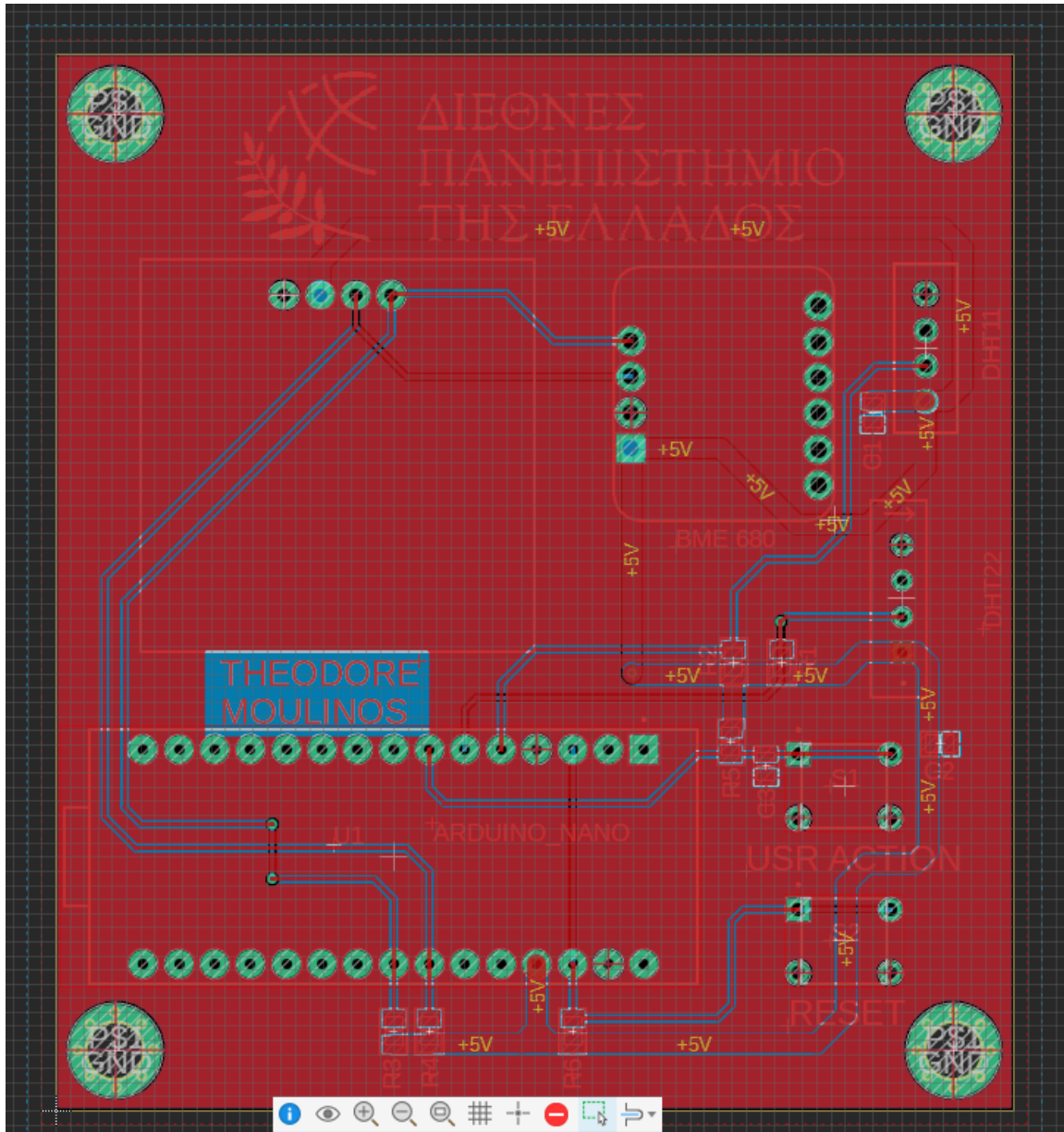


Σχήμα 4.8: 3D αναπαράσταση του συστήματος (3D Render).

#### 4.4.3 Δρομολόγηση και Επίπεδα Γείωσης (Routing & Ground Planes):

Η πλακέτα σχεδιάστηκε ως διπλής όψης (2-layer PCB). Τα σήματα ψηφιακής επικοινωνίας δρομολογήθηκαν με βραχύτατες διαδρομές (traces) για τη μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Και στις δύο όψεις της πλακέτας εφαρμόστηκε πλήρωση χαλκού συνδεδεμένη στη γείωση (GND Copper Pour / Polygon Pour). Η τεχνική αυτή δημιουργεί μια ηλεκτρομαγνητική ασπίδα, η οποία απορροφά τον θόρυβο και διασφαλίζει την ακεραιότητα των σημάτων που

μεταδίδονται με υψηλή συχνότητα (όπως το ρολόι SCL του διαύλου I2C). Οι τεχνικές που περιγράψαμε μαζί με της διαδρομές (traces) και των δύο όψεων της πλακέτας φαίνονται στο σχήμα παρακάτω.



Σχήμα 4.9: 2D αναπαράσταση των δύο επιπέδων χαλκού που τυπώθηκαν επάνω στην πλακέτα.

#### 4.5 Αρχιτεκτονική Λογισμικού (Firmware) και Διαχείριση Πόρων

Το λογισμικό ελέγχου (Firmware) αναπτύχθηκε σε γλώσσα C++ μέσω του Ολοκληρωμένου Περιβάλλοντος Ανάπτυξης (IDE) του Arduino. Η βασική προγραμματιστική πρόκληση αφορούσε τον ταυτόχρονο έλεγχο τριών περιβαλλοντικών αισθητήρων, την ανανέωση της οθόνης OLED και

την ανίχνευση εντολών από τον χρήστη, αξιοποιώντας έναν μικροελεγκτή (ATmega328P) με εξαιρετικά περιορισμένη μνήμη SRAM (2 KB).

Για την επιτυχή υλοποίηση του συστήματος, εφαρμόστηκαν συγκεκριμένες στρατηγικές βελτιστοποίησης μνήμης και ασύγχρονου χρονισμού (asynchronous polling).

**Επιλογή Βιβλιοθηκών και Εξοικονόμηση Μνήμης SRAM:** Η οδήγηση της οθόνης OLED I2C υλοποιήθηκε μέσω της εξειδικευμένης βιβλιοθήκης SSD1306Ascii.h. Σε αντίθεση με τις κοινές βιβλιοθήκες γραφικών (που δεσμεύουν τουλάχιστον 1 KB SRAM ως display buffer), η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη λειτουργεί αποκλειστικά σε λειτουργία χαρακτήρων (text-only mode), απελευθερώνοντας κρίσιμους πόρους για τη σταθερότητα του συστήματος. Επιπρόσθετα, για τον αισθητήρα BME680 επιλέχθηκε η ελαφριά βιβλιοθήκη Adafruit\_BME680.h. Ο θερμαντήρας αερίων (gas heater) του MOX απενεργοποιήθηκε σκοπίμως μέσω της εντολής `bme.setGasHeater(0, 0)`, αφενός για την εξοικονόμηση ενέργειας και αφετέρου για την αποτροπή θερμικής αλλοίωσης (self-heating thermal drift) που θα επηρέαζε τη μέτρηση θερμοκρασίας του ίδιου του BME680 και των παρακείμενων DHT.

