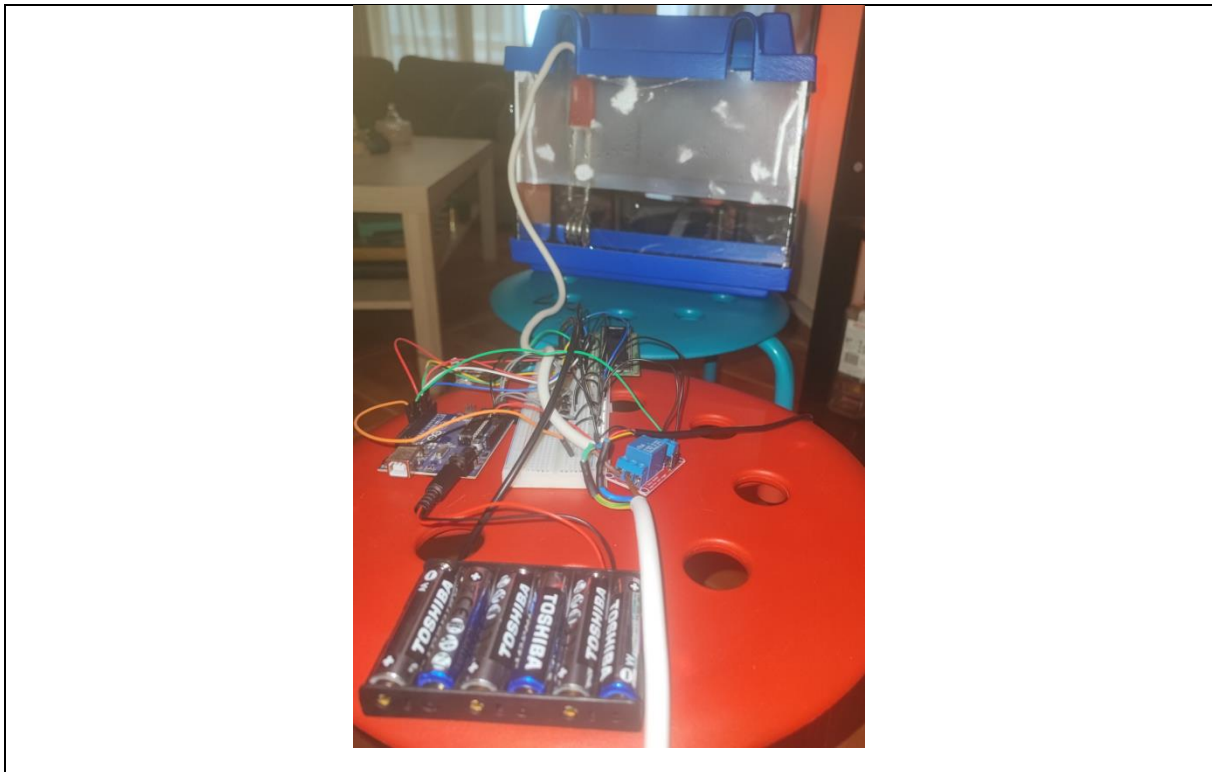


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λουτρό Κυκλοφορούμενου Νερού



Του φοιτητή

Χατζόπουλου Στυλιανού-Ραφαήλ

Αρ. Μητρώου: 513189

Επιβλέπων

Αναπληρωτής Καθηγητης

Χατζόπουλος Αργύριος

Σεπτέμβριος 2025

Τίτλος Δ.Ε. Λουτρό Κυκλοφορούμενου Νερού

Κωδικός Δ.Ε. 23287

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Χατζόπουλος Στυλιανός-Ραφαήλ

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Αργύριος Χατζόπουλος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 26-10-2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 10-9-2025

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 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 οποιοδήποτε 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.

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Χατζόπουλου Αργύρη. Το εγχείρημα αυτό γεννήθηκε από το ενδιαφέρον για την πρακτική εφαρμογή των αρχών του αυτομάτου ελέγχου και των ενσωματωμένων συστημάτων σε ένα πρόβλημα με πραγματική χρησιμότητα και υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας.

Η ανάγκη για ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας σε επιστημονικές και βιομηχανικές διεργασίες είναι διαρκής και κρίσιμη. Η επιλογή της κατασκευής ενός θερμοστατούμενου λουτρού προσέφερε το ιδανικό πεδίο για τη γεφύρωση της θεωρίας με την πράξη: από τη μελέτη της θερμοδυναμικής και των συστημάτων ελέγχου, στην επιλογή των κατάλληλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, τον σχεδιασμό του κυκλώματος, την ανάπτυξη του λογισμικού ελέγχου και, τέλος, την επικύρωση της λειτουργίας του μέσω προσομοίωσης.

Στόχος της εργασίας δεν είναι μόνο η παρουσίαση μιας τεχνικής λύσης, αλλά η τεκμηρίωση μιας ολοκληρωμένης μηχανολογικής προσέγγισης. Μέσα από τα κεφάλαια που ακολουθούν, ο αναγνώστης θα παρακολουθήσει βήμα-βήμα τη διαδικασία, από τη θεμελίωση της θεωρητικής αναγκαιότητας του έργου, στην αρχιτεκτονική του συστήματος, την υλοποίηση του κώδικα και την ανάλυση της απόδοσής του σε ένα εικονικό περιβάλλον.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την αξιολόγηση ενός θερμοστατούμενου λουτρού χαμηλού κόστους, το οποίο βασίζεται στην πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα Arduino. Το έργο αυτό απαντά στην πρόκληση του υψηλού κόστους του εξειδικευμένου εργαστηριακού εξοπλισμού, ο οποίος συχνά αποτελεί εμπόδιο για εκπαιδευτικά ιδρύματα, μικρά ερευνητικά εργαστήρια και αναπτυξιακές προσπάθειες. Η κεντρική ιδέα είναι η κατασκευή μιας λειτουργικής συσκευής που μπορεί να επιτύχει ακριβή και σταθερό έλεγχο της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας ευρέως διαθέσιμα και οικονομικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, ξεκινώντας από τη θεωρητική τεκμηρίωση των αρχών της θερμοδυναμικής και των απαιτήσεων ακρίβειας σε κρίσιμες φαρμακευτικές και αναλυτικές εφαρμογές, όπως η Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC), η Αλυσιδωτή Αντίδραση Πολυμεράσης (PCR) και οι δοκιμές διάλυσης φαρμάκων κατά USP. Ακολουθώντας, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του συστήματος, η επιλογή των κατάλληλων υλικών και η συναρμολόγηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Ο πυρήνας του συστήματος ελέγχου είναι ένας μικροελεγκτής Arduino Uno, ο οποίος διαχειρίζεται έναν ψηφιακό αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20, μια οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) για την απεικόνιση δεδομένων, και ένα ρελέ για την ενεργοποίηση ενός θερμομαντικού στοιχείου.

Το λογισμικό ελέγχου αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Arduino IDE και ενσωματώνει έναν προηγμένο αλγόριθμο ελέγχου τύπου Proportional-Integral-Derivative (PID), ο οποίος επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της ισχύος θέρμανσης για την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και την αποφυγή υπερβάσεων (overshoot). Η αξιολόγηση της απόδοσης της κατασκευής πραγματοποιήθηκε μέσω ενός αυστηρού πρωτοκόλλου δοκιμών, το οποίο μέτρησε την ακρίβεια, τη σταθερότητα, την ομοιομορφία και τον χρόνο απόκρισης του συστήματος.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η κατασκευή είναι ικανή να διατηρεί τη θερμοκρασία με σταθερότητα που προσεγγίζει τις προδιαγραφές πολλών εργαστηριακών διαδικασιών. Παρόλο που οι εγγενείς περιορισμοί των εξαρτημάτων χαμηλού κόστους, όπως η ακρίβεια του αισθητήρα, δεν επιτρέπουν τη χρήση της συσκευής σε αυστηρά ρυθμιζόμενες εφαρμογές cGMP (current Good Manufacturing Practice), αποδεικνύεται ότι αποτελεί μια εξαιρετικά βιώσιμη και πολύτιμη λύση για εκπαιδευτικούς σκοπούς, προκαταρκτικές έρευνες και εφαρμογές όπου η σταθερότητα και η επαναληψιμότητα είναι πιο κρίσιμες από την απόλυτη ακρίβεια. Η εργασία ολοκληρώνεται με προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις, όπως η χρήση αισθητήρων υψηλότερης ακρίβειας.

Λέξεις-Κλειδιά: Arduino, PID, Έλεγχος Θερμοκρασίας, Θερμοστατούμενο Λουτρό, Προσομοίωση, DS18B20.

Circulating Water Bath

Chatzopoulos Stylianos-Rafail

Abstract

This diploma thesis presents the design, implementation, and evaluation of a low-cost thermostated water bath based on the open-source Arduino platform. The project addresses the challenge of high costs associated with specialized laboratory equipment, which often hinders educational institutions, small research labs, and developmental efforts. The core idea is to construct a functional device capable of achieving precise and stable temperature control using widely available and affordable electronic components.

The methodology adopted involves a comprehensive approach, starting with the theoretical foundation of thermodynamics and precision requirements in critical pharmaceutical and analytical applications, such as High-Performance Liquid Chromatography (HPLC), Polymerase Chain Reaction (PCR), and USP dissolution tests for pharmaceuticals. Subsequently, the system design, material selection, and assembly of the electronic circuit were carried out. The control system's core is an Arduino Uno microcontroller, which manages a DS18B20 digital temperature sensor, a liquid crystal display (LCD) for data visualization, and a relay for activating a heating element.

The control software was developed in the Arduino IDE and incorporates an advanced Proportional-Integral-Derivative (PID) control algorithm, enabling dynamic adjustment of heating power to minimize temperature fluctuations and avoid overshoot. The performance evaluation was conducted through a rigorous testing protocol, measuring accuracy, stability, uniformity, and response time.