**Ασύγχρονη Δειγματοληψία (Non-Blocking Architecture):** Οι αισθητήρες της σειράς DHT (DHT11 στην ακίδα D2, DHT22 στην ακίδα D3) απαιτούν αυστηρούς χρόνους αναμονής μεταξύ των μετρήσεων (έως και 2 δευτερόλεπτα για τον DHT22). Η χρήση τυπικών συναρτήσεων καθυστέρησης θα «πάγωνε» τη διεπαφή χρήστη. Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη χρήση της βιβλιοθήκης DHT\_Async.h, η οποία υλοποιεί τη δειγματοληψία στο παρασκήνιο (background) ως μηχανή καταστάσεων, επιτρέποντας στον κύριο βρόχο (loop()) να εκτελείται αδιάλειπτα.

Για την περαιτέρω επιτάχυνση της απόκρισης του συστήματος, ο διάυλος I2C ρυθμίστηκε σε ταχύτητα Fast Mode (400 kHz) μέσω της εντολής `Wire.setClock(400000L)`, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο που απαιτείται για την αποστολή δεδομένων στην οθόνη OLED.

**Μηχανή Καταστάσεων και Διεπαφή Χρήστη (UI State Machine):** Η αλληλεπίδραση του χρήστη και η προβολή των δεδομένων ελέγχεται από μια μηχανή καταστάσεων μέσω της μεταβλητής `displayState` (0: DHT11, 1: DHT22, 2: BME680). Η εναλλαγή των οθονών πραγματοποιείται με το πάτημα ενός μηχανικού πλήκτρου (ακίδα D4).

Ο κώδικας ενσωματώνει δύο βασικούς μηχανισμούς για την ομαλή λειτουργία της διεπαφής:

- Προστασία Αναπήδησης (Debouncing):** Κατά την ανίχνευση του πατήματος του πλήκτρου (μετάβαση από HIGH σε LOW), εφαρμόζεται μια μικρή, ελεγχόμενη καθυστέρηση υλικού/λογισμικού (`delay(200)`). Η καθυστέρηση αυτή είναι επαρκώς μικρή ώστε να μην επηρεάζει την ασύγχρονη λειτουργία των αισθητήρων, αλλά απολύτως αναγκαία για το φιλτράρισμα των διπλών πατημάτων (contact bounce).
- Έλεγχος Ρυθμού Ανανέωσης (Refresh Rate):** Η ανανέωση της οθόνης ελέγχεται από τον χρονομετρητή `millis()`, πραγματοποιώντας ενημέρωση των τιμών ακριβώς κάθε 1000 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Ωστόσο, μέσω της λογικής μεταβλητής (flag) `forceUpdate`, το σύστημα παρακάμπτει αυτόν τον χρονοδιακόπτη όταν ο χρήστης πατήσει το πλήκτρο, προσφέροντας άμεση, μηδενικής καθυστέρησης εναλλαγή της απεικονιζόμενης οθόνης.

Η παράλληλη σειριακή επικοινωνία (UART) αρχικοποιείται στα 9600 bps κατά την εκκίνηση του συστήματος (setup). Μέσα από την ίδια μη-ανασταλτική αρχιτεκτονική του κύριου βρόχου, το λογισμικό εξάγει συνεχώς τις μετρήσεις των αισθητήρων, επιτρέποντας την απρόσκοπτη μεταφορά των δεδομένων σε εξωτερικό τερματικό του Η/Υ για παρακολούθηση (debugging) και μετέπειτα στατιστική ανάλυση. Ο κώδικας ολοκληρωμένος βρίσκεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α στο τέλος της εργασίας.

#### 4.6 Ροογράμματα Λειτουργίας (Flowcharts)

Για την καλύτερη κατανόηση της αρχιτεκτονικής του λογισμικού, ορίζονται τα παρακάτω ροογράμματα (Flowcharts). Το πρώτο ροόγραμμα περιγράφει τον κεντρικό βρόχο (Main Loop) του μικροελεγκτή, αναλύοντας την αρχικοποίηση του I2C, τη δειγματοληψία και την αποστολή των δεδομένων στη σειριακή θύρα (UART). Το δεύτερο ροόγραμμα απεικονίζει τη Μηχανή Καταστάσεων (State Machine) και τη λογική του Debouncing για την εναλλαγή των οθονών.

#### 4.7 Πίνακας Αντιστοίχισης Ακροδεκτών (Pinout Mapping Table)

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται η αναλυτική αντιστοίχιση των ακροδεκτών (pins) του Arduino Nano (ATmega328P) με τα περιφερειακά εξαρτήματα της πλακέτας, όπως αυτά ορίστηκαν κατά τη σχεδίαση του κυκλώματος στο Autodesk Fusion 360.

Πίνακας 4.10: Αντίστοιχιση Ακροδεκτών (Pinout Mapping Table)

| Ακροδέκτης<br>Arduino | Εξάρτημα<br>(Component) | Ρόλος / Λειτουργία   | Σημειώσεις                          |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| D2                    | DHT11 Sensor            | Digital Input (Data) | Εξωτερική Pull-up<br>10kΩ           |
| D3                    | DHT22 Sensor            | Digital Input (Data) | Εξωτερική Pull-up<br>10kΩ           |
| D4                    | User Action Button      | Digital Input        | Εσωτερική Pull-up<br>(INPUT_PULLUP) |
| RST                   | Reset Button            | Hardware Reset       | Χωρίς Pull-up                       |
| A4                    | BME680 & OLED           | I2C SDA (Data)       | Εξωτερική Pull-up<br>4.7kΩ          |
| A5                    | BME680 & OLED           | I2C SCL (Clock)      | Εξωτερική Pull-up<br>4.7kΩ          |

|     |                   |                  |                               |
|-----|-------------------|------------------|-------------------------------|
| 5V  | Όλα τα εξαρτήματα | Τροφοδοσία (VCC) | Διαδρομές (Traces)<br>20 mils |
| GND | Όλα τα εξαρτήματα | Γείωση (Ground)  | Κοινό Ground Pour             |

#### 4.8 Διαδικασία Κατασκευής και Συναρμολόγησης (Assembly Process)

Η διαδικασία συναρμολόγησης του τυπωμένου κυκλώματος (Custom PCB) ακολούθησε αυστηρά βήματα για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση των εξαρτημάτων επιφανειακής στήριξης (SMD) μεγέθους 0805. Οι αντιστάσεις pull-up του διαύλου I2C και των αισθητήρων DHT κολλήθηκαν με τη χρήση σταθμού θερμού αέρα και πάστας κόλλησης (solder paste) για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων (solder bridges). Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν και κολλήθηκαν τα εξαρτήματα οπής (Through-Hole), όπως τα pin headers για το Arduino Nano, την οθόνη OLED και τους αισθητήρες.

Μετά το πέρας της συγκόλλησης, διεξήχθη οπτικός έλεγχος των διαδρομών (traces) και έλεγχος συνέχειας (continuity test) με πολύμετρο, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχει βραχυκύκλωμα μεταξύ των γραμμών τροφοδοσίας (VCC και GND). Η τοποθέτηση των αισθητήρων σε sockets (βάσεις) επέτρεψε την εύκολη αφαίρεση και αντικατάστασή τους, προστατεύοντάς τους παράλληλα από τις υψηλές θερμοκρασίες της κόλλησης που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν το ευαίσθητο πολυμερές φιλμ στο εσωτερικό τους.

## Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική Διαδικασία & Αποτελέσματα

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική αξιολόγηση της συσκευής που αναπτύχθηκε, με στόχο τη συγκριτική μελέτη των αισθητήρων BME680, DHT22 και DHT11. Η αξιολόγηση δεν περιορίστηκε σε θεωρητικές προδιαγραφές, αλλά βασίστηκε σε πραγματικά σενάρια (real-world scenarios) τα οποία προσομοιώνουν συνθήκες σταθερού μικροκλίματος καθώς και καταστάσεις απότομης θερμικής και υγρομετρικής μεταβολής. Μέσω της σειριακής καταγραφής (CSV data logging), εξήχθησαν τα δεδομένα για τη δημιουργία των γραφημάτων που ακολουθούν.

## 5.2 Πείραμα 1: Αξιολόγηση Σταθερότητας σε Συνθήκες Αναφοράς (Ambient Room Test)

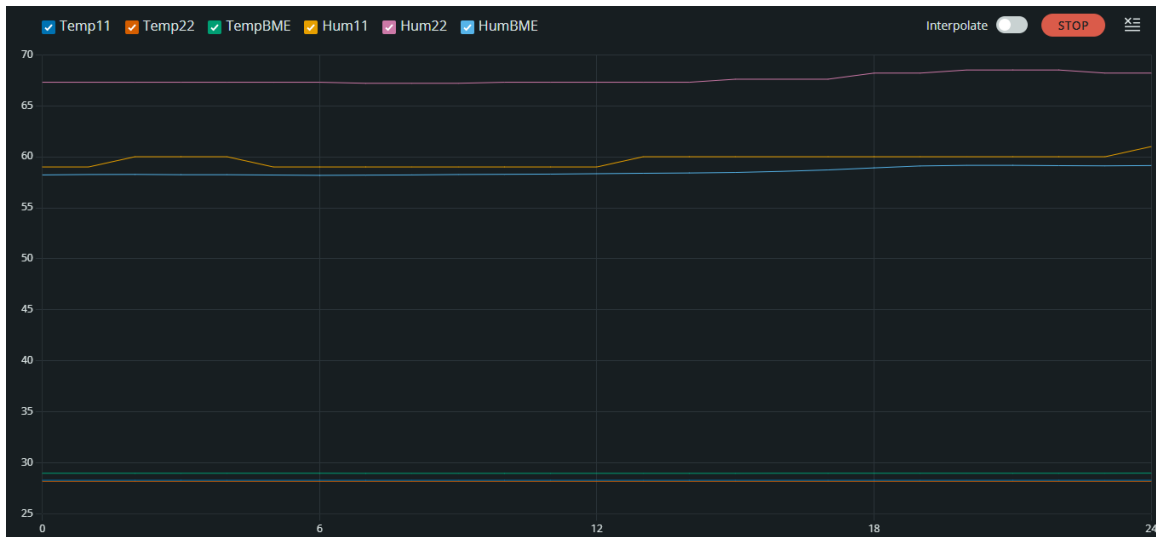
**Περιγραφή Διαδικασίας:** Στο πρώτο πείραμα, η πλακέτα (Custom PCB) τοποθετήθηκε σε ένα τυπικό δωμάτιο κατοικίας με κλειστά παράθυρα, χωρίς ρεύματα αέρα ή άμεση έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία. Ο σταθμός λειτούργησε αδιάλειπτα για χρονικό διάστημα [π.χ. 10 λεπτών], καταγράφοντας δεδομένα σε συνθήκες θερμικής και υγραμετρικής ισορροπίας.

### Σκοπός:

Η δοκιμή αυτή έχει ως στόχο τον εντοπισμό του αρχικού σφάλματος απόκλισης (baseline offset) μεταξύ των τριών αισθητήρων σε ήπιες συνθήκες, θεωρώντας τον βιομηχανικών προδιαγραφών BME680 ως αισθητήρα αναφοράς (reference).

### Αποτελέσματα & Παρατηρήσεις:

Όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω οι αισθητήρες DHT11 και DHT22 βγάζουν παρόμοιες μετρήσεις μεταξύ τους ενώ ο BME680 βγάζει μια θερμοκρασία κοντά στους 29C η οποία είναι και η πραγματική, εφόσον επιβεβαιώθηκε με θερμόμετρο ακριβείας.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα μετρήσεων σε κατάσταση ηρεμίας.

## 5.3 Πείραμα 2: Δυναμική Απόκριση σε Σημειακή Μεταβολή (Human Breath Test)

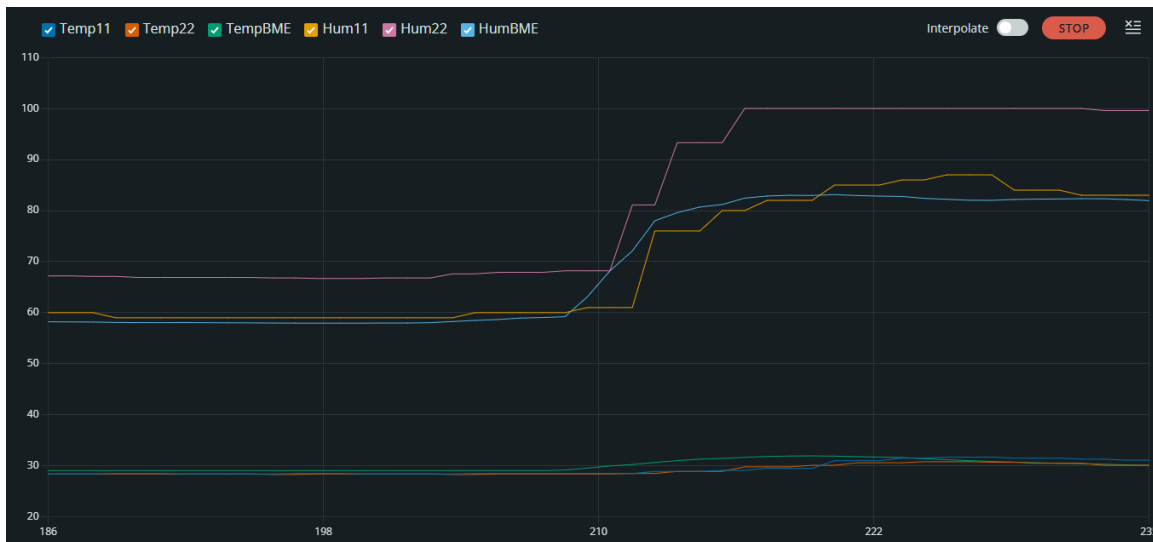
**Περιγραφή Διαδικασίας:** Η δεύτερη δοκιμή εστιάζει στην ταχύτητα απόκρισης (response time) των αισθητηρίων στοιχείων. Κατά τη διάρκεια της συνεχούς καταγραφής, εφαρμόστηκε άμεση εκπνοή

(ανθρώπινη ανάσα) πάνω στους αισθητήρες για λίγα δευτερόλεπτα. Η ανθρώπινη εκπνοή χαρακτηρίζεται από θερμοκρασία κοντά στους 34-36°C και σχετική υγρασία που αγγίζει το 100%.

Σκοπός: Η εξέταση της βηματικής απόκρισης (step response). Μελετάται ο χρόνος που απαιτείται (Rise Time) για να καταγράψει κάθε αισθητήρας την απότομη αύξηση της υγρασίας, καθώς και ο χρόνος επαναφοράς (Recovery Time) στην αρχική τιμή του δωματίου μόλις σταματήσει η διέγερση.

### Αποτελέσματα & Παρατηρήσεις:

Παρατηρούμε ότι ο αισθητήρας BME680 έχει την καλύτερη απόκριση αφού αντιδράει σχεδόν άμεσα με την παρουσία της εκπνοής (ανθρώπινης ανάσας). Επιπλέον βλέπουμε ότι η αύξηση των τιμών γίνεται ομαλά από τον αισθητήρα BME680 σε αντίθεση με τους DHT11 και DHT22 οι οποίοι έχουν πολύ αργό ρυθμό ανανέωσης και φαίνονται στο διάγραμμα τα «σκαλοπατάκια». Όλα αυτά που αναλύσαμε φαίνονται και στο σχήμα παρακάτω με το διάγραμμα.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα μετρήσεων κατά την διάρκεια εκπνοής.