The results demonstrate that the construction can maintain temperature with stability approaching the specifications of many laboratory procedures. Although inherent limitations of low-cost components, such as sensor accuracy, do not allow its use in strictly regulated cGMP (current Good Manufacturing Practice) applications, it proves to be an extremely viable and valuable solution for educational purposes, preliminary research, and applications where stability and repeatability are more critical than absolute accuracy. The thesis concludes with proposals for future improvements, such as using higher-precision sensors.

Keywords: Arduino, PID, Temperature Control, Thermostated Bath, Simulation, DS18B20.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς και φίλους μου για την στήριξη και την ενθάρρυνσή τους σε κάθε μου βήμα.

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Περίληψη

Abstract

Ευχαριστίες

Περιεχόμενα

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Κατάλογος Πινάκων

Συνομογραφίες

Κεφάλαιο 1ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο και Επισκόπηση Τεχνολογίας

1.1 Αρχές Λειτουργίας και Τυπολογία Θερμοστατούμενων Λουτρών

1.2 Η Κρισιμότητα της Θερμοστάτησης σε Προηγμένες Αναλυτικές Τεχνικές

1.2.1 Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC)

1.2.2 Εφαρμογές Μοριακής Βιολογίας (PCR)

1.2.3 Δοκιμές Σταθερότητας Φαρμακευτικών Προϊόντων

1.2.4 Συσκευή Διάλυσης USP 4 (Flow-Through Cell)

1.3 Βασικές Παράμετροι Απόδοσης ενός Θερμοστατούμενου Λουτρού

1.4 Κανονιστικό Πλαίσιο και Πιστοποίηση Αναλυτικού Εξοπλισμού

Κεφάλαιο 2ο: Σχεδιασμός Συστήματος και Επιλογή Υλικών

2.1 Συνολική Αρχιτεκτονική του Συστήματος

2.2 Ανάλυση και Επιλογή Υλικού

2.2.1 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου - Arduino Uno

2.2.2 Αισθητήρας Θερμοκρασίας - DS18B20

2.2.3 Μονάδα Ενεργοποίησης - Relay Module

2.2.4 Διεπαφή Χρήστη - Οθόνη LCD 16x2 και Πλήκτρα

2.2.5 Θερμαντικό Στοιχείο (Heating Element)

2.2.6 Αντλία Νερού

2.2.7 Δοχείο/Περίβλημα του Λουτρού

2.3 Σχεδιασμός Ηλεκτρονικού Κυκλώματος

2.3.1 Προσομοίωση στο Tinkercad Circuits

2.4 Θέματα Τροφοδοσίας και Ασφάλειας

Κεφάλαιο 3ο: Ανάπτυξη Λογισμικού και Αλγόριθμος Ελέγχου

3.1 Θεωρία Αλγορίθμων Ελέγχου Θερμοκρασίας

3.1.1 Έλεγχος On-Off (Bang-Bang Control)

3.1.2 Έλεγχος PID (Proportional-Integral-Derivative Control)

3.2 Υλοποίηση Ελέγχου PID με τη Βιβλιοθήκη Arduino

3.3 Ανάπτυξη Λογισμικού Εφαρμογής

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση, Δοκιμές και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

4.1 Φυσική Υλοποίηση και Συναρμολόγηση

4.1.1 Προετοιμασία και Διάταξη Εξαρτημάτων

4.1.2 Συναρμολόγηση του Κυκλώματος Ελέγχου

4.1.3 Ενσωμάτωση του Κυκλώματος Ισχύος και Θέματα Ασφάλειας

- 4.1.4 Τελική Διάταξη και Ενσωμάτωση στο Δοχείο
- 4.2 Πρωτόκολλο Δοκιμών και Μεθοδολογία
 - 4.2.1 Εξοπλισμός και Συνθήκες Δοκιμών
 - 4.2.2 Διαδικασίες Μέτρησης Απόδοσης
- 4.3 Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων
 - 4.3.1 Αξιολόγηση Ακρίβειας
 - 4.3.2 Ανάλυση Σταθερότητας
 - 4.3.3 Ανάλυση Ομοιομορφίας
 - 4.3.4 Ανάλυση Χρόνου Απόκρισης
 - 4.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

- 5.1 Επίτευξη Στόχων και Συμπεράσματα
- 5.2 Προβλήματα και Περιορισμοί που Αντιμετωπίστηκαν
- 5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση
- 5.4 Οικονομική Ανάλυση και Κόστος-Όφελος
- 5.5 Εφαρμογές και Πεδίο Εφαρμογής
- 5.6 Μαθήματα που Αποκτήθηκαν (Lessons Learned)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας για On-Off λειτουργία

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Σχήμα 2.1: Μπλοκ Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής Συστήματος	22
--	----