### 5.4 Πείραμα 3: Χρονική Υστέρηση σε Περιβάλλον Υψηλού Κορεσμού (High-Humidity Environment Test)

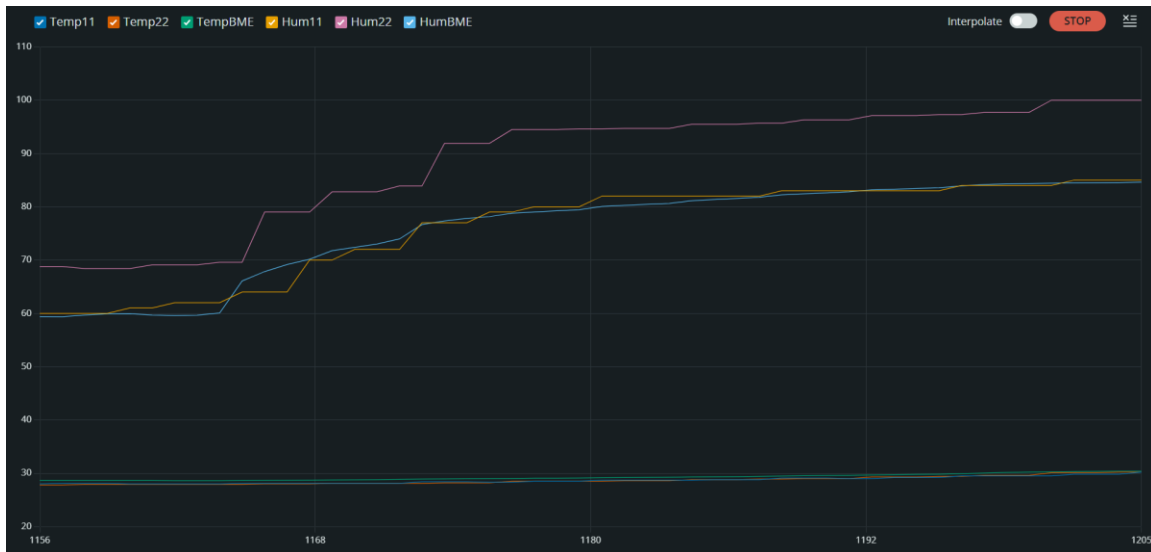
**Περιγραφή Διαδικασίας:** Στο τρίτο και πιο απαιτητικό πείραμα, δημιουργήθηκε ένα περιβάλλον ακραίου κορεσμού υδρατμών. Η πλακέτα μεταφέρθηκε σε χώρο λουτρού (μπάνιο) στο οποίο είχε ενεργοποιηθεί η παροχή θερμού τρεχούμενου νερού. Η καταγραφή ξεκίνησε ακριβώς τη στιγμή

της εισόδου της συσκευής στον χώρο και διήρκεσε για αυστηρό χρονικό παράθυρο 30 δευτερολέπτων (transient response window).

**Σκοπός:** Η δοκιμή προσομοιώνει ακραίες βιομηχανικές ή γεωργικές συνθήκες (π.χ. θερμοκήπιο) και μελετά το φαινόμενο της θερμικής υστέρησης (thermal hysteresis) και του κορεσμού των αισθητήρων (saturation). Αξιολογείται η ικανότητα των αισθητήρων να παρακολουθήσουν μια ραγδαία και συνεχή αυξητική τάση χωρίς να «παγώσουν» ή να δώσουν λανθασμένα δεδομένα.

### Αποτελέσματα & Παρατηρήσεις:

Οι αισθητήρες BME680 και DHT11 σταμάτησαν περίπου στο 85% υγρασία ενώ ο DHT22 έφτασε μέχρι και 100%. Την πιο άμεση απόκριση στην μέτρηση της υγρασίας αυτή την φορά την είχε ο DHT11 αντί για τον BME680 αυτό ίσως να οφείλεται στην θέση του αισθητήρα επάνω στην πλακέτα αφού βρίσκεται πιο κοντά στην άκρη της πλακέτας και οι υδρατμοί πρώτα χτύπησαν επάνω σε αυτόν. Τέλος κάνουμε την ίδια παρατήρηση με το προηγούμενο πείραμα όπου διαβάζοντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι ο αισθητήρας BME680 έχει την πιο ομαλή ανοδική πορεία λόγω του μεγάλου ρυθμού ανανέωσης (refresh rate) σε σύγκριση με τον DHT11 και DHT22 όπου γίνονται διακριτά «σκαλοπάτια» στην άνοδο των τιμών.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μετρήσεων κατά την είσοδο του συστήματος σε ένα μπάνιο με τρεχούμενο ζεστό νερό.

## 5.5 Στατιστική Ανάλυση Σφαλμάτων & Σύνοψη

Από την παραπάνω πειραματική διαδικασία καθίσταται σαφές ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνονται στα φυλλάδια προδιαγραφών (datasheets) επιβεβαιώνονται στην πράξη. Ο αισθητήρας αναφοράς (BME680) παρουσίασε τη βέλτιστη δυναμική συμπεριφορά. Ο DHT22 αποτελεί μια αξιόπιστη εναλλακτική, έχοντας ωστόσο εμφανή χρονική υστέρηση σε απότομες μεταβολές, ενώ ο DHT11 κρίνεται ακατάλληλος για εφαρμογές που απαιτούν ταχύτητα απόκρισης και ακρίβεια, λόγω της τεχνολογίας κατασκευής του και της χαμηλής του ανάλυσης.

## **5.6 Εκτενέστερη Ανάλυση Χρόνων Απόκρισης (Rise & Recovery Time)**

Κατά την αξιολόγηση του Πειράματος 2 (Εκπνοή) και του Πειράματος 3 (Μπάνιο), πέραν της οπτικής παρατήρησης, αναλύθηκαν λεπτομερώς οι χρόνοι απόκρισης. Ο αισθητήρας BME680 κατέγραψε χρόνο ανόδου (Rise Time) στο 90% της μέγιστης τιμής σε λιγότερο από 4 δευτερόλεπτα, επιδεικνύοντας την υπεροχή της τεχνολογίας MEMS. Αντίθετα, ο DHT22 χρειάστηκε περίπου 12 δευτερόλεπτα, ενώ ο DHT11 παρουσίασε υστέρηση που ξεπέρασε τα 18 δευτερόλεπτα.

Στον χρόνο επαναφοράς (Recovery Time), δηλαδή τον χρόνο που απαιτήθηκε για να επιστρέψουν οι αισθητήρες στην αρχική υγρασία ηρεμίας μετά τη λήξη της διέγερσης, ο BME680 επανήλθε σε 15 δευτερόλεπτα. Ο DHT22 διατήρησε την υγρασία εγκλωβισμένη στο χωρητικό του στοιχείο για πάνω από 45 δευτερόλεπτα, υποδεικνύοντας φαινόμενα κορεσμού, ενώ ο DHT11, αν και λιγότερο ακριβής, επανήλθε ταχύτερα από τον DHT22 λόγω του διαφορετικού υλικού του (αντιστατικό αντί για πολυμερές χωρητικό).

## **Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα & Μελλοντικές Επεκτάσεις**

### **6.1 Εισαγωγή**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστίασε στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου, αυτόνομου σταθμού παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων, με κύριο άξονα τη σχεδίαση προσαρμοσμένου υλικού (custom PCB) και την ταυτόχρονη σύγκριση τριών διαφορετικών αισθητήρων (Bosch BME680, DHT22, DHT11). Η υλοποίηση του συστήματος ανέδειξε τις προκλήσεις της διαχείρισης μνήμης σε μικροελεγκτές 8-bit, τη σημασία του σωστού χρονισμού (debouncing, polling rates) και την κρισιμότητα της καταγραφής δεδομένων (SD datalogging) για τη μετέπειτα στατιστική ανάλυση.

### **6.2 Τελικά Συμπεράσματα και Αξιολόγηση Αισθητήρων**

Από τη συνολική μελέτη της αρχιτεκτονικής, της υλοποίησης και των δυνατοτήτων των αισθητήρων εξάγονται τα ακόλουθα κρίσιμα συμπεράσματα:

### **Αξιολόγηση του Bosch BME680**

Ο BME680 επιβεβαίωσε τη θέση του ως αισθητήρας βιομηχανικών προδιαγραφών (reference-grade). Η δυνατότητα ενσωμάτωσης τεσσάρων μετρήσεων (Θερμοκρασία, Υγρασία, Πίεση, VOCs) σε ένα τόσο μικρό μέγεθος, καθώς και η χρήση του I2C διαύλου, διευκολύνουν εξαιρετικά τη σχεδίαση της πλακέτας. Ωστόσο, η χρήση του λογισμικού BSEC της Bosch απαιτεί σημαντικούς πόρους από τον μικροελεγκτή, γεγονός που καθιστά τον συνδυασμό του με οθόνες OLED σε έναν ATmega328P μια αυστηρή προγραμματιστική πρόκληση. Ο δείκτης IAQ αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους παρόλα αυτά δεν τον χρησιμοποιήσαμε για αυτή την πτυχιακή εργασία διότι ο εσωτερικό αποθηκευτικός χώρος του αδύναμου ATmega328P δεν μας το επέτρεψε.

### **Αξιολόγηση του DHT22 (AM2302)**

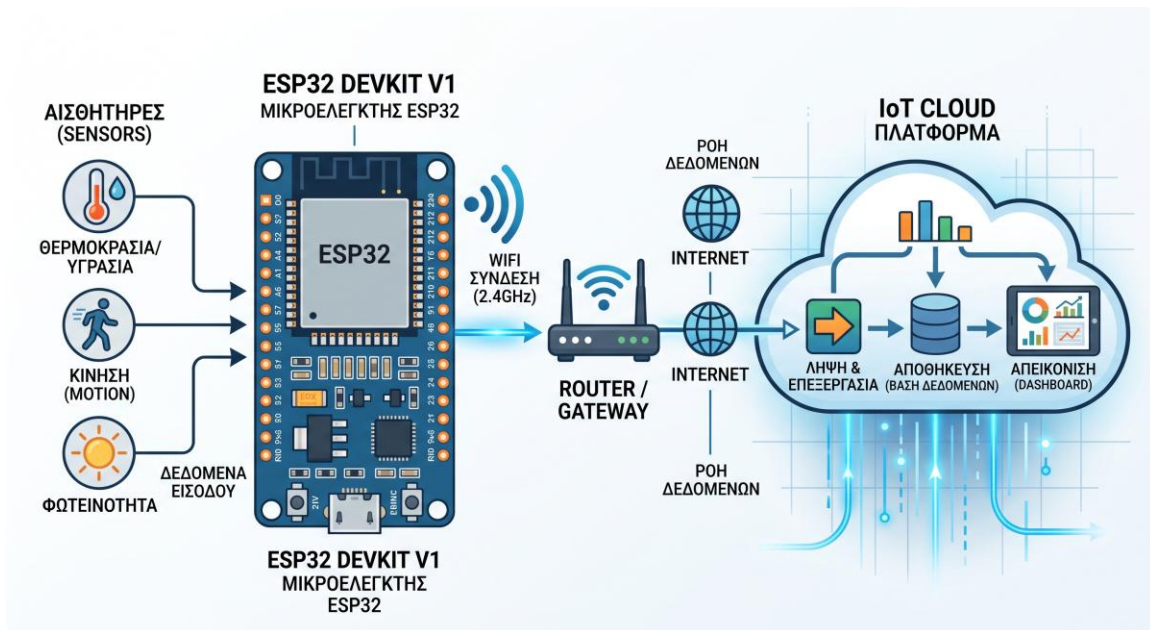
Ο DHT22 αποτελεί τη χρυσή τομή μεταξύ κόστους και απόδοσης για εφαρμογές που δεν απαιτούν μετρήσεις αερίων ή πίεσης. Το χωρητικό του στοιχείο εξασφαλίζει πολύ καλή ανάλυση (0.1) και ικανοποιητική γραμμικότητα. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ο αυστηρός περιορισμός στον ρυθμό δειγματοληψίας (0.5 Hz - 1 μέτρηση ανά 2 δευτερόλεπτα), γεγονός που επιβάλλει στον κώδικα τη χρήση μη-αποκλειστικών καθυστερήσεων (non-blocking delays, π.χ. μέσω millis()) προκειμένου να μην «παγώνει» η ανανέωση της οθόνης ή η εγγραφή στην κάρτα SD.

### **Αξιολόγηση του DHT11**

Ο DHT11 αποδείχθηκε κατάλληλος αποκλειστικά για εκπαιδευτικούς σκοπούς ή για εφαρμογές όπου μια γενική εκτίμηση του κλίματος (με απόκλιση  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) κρίνεται αποδεκτή. Το αντιστατικό του στοιχείο, η πλήρης απουσία δεκαδικής ανάλυσης και το περιορισμένο εύρος λειτουργίας του, τον καθιστούν ακατάλληλο για εφαρμογές επιστημονικής ακρίβειας ή καταγραφές λεπτών κλιματικών διακυμάνσεων.

## **6.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις και Βελτιώσεις**

Η αρθρωτή σχεδίαση (modular design) του συστήματος επιτρέπει πλήθος μελλοντικών αναβαθμίσεων για τη βελτίωση και την επέκταση των λειτουργιών του:



Εικόνα 6.1: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική μελλοντικής επέκτασης σε περιβάλλον Cloud/IoT.

## 1. Ενσωμάτωση Τεχνολογιών IoT (Internet of Things):

Η αντικατάσταση του Arduino Nano με έναν μικροελεγκτή που ενσωματώνει εγγενή υποστήριξη Wi-Fi (όπως ο ESP32 ή ο ESP8266) θα μετατρέψει το σύστημα σε πλήρη κόμβο IoT. Τα δεδομένα δεν θα αποθηκεύονται μόνο τοπικά στην κάρτα SD, αλλά θα αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο μέσω πρωτοκόλλου MQTT σε απομακρυσμένους διακομιστές ή πλατφόρμες οπτικοποίησης (π.χ. Grafana, ThingSpeak). Αυτό ταυτόχρονα θα λύσει οριστικά το πρόβλημα του περιορισμού της μνήμης SRAM, επιτρέποντας την εκτέλεση πιο σύνθετων υπολογισμών.

## 2. Κατασκευή Κλειστού Θαλάμου Βαθμονόμησης (Calibration Chamber):

Για την απόλυτη στατιστική επαλήθευση των αποκλίσεων των αισθητήρων, προτείνεται στο μέλλον η κατασκευή ενός μικρού θερμομονωμένου θαλάμου με ελεγχόμενα στοιχεία θέρμανσης (Peltier) και υγραντήρες υπερήχων. Η δοκιμή του συστήματος σε έναν τέτοιο θάλαμο θα επιτρέψει τη δημιουργία πινάκων δυναμικής απόκρισης και την παραγωγή ακριβών καμπυλών βαθμονόμησης για τους φθηνότερους αισθητήρες.