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Σύγκριση Εμπορικών Τύπων Θερμοστατούμενων Λουτρών	16
Πίνακας 1.2: Απαιτήσεις Θερμοκρασίας σε Βασικές Φαρμακευτικές Εφαρμογές	18
Πίνακας 2.1: Προδιαγραφές Βασικών Ηλεκτρονικών Εξαρτημάτων	26
Πίνακας 2.2: Συστηματική Αντιστοίχιση Ακίδων (Pinout) του Arduino Uno	29
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα Δοκιμής Ακρίβειας	45
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Δοκιμής Ομοιομορφίας στους 60°C	47

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
ΔΠΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
HPLC	High pressure liquid chromatography
PCR	Polymerase chain reaction
PID	Proportional-integral-derivative
DIY	Do it yourself
ICH	International Council for Harmonisation
USP	United States Pharmacopeia
IQ	Installation Qualifications
OQ	Operation Qualifications
PQ	Performance Qualifications
DQ	Design Qualification
LCD	Liquid Crystal Display
ISO	International Organization for Standardization
AC	Alternating Current
ADC	Analog-to-Digital Converter
AIQ	Analytical Instrument Qualification
CGMP	current Good Manufacturing Practice
DC	Direct Current
I/O	Input/Output
NO	Normally Open
OLED	Organic Light Emitting Diode
PCB	Printed Circuit Board
PV	Process Variable
RCD	Residual Current Device
RH	Relative Humidity

Εισαγωγή

Η θερμοκρασία αποτελεί μία από τις πιο θεμελιώδεις και κρίσιμες παραμέτρους που διέπουν σχεδόν κάθε φυσική, χημική και βιολογική διεργασία. Στο πλαίσιο των επιστημονικών εργαστηρίων, ο ακριβής έλεγχος και η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας δεν είναι απλώς μια τεχνική λεπτομέρεια, αλλά ένας ακρογωνιαίος λίθος που καθορίζει την εγκυρότητα, την αξιοπιστία και την αναπαραγωγιμότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων. Από την κινητική των χημικών αντιδράσεων έως την τριτοταγή δομή των πρωτεϊνών και τη σταθερότητα των φαρμακευτικών δραστικών ουσιών, οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να επιφέρουν δραματικές αλλαγές, καθιστώντας τον έλεγχό της απαραίτητο.

Στις φαρμακευτικές και αναλυτικές επιστήμες, η απαίτηση για ακριβή θερμορύθμιση είναι ακόμη πιο επιτακτική. Διαδικασίες όπως η σύνθεση νέων φαρμάκων, οι ενζυμικές αντιδράσεις, η επώαση δειγμάτων, οι μελέτες σταθερότητας προϊόντων και οι δοκιμές διάλυσης φαρμακοτεχνικών μορφών εξαρτώνται απόλυτα από τη διατήρηση της θερμοκρασίας εντός αυστηρά καθορισμένων ορίων.¹ Τεχνικές αιχμής όπως η Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC) και η Αλυσιδωτή Αντίδραση Πολυμεράσης (PCR) απαιτούν περιβάλλοντα με θερμοκρασιακή σταθερότητα υψηλής ακρίβειας για την επίτευξη αξιόπιστων διαχωρισμών και αποτελεσματικής ενίσχυσης του DNA, αντίστοιχα.³ Για την κάλυψη αυτών των αναγκών, τα εργαστήρια βασίζονται σε εξειδικευμένο εξοπλισμό, με τα θερμοστατούμενα λουτρά να κατέχουν πρωταγωνιστικό ρόλο.

Ωστόσο, η πρόσβαση σε τέτοιου είδους εξοπλισμό υψηλής ακρίβειας συνοδεύεται συχνά από ένα σημαντικό οικονομικό κόστος. Τα εμπορικά θερμοστατούμενα λουτρά, ειδικά εκείνα που διαθέτουν προηγμένες δυνατότητες όπως η ανακυκλοφορία και η πιστοποίηση για ρυθμιστική συμμόρφωση, μπορούν να έχουν απαγορευτική τιμή για εκπαιδευτικά ιδρύματα, νεοφυείς ερευνητικές ομάδες ή εργαστήρια σε αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτή η οικονομική πρόκληση δημιουργεί ένα σημαντικό εμπόδιο στην εκπαίδευση, την καινοτομία και την έρευνα, περιορίζοντας τη δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων που απαιτούν ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία γεννήθηκε από την ανάγκη αντιμετώπισης αυτής της πρόκλησης. Αξιοποιώντας την επανάσταση του ανοιχτού κώδικα (open-source) και τη διαθεσιμότητα ισχυρών και οικονομικών πλατφορμών μικροελεγκτών, όπως το Arduino, το έργο αυτό στοχεύει να αποδείξει τη σκοπιμότητα σχεδιασμού και κατασκευής μιας εναλλακτικής λύσης χαμηλού κόστους.

Οι κύριοι στόχοι της εργασίας ορίζονται ως εξής:

- Να διερευνηθούν οι θεωρητικές αρχές της θερμορύθμισης και οι ειδικές απαιτήσεις ακρίβειας που διέπουν τις σύγχρονες αναλυτικές και φαρμακευτικές τεχνικές.
- Να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα πλήρως λειτουργικό, θερμοστατούμενο λουτρό, χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα Arduino και ευρέως διαθέσιμα ηλεκτρονικά εξαρτήματα.
- Να αναπτυχθεί και να υλοποιηθεί ένα στιβαρό λογισμικό ελέγχου, βασισμένο σε έναν αλγόριθμο Proportional-Integral-Derivative (PID), για την επίτευξη βέλτιστης θερμοκρασιακής απόκρισης.
- Να διενεργηθεί μια αυστηρή αξιολόγηση της απόδοσης της κατασκευασμένης συσκευής, συγκρίνοντας τις μετρούμενες παραμέτρους της (ακρίβεια, σταθερότητα, ομοιομορφία) με τα καθιερωμένα πρότυπα για εργαστηριακό εξοπλισμό.
- Να τεκμηριωθεί ολόκληρη η διαδικασία σε μια επίσημη ακαδημαϊκή δομή, παρέχοντας έναν αναλυτικό και αναπαραγωγίμο οδηγό για μελλοντικές εργασίες και βελτιώσεις.

Η δομή της εργασίας ακολουθεί μια λογική πορεία από τη θεωρία στην πράξη. Το Κεφάλαιο 1 παρέχει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο. Το Κεφάλαιο 2 αναλύει τον σχεδιασμό του συστήματος και την επιλογή των υλικών. Το Κεφάλαιο 3 εστιάζει στην ανάπτυξη του λογισμικού και του αλγορίθμου ελέγχου. Το Κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τη μεθοδολογία των δοκιμών και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης απόδοσης. Τέλος, το Κεφάλαιο 5 συνοψίζει τα συμπεράσματα του έργου και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντικές βελτιώσεις, ολοκληρώνοντας μια πλήρη μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας DIY (Do-It-Yourself) στην επίλυση πραγματικών εργαστηριακών προβλημάτων.

Κεφάλαιο 1ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο και Επισκόπηση Τεχνολογίας

Το κεφάλαιο αυτό θέτει τις θεωρητικές βάσεις για την κατανόηση της σημασίας και της λειτουργίας των θερμοστατούμενων λουτρών. Αναλύονται οι θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας, η ταξινόμηση των εμπορικών συστημάτων, η κρίσιμη σημασία της θερμοκρασίας σε εξειδικευμένες αναλυτικές τεχνικές και το ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει την πιστοποίηση του εργαστηριακού εξοπλισμού.

1.1 Αρχές Λειτουργίας και Τυπολογία Θερμοστατούμενων Λουτρών

Ένα θερμοστατούμενο λουτρό είναι μια εργαστηριακή συσκευή σχεδιασμένη για να διατηρεί ένα υγρό μέσο (συνήθως νερό) σε μια σταθερή και ακριβή θερμοκρασία για παρατεταμένες χρονικές περιόδους [1].



Εικόνα 1.1: Θερμοστατικό Υδατόλουτρο

Η βασική αρχιτεκτονική του περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στοιχεία:

1. **Δεξαμενή (Tank):** Ένα δοχείο που περιέχει το υγρό μέσο. Κατασκευάζεται συνήθως από ανθεκτικά και χημικά αδρανή υλικά, όπως ανοξείδωτος χάλυβας για αντοχή και ευκολία στον καθαρισμό, ή διαφανές πλεξιγκλάς για οπτικό έλεγχο των δειγμάτων [2].
2. **Θερμαντικό Στοιχείο (Heating Element):** Μια ηλεκτρική αντίσταση βυθισμένη στο υγρό, η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα. Η ισχύς της καθορίζει τον ρυθμό θέρμανσης του λουτρού [2].
3. **Αισθητήρας Θερμοκρασίας (Temperature Sensor):** Ένα θερμόμετρο, θερμοστοιχείο ή ψηφιακός αισθητήρας που μετρά συνεχώς τη θερμοκρασία του υγρού και παρέχει ανάδραση στο σύστημα ελέγχου.
4. **Μονάδα Ελέγχου (Control Unit):** Ο "εγκέφαλος" του συστήματος, ο οποίος συγκρίνει τη μετρούμενη θερμοκρασία με την επιθυμητή τιμή (setpoint) και ρυθμίζει την ισχύ που παρέχεται στο θερμαντικό στοιχείο για να διατηρήσει τη σταθερότητα.



1.2. Πάνελ ελέγχου θερμοκρασίας ενός θερμοστατούμενου λουτρού νερού



1.3. Πλωτή βάση για τοποθέτηση δειγμάτων σε θερμοστατούμενο λουτρό

Τα εμπορικά θερμοστατούμενα λουτρά ταξινομούνται κυρίως με βάση τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας και τις πρόσθετες λειτουργίες τους. Οι κύριοι τύποι είναι οι εξής [1].