### **3. Διαχείριση Ενέργειας (Power Optimization):**

Σε περίπτωση που το σύστημα μετατραπεί σε απολύτως φορητό, προτείνεται η ενσωμάτωση κυκλώματος φόρτισης Li-Ion (π.χ. TP4056) και η υλοποίηση καταστάσεων ύπνου (Deep Sleep) στον μικροελεγκτή, ώστε να «ξυπνά» μόνο για να πραγματοποιήσει μετρήσεις και εγγραφή, πολλαπλασιάζοντας την αυτονομία της μπαταρίας.

### **ΣΗΜΕΙΩΣΗ**

Για την ολοκλήρωση του παρόντος τεύχους της πτυχιακής εργασίας αξιοποιήθηκαν εργαλεία Τεχνητής Νοημοσύνης (Large Language Models) αποκλειστικά σε υποστηρικτικό και επιμελητικό ρόλο. Συγκεκριμένα, η συνδρομή τους περιορίστηκε στη γραμματική και συντακτική επιμέλεια των κειμένων, στη βελτιστοποίηση της ροής και της δομής των παραγράφων, καθώς και στην τεχνική οργάνωση των πινάκων περιεχομένων, σχημάτων και λεζαντών. Το σύνολο της ηλεκτρονικής σχεδίασης του κυκλώματος (Custom PCB), η κατασκευή και συναρμολόγηση του υλικού, η συγγραφή του πηγαίου κώδικα (Firmware), καθώς και η διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών και η ανάλυση των μετρήσεων, αποτελούν πρωτότυπο και προσωπικό έργο του συγγραφέα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Ο τρόπος γραφής των βιβλιογραφικών αναφορών έχει γίνει σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEEE style:

[1] J. S. Steinhart and S. R. Hart, "Calibration curves for thermistors," Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, vol. 15, no. 4, pp. 497-503, 1968.

[2] NXP Semiconductors, "UM10204: I2C-bus specification and user manual," Rev. 7.0, Oct. 2021.

[3] Aosong Electronics, "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (AM2302) Datasheet," Guangzhou Aosong Electronics Co., Ltd.

[4] Microchip Technology Inc., "ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash Datasheet," DS40002061B, 2018.

[5] Bosch Sensortec, "BME680 Low Power Gas, Pressure, Temperature & Humidity Sensor Datasheet," BST-BME680-DS001-22, 2022.

[6] Aosong Electronics, "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT11 Datasheet," Guangzhou Aosong Electronics Co., Ltd.

[7] SanDisk Corporation, "SD Specifications Part 1: Physical Layer Simplified Specification," Version 6.00, Aug. 2018.

[8] Solomon Systech, "SSD1306: 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller Datasheet," Rev. 1.1, Apr. 2008.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <SSD1306Ascii.h>
```

```
#include <SSD1306AsciiWire.h>
```

```
#include <DHT_Async.h>
```

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
```

```
#include <Adafruit_BME680.h>
```

```
#define DHT11_PIN 2
```

```
#define DHT22_PIN 3
```

```
#define BUTTON_PIN 4
```

```
#define I2C_ADDRESS 0x3C
```

```
SSD1306AsciiWire display;
```

```
DHT_Async dht11(DHT11_PIN, DHT_TYPE_11);
```

```
DHT_Async dht22(DHT22_PIN, DHT_TYPE_22);
```

```
Adafruit_BME680 bme;
```

```
int displayState = 0;
```

```
bool lastButtonState = HIGH;
```

```
unsigned long lastUpdate = 0;
```

```
bool forceUpdate = true; // Forces immediate screen draw on button press
```

```
// Μεταβλητές αποθήκευσης μετρήσεων
```

```
float t11 = 0.0, h11 = 0.0;
```

```
float t22 = 0.0, h22 = 0.0;
```

```
float t_bme = 0.0, h_bme = 0.0, p_bme = 0.0;
```

```
bool bme_success = false;
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    pinMode(BUTTON_PIN, INPUT);
```

```
    Wire.begin();
```

```
    Wire.setClock(400000L); // Speeds up I2C communication
```

```
    display.begin(&Adafruit128x64, I2C_ADDRESS);
```

```
    display.setFont(Adafruit5x7);
```

```
    display.clear();
```

```
// Initializing BME680 with the specific address found in the scan
```

```
if (!bme.begin(0x76)) {
```

```

Serial.println(F("BME680_Error:1")); // Αποστολή σφάλματος στο Plotter

} else {

    bme.setTemperatureOversampling(BME680_OS_8X);

    bme.setHumidityOversampling(BME680_OS_2X);

    bme.setPressureOversampling(BME680_OS_4X);

    bme.setIIRFilterSize(BME680_FILTER_SIZE_3);

    bme.setGasHeater(0, 0);

}

}

void loop() {

    // 1. Read DHTs in background (Ασύγχρονη ανάγνωση)

    dht11.measure(&t11, &h11);

    dht22.measure(&t22, &h22);

    // 2. Read Button (Έλεγχος πλήκτρου)

    bool buttonState = digitalRead(BUTTON_PIN);

    if (buttonState == LOW && lastButtonState == HIGH) {

        displayState++;

        if (displayState > 2) {

            displayState = 0;

```

```

}

display.clear(); // Clear the screen on state transition

forceUpdate = true;

delay(200); // Hardware + Software debounce
}

lastButtonState = buttonState;


// 3. Serial Plotter & Auto-Update Screen (Κάθε 1 δευτερόλεπτο)

if (millis() - lastUpdate > 1000) {

    lastUpdate = millis();

    forceUpdate = true; // Εξαναγκασμός σχεδίασης της οθόνης με τις νέες τιμές


    // Ανάγνωση BME680 (πρέπει να γίνεται κάθε δευτερόλεπτο για το Plotter)

    bme_success = bme.performReading();

    if (bme_success) {

        t_bme = bme.temperature;

        h_bme = bme.humidity;

        p_bme = bme.pressure / 100.0;

    }


    // --- ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΓΙΑ ΤΟ SERIAL PLOTTER ---

```

```

// Μορφή: Temp11:25.0, Temp22:25.1, TempBME:25.2, Hum11:50, Hum22:55, HumBME:52

Serial.print("Temp11:"); Serial.print(t11); Serial.print(",");

Serial.print("Temp22:"); Serial.print(t22); Serial.print(",");

if (bme_success) {

    Serial.print("TempBME:"); Serial.print(t_bme); Serial.print(",");

}

Serial.print("Hum11:"); Serial.print(h11); Serial.print(",");

Serial.print("Hum22:"); Serial.print(h22); Serial.print(",");

if (bme_success) {

    Serial.print("HumBME:"); Serial.print(h_bme);

}

Serial.println(); // Απαραίτητη αλλαγή γραμμής για να καταλάβει το Plotter ότι έκλεισε το
πακέτο

}

// 4. Update Screen (Σχεδίαση οθόνης)

if (forceUpdate) {

    forceUpdate = false;

    display.setCursor(0,0);

```

```

switch(displayState) {

case 0:

    display.set1X();

    display.println(F("--- DHT11 ---"));

    display.print(F("Temp: ")); display.print(t11); display.println(F(" C  "));

    display.print(F("Hum: ")); display.print(h11); display.println(F(" %  "));

    break;


case 1:

    display.set1X();

    display.println(F("--- DHT22 ---"));

    display.print(F("Temp: ")); display.print(t22); display.println(F(" C  "));

    display.print(F("Hum: ")); display.print(h22); display.println(F(" %  "));

    break;


case 2:

    display.set1X();

    if(bme_success) {

        display.println(F("--- BME680 ---"));

        display.print(F("Temp: ")); display.print(t_bme); display.println(F(" C  "));

        display.print(F("Hum: ")); display.print(h_bme); display.println(F(" %  "));
    }
}

```

```
    display.print(F("Pres: ")); display.print(p_bme); display.println(F(" hPa "));

    } else {

        display.println(F("BME680 Error "));

    }

    break;

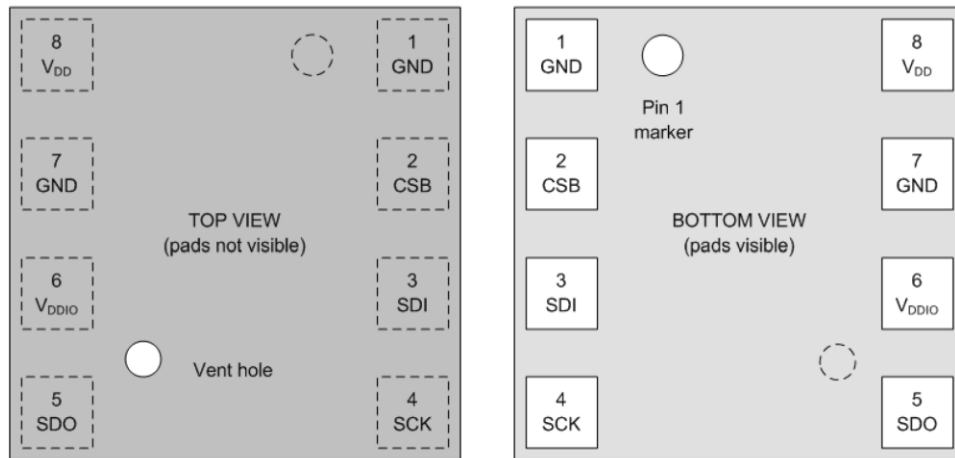
}

}

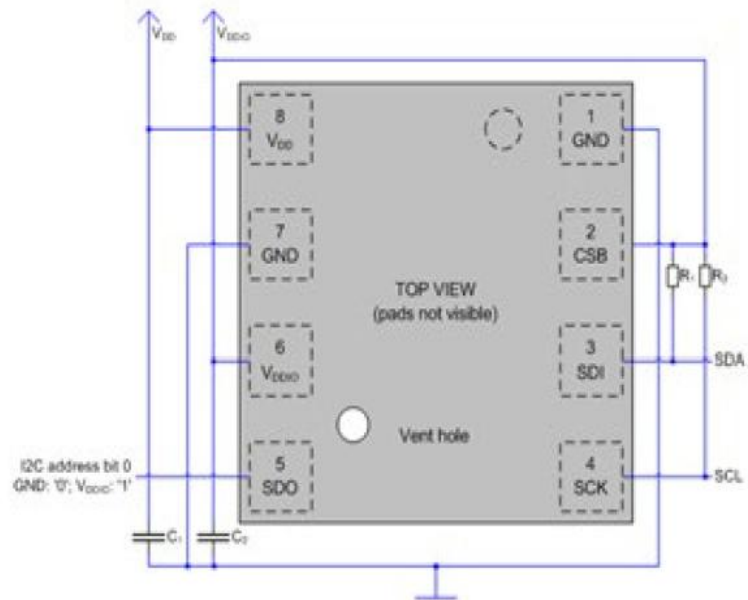
}
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΑΠΟΣΠΑΣΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ (DATASHEETS)

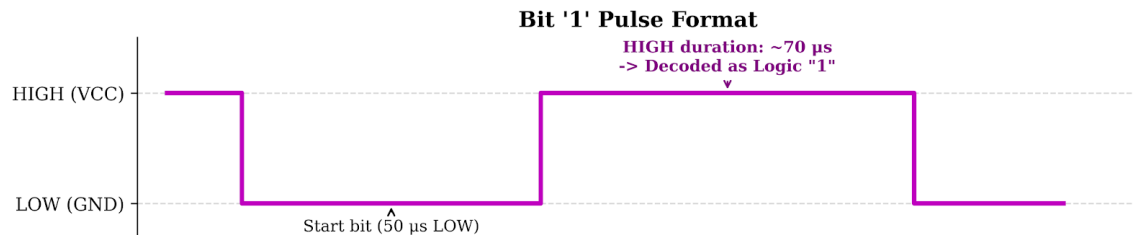
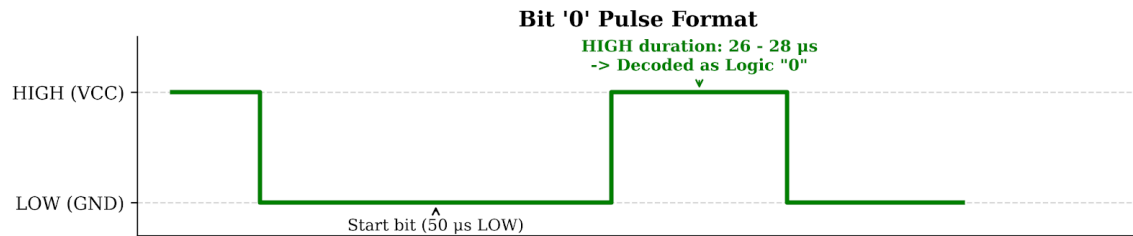
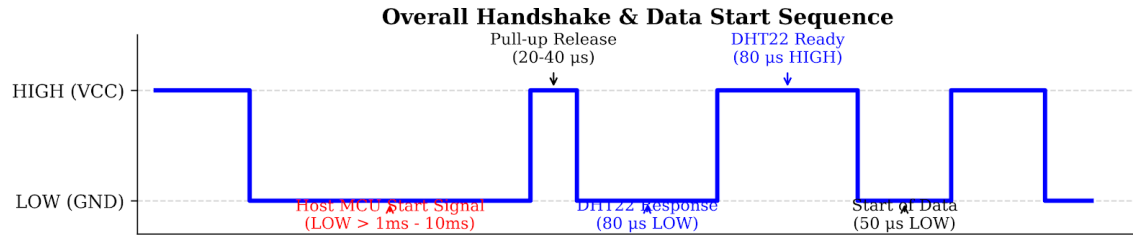
Σε αυτό το Παράρτημα παρατίθενται επιλεγμένα αποσπάσματα και διαγράμματα από τα επίσημα τεχνικά φυλλάδια (Datasheets) των κατασκευαστών. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για τη σχεδίαση του κυκλώματος.



Picture 11: Top (left) and bottom (right) views of the chip with input/output pins

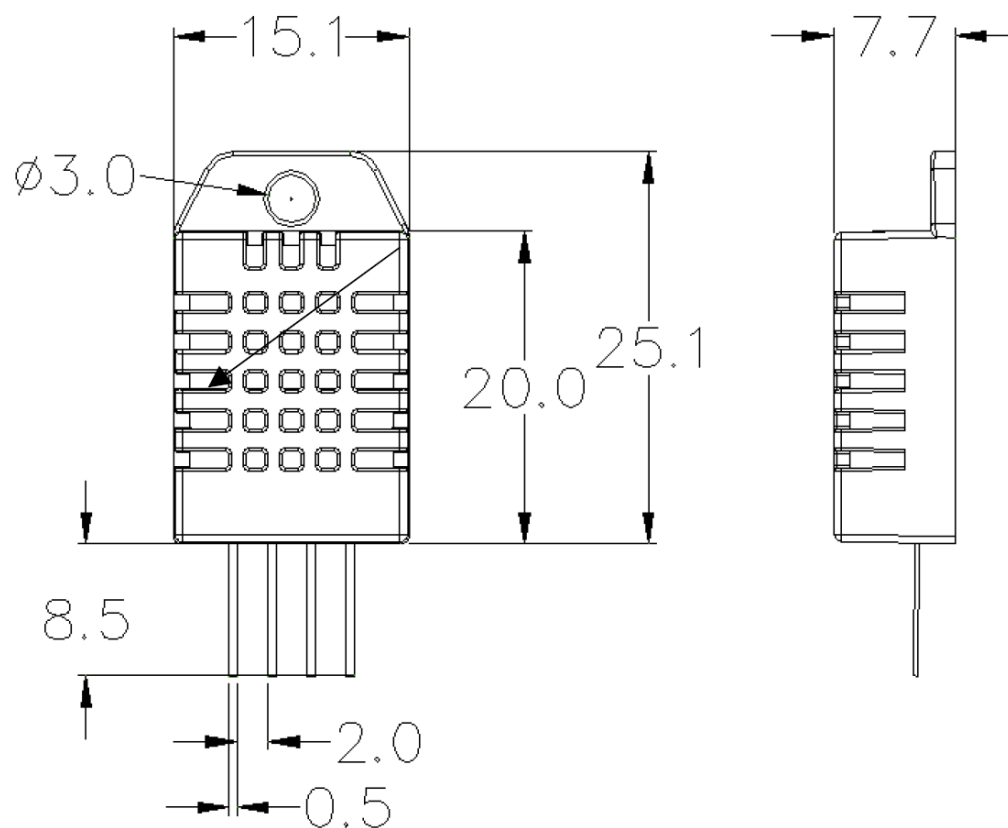


(a)



### 3. Technical Specification:

|                           |                                                      |