- **Λουτρά Γενικής Χρήσης (Μη Ανακυκλοφορούντα - Non-Circulating):** Αυτός είναι ο πιο απλός και οικονομικός τύπος. Η μεταφορά θερμότητας βασίζεται αποκλειστικά στη φυσική συναγωγή (convection). Το θερμότερο νερό κοντά στο θερμαντικό στοιχείο ανεβαίνει, ενώ το ψυχρότερο κατεβαίνει, δημιουργώντας μια αργή κυκλοφορία. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι λιγότερο αποτελεσματική και μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία "νεκρών" σημείων (dead spots) ή θερμοκρασιακών βαθμίδων εντός του λουτρού, όπου η τοπική θερμοκρασία μπορεί να διαφέρει σημαντικά (έως και 2°C) από τη μέση τιμή [2]. Είναι κατάλληλα για εφαρμογές που δεν απαιτούν εξαιρετικά υψηλή ομοιομορφία, όπως η απλή προθέρμανση αντιδραστηρίων.
- **Λουτρά Ανακυκλοφορίας (Circulating Baths):** Αυτά τα λουτρά διαθέτουν μια ενσωματωμένη αντλία που αναγκάζει το νερό να κυκλοφορεί συνεχώς σε όλο τον όγκο της δεξαμενής. Αυτή η ενεργή κυκλοφορία εξασφαλίζει εξαιρετική ομοιομορφία και σταθερότητα θερμοκρασίας (συνήθως $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ή καλύτερη), καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων όπου η ακρίβεια είναι κρίσιμη, όπως ενζυμικές και ορολογικές μελέτες, μετρήσεις ιξώδους και βαθμονόμηση άλλων θερμομέτρων [1].
- **Λουτρά με Ανάδευση (Shaking Water Baths):** Συνδυάζουν τον έλεγχο της θερμοκρασίας με έναν μηχανισμό ανάδευσης (συνήθως παλινδρομικό ή τροχιακό). Αυτή η διπλή λειτουργία είναι απαραίτητη για εφαρμογές όπως η επώαση κυτταροκαλλιιεργειών, μελέτες διαλυτότητας και διαδικασίες πλύσης, όπου απαιτείται ταυτόχρονη θέρμανση και ανάμιξη [1].

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου λουτρού εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως το απαιτούμενο εύρος θερμοκρασίας, η αναγκαία ακρίβεια και ομοιομορφία, και η χωρητικότητα [1].

Πίνακας 1.1: Σύγκριση Εμπορικών Τύπων Θερμοστατούμενων Λουτρών

Χαρακτηριστικό	Λουτρό Γενικής Χρήσης (Μη Ανακυκλοφορούν)	Λουτρό Ανακυκλοφορίας	Λουτρό με Ανάδευση
Μηχανισμός Μεταφοράς Θερμότητας	Φυσική Συναγωγή	Εξαναγκασμένη Κυκλοφορία (Αντλία)	Φυσική Συναγωγή + Μηχανική Ανάδευση
Ομοιομορφία Θερμοκρασίας	Μέτρια έως Χαμηλή	Εξαιρετική	Καλή (βελτιωμένη από την ανάδευση)
Σταθερότητα Θερμοκρασίας	±0.5°C έως ±2°C	±0.2°C	±0.2°C έως ±1°C
Τυπικές Εφαρμογές	Προθέρμανση αντιδραστηρίων, τήξη υποστρωμάτων	Ενζυμικές αντιδράσεις, βαθμονομήσεις, HPLC, Φαρμακοποιία	Κυτταροκαλλιέργειες, μελέτες διαλυτότητας
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό	Μεσαίο έως Υψηλό

1.2 Η Κρισιμότητα της Θερμοστάτησης σε Προηγμένες Αναλυτικές Τεχνικές

Η ανάγκη για ακριβή θερμορύθμιση γίνεται απόλυτα σαφής όταν εξετάζονται οι απαιτήσεις συγκεκριμένων αναλυτικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται ευρέως στη φαρμακευτική βιομηχανία και την έρευνα.

1.2.1 Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC)

Στην HPLC, η θερμοκρασία της χρωματογραφικής στήλης είναι μια κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει άμεσα την απόδοση του διαχωρισμού. Οι επιδράσεις της είναι πολλαπλές [3]:

- **Χρόνος Έκλουσης (Retention Time):** Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το ιξώδες της κινητής φάσης, επιτρέποντας ταχύτερη ροή με χαμηλότερη πίεση συστήματος (backpressure). Ταυτόχρονα, επιταχύνει την κινητική των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αναλυτών και της στατικής φάσης. Σε τυπικές εφαρμογές αντίστροφης φάσης, αυτό οδηγεί σε μείωση του χρόνου έκλουσης, επιταχύνοντας την ανάλυση [3].
- **Εκλεκτικότητα (Selectivity):** Η θερμοκρασία μπορεί να μεταβάλλει την εκλεκτικότητα του διαχωρισμού, δηλαδή τη σχετική απόσταση μεταξύ των κορυφών διαφορετικών αναλυτών. Αυτό συμβαίνει επειδή η επίδραση της θερμοκρασίας δεν είναι ίδια για όλες τις ενώσεις. Έτσι, η θερμοκρασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση δύσκολων διαχωρισμών [5].
- **Σχήμα Κορυφής (Peak Shape):** Η ύπαρξη θερμοκρασιακών βαθμίδων κατά μήκος της στήλης,

που μπορεί να προκληθεί εάν μια ψυχρή κινητή φάση εισέλθει σε μια θερμαινόμενη στήλη, οδηγεί σε παραμόρφωση και διεύρυνση των χρωματογραφικών κορυφών. Για τον λόγο αυτό, συνιστάται η προθέρμανση της κινητής φάσης [3].