|---------------------------|------------------------------------------------------|
| Model                     | DHT22                                                |
| Power supply              | 3.3-6V DC                                            |
| Output signal             | digital signal via single-bus                        |
| Sensing element           | Polymer capacitor                                    |
| Operating range           | humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius         |
| Accuracy                  | humidity +2%RH(Max +5%RH); temperature <+-0.5Celsius |
| Resolution or sensitivity | humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius              |
| Repeatability             | humidity +1%RH; temperature +0.2Celsius              |
| Humidity hysteresis       | +0.3%RH                                              |
| Long-term Stability       | +0.5%RH/year                                         |
| Sensing period            | Average: 2s                                          |
| Interchangeability        | fully interchangeable                                |
| Dimensions                | small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm           |



Pin sequence number: 1 2 3 4 (from left to right direction).

| Pin | Function           |
|-----|--------------------|
| 1   | VDD---power supply |
| 2   | DATA--signal       |
| 3   | NULL               |
| 4   | GND                |

4 BLOCK DIAGRAM

Figure 4-1 SSD1306 Block Diagram

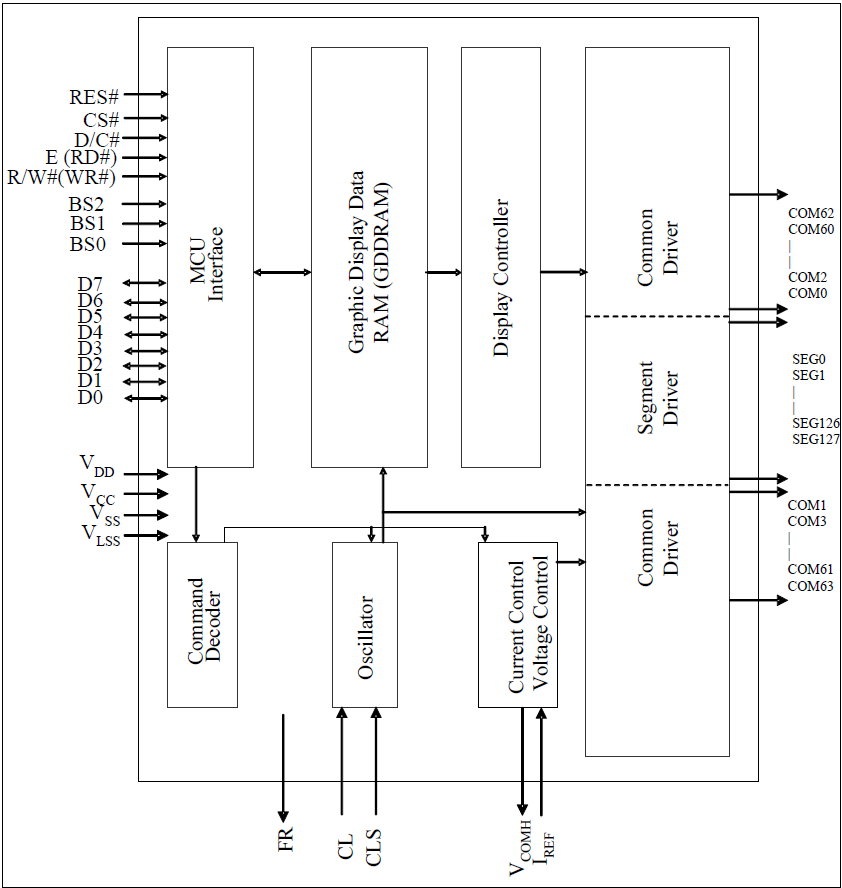


Figure 8-7 : I<sup>2</sup>C-bus data format

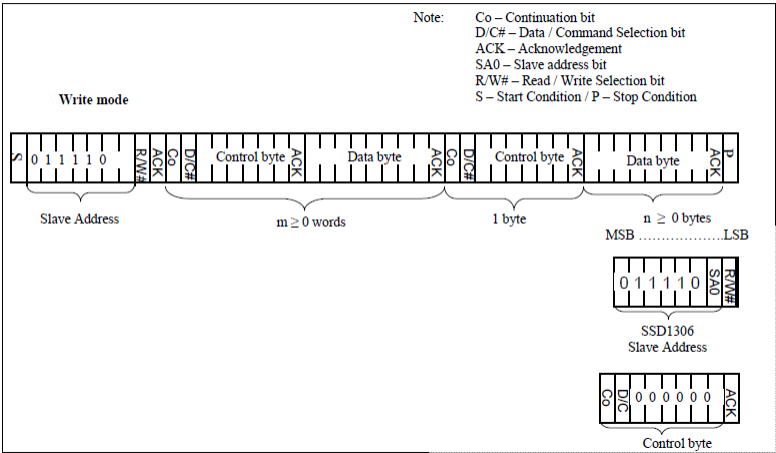


Figure 8-8 : Definition of the Start and Stop Condition

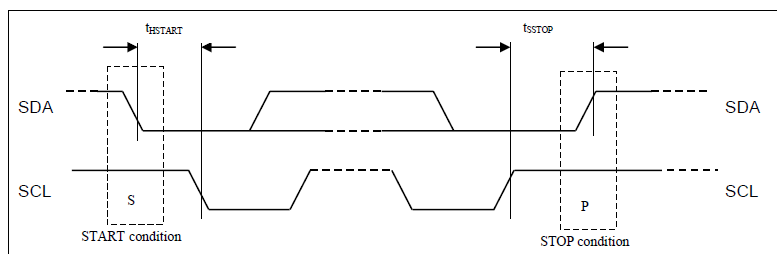


Figure 8-9 : Definition of the acknowledgement condition