Για την εξασφάλιση της αναπαραγωγιμότητας και της στιβαρότητας (ruggedness) μιας μεθόδου HPLC, η διατήρηση της στήλης σε σταθερή θερμοκρασία (π.χ., 40°C) μέσω ενός θερμοστατούμενου κλιβάνου ή χιτωνίου είναι απαραίτητη [3].

1.2.2 Εφαρμογές Μοριακής Βιολογίας (PCR)

Η Αλυσιδωτή Αντίδραση Πολυμεράσης (PCR) είναι μια τεχνική που επιτρέπει την εκθετική ενίσχυση συγκεκριμένων τμημάτων DNA. Η διαδικασία είναι ουσιαστικά μια σειρά από επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους, όπου η ακρίβεια της θερμοκρασίας σε κάθε στάδιο είναι απολύτως κρίσιμη για την επιτυχία της αντίδρασης [4].

- **Αποδιάταξη (Denaturation):** Το δίκλωνο DNA θερμαίνεται στους 94-95°C. Σε αυτή τη θερμοκρασία, οι δεσμοί υδρογόνου μεταξύ των δύο αλυσίδων σπάνε, και το DNA διαχωρίζεται σε δύο μονόκλωνες αλυσίδες-καλούπια [4].
- **Υβριδοποίηση (Annealing):** Η θερμοκρασία χαμηλώνει στους 50-65°C. Αυτό επιτρέπει στους ειδικούς εκκινητές (primers) να προσδεθούν στις συμπληρωματικές περιοχές των μονόκλωνων αλυσίδων DNA. Η βέλτιστη θερμοκρασία εξαρτάται από τη σύσταση των εκκινητών [6].
- **Επιμήκυνση (Extension):** Η θερμοκρασία αυξάνεται στους 72°C, τη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας για την Taq DNA πολυμεράση, ένα θερμοάαντοχο ένζυμο που συνθέτει τις νέες αλυσίδες DNA [4].

Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται 20-40 φορές. Ο έλεγχος αυτών των θερμοκρασιών πραγματοποιείται από εξειδικευμένες συσκευές που ονομάζονται θερμικοί κυκλοποιητές (thermocyclers), οι οποίοι είναι ουσιαστικά προηγμένα, πολυ-φρεατικά θερμοστατούμενα συστήματα [6].

1.2.3 Δοκιμές Σταθερότητας Φαρμακευτικών Προϊόντων

Οι δοκιμές αυτές είναι απαραίτητες για τον καθορισμό της διάρκειας ζωής (shelf-life) ενός φαρμακευτικού προϊόντος. Οι διεθνείς κανονιστικές αρχές, μέσω των οδηγιών του Διεθνούς Συμβουλίου για την Εναρμόνιση (ICH), καθορίζουν αυστηρές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας για αυτές τις μελέτες [7].

- **Επιταχυνόμενες Δοκιμές (Accelerated Testing):** Για να ληφθούν γρήγορα δεδομένα σχετικά με τη σταθερότητα, τα προϊόντα εκτίθενται σε συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και υγρασίας. Μια τυπική συνθήκη είναι 40°C ± 2°C και 75% ± 5% σχετική υγρασία (RH) για περίοδο 6 μηνών [7].
- **Μακροχρόνιες Δοκιμές (Long-Term Testing):** Αυτές οι δοκιμές προσομοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες αποθήκευσης και διαρκούν για μήνες ή και χρόνια. Τυπικές συνθήκες είναι 25°C ± 2°C / 60% ± 5% RH ή 30°C ± 2°C / 65% ± 5% RH, ανάλογα με την κλιματική ζώνη για την οποία προορίζεται το προϊόν [7].

Η ικανότητα διατήρησης αυτών των θερμοκρασιών με την καθορισμένη ακρίβεια για μεγάλες χρονικές περιόδους είναι μια απόλυτη ρυθμιστική απαίτηση.

1.2.4 Συσκευή Διάλυσης USP 4 (Flow-Through Cell)

Η συσκευή διάλυσης τύπου 4 της Φαρμακοποιίας των ΗΠΑ (USP Apparatus 4) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας απελευθέρωσης της δραστικής ουσίας από φαρμακοτεχνικές μορφές ελεγχόμενης αποδέσμευσης, εμφυτεύματα, αλοιφές κ.λπ. [8]. Η θερμοστάτηση είναι κρίσιμη για δύο λόγους:

1. **Προσομοίωση Φυσιολογικών Συνθηκών:** Οι περισσότερες δοκιμές στοχεύουν στην προσομοίωση των συνθηκών του ανθρώπινου σώματος, επομένως η θερμοκρασία του μέσου διάλυσης πρέπει να διατηρείται σταθερή στους $37.0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. [9]
2. **Επαναληψιμότητα:** Η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τη διαλυτότητα της δραστικής ουσίας και το ιξώδες του μέσου, παράγοντες που καθορίζουν την κινητική της διάλυσης. Ακόμη και μικρές αποκλίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικά διαφορετικά προφίλ διάλυσης, θέτοντας σε κίνδυνο την αξιοπιστία της μεθόδου [9].

Για να επιτευχθεί αυτό, ολόκληρη η κυψελίδα ροής (flow-through cell) περιβάλλεται από ένα χιτώνιο (jacket) όπου κυκλοφορεί συνεχώς νερό από ένα εξωτερικό θερμοστατούμενο λουτρό, εξασφαλίζοντας σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία [8]

Πίνακας 1.2: Απαιτήσεις Θερμοκρασίας σε Βασικές Φαρμακευτικές Εφαρμογές

Εφαρμογή	Τυπική Θερμοκρασία Λειτουργίας	Απαιτούμενη Ακρίβεια / Σταθερότητα	Σκοπός Θερμορύθμισης
HPLC (Στήλη)	40°C	Υψηλή σταθερότητα (π.χ. $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)	Έλεγχος χρόνου έκλυσης, εκλεκτικότητας, πίεσης
PCR	95°C / 50-65°C / 72°C (Κύκλοι)	Υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα αλλαγής	Ενεργοποίηση συγκεκριμένων βιοχημικών σταδίων
Δοκιμές Σταθερότητας (Επιταχ.)	40°C	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ (ICH Guideline)	Επιτάχυνση χημικής αποικοδόμησης
Διάλυση (USP 4)	37°C	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (USP Guideline)	Προσομοίωση φυσιολογικών συνθηκών, κινητικής διάλυσης

1.3 Βασικές Παράμετροι Απόδοσης ενός Θερμοστατούμενου Λουτρού

Η αποτελεσματικότητα και η καταλληλότητα ενός θερμοστατούμενου λουτρού για συγκεκριμένες εργαστηριακές εφαρμογές δεν αξιολογούνται μόνο με βάση τον μηχανισμό θέρμανσης, αλλά κυρίως από συγκεκριμένες παραμέτρους απόδοσης που ποσοτικοποιούν την ικανότητά του να διατηρεί σταθερή και ακριβή θερμοκρασία. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- **Ακρίβεια (Accuracy):** Η ακρίβεια αναφέρεται στο πόσο κοντά είναι η μετρούμενη θερμοκρασία του λουτρού στην πραγματική, αληθή τιμή της. Στην πράξη, αυτό αξιολογείται συγκρίνοντας την ένδειξη του λουτρού με αυτή ενός πιστοποιημένου, ιχνηλάσιμου θερμομέτρου αναφοράς. Για πολλές ρυθμιζόμενες εφαρμογές (π.χ., φαρμακευτικές), απαιτείται πολύ υψηλή ακρίβεια, συχνά εντός $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ή και καλύτερα, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια του χρησιμοποιούμενου αισθητήρα θερμοκρασίας και τη σωστή βαθμονόμηση του συστήματος.
- **Σταθερότητα (Stability):** Η σταθερότητα περιγράφει την ικανότητα του λουτρού να διατηρεί τη θερμοκρασία του εντός ενός πολύ στενού εύρους διακυμάνσεων γύρω από την επιθυμητή τιμή (setpoint) με την πάροδο του χρόνου. Μια υψηλή σταθερότητα σημαίνει ελάχιστες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας μετά την επίτευξη του setpoint. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός αποδοτικού αλγορίθμου ελέγχου (όπως ο PID), της επαρκούς ισχύος θέρμανσης και της καλής μόνωσης του δοχείου. Για κρίσιμες εφαρμογές, η σταθερότητα μπορεί να απαιτείται να είναι εντός $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ή $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.
- **Ομοιομορφία (Uniformity):** Η ομοιομορφία αναφέρεται στην ομοιογένεια της θερμοκρασίας σε διαφορετικά σημεία εντός του υγρού μέσου του λουτρού. Ένα ιδανικό λουτρό θα είχε την ίδια θερμοκρασία παντού. Ωστόσο, στην πράξη, υπάρχουν πάντα μικρές διαφορές. Η ομοιομορφία είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν τοποθετούνται πολλά δείγματα ταυτόχρονα ή όταν το μέγεθος των δειγμάτων είναι μεγάλο. Τα λουτρά κυκλοφορίας (με αντλία) επιτυγχάνουν πολύ καλύτερη ομοιομορφία σε σύγκριση με τα μη-ανακυκλοφορούντα, καθώς η εξαναγκασμένη κίνηση του υγρού εξαλείφει τα "νεκρά σημεία" και τις θερμοκρασιακές βαθμίδες. Η αξιολόγηση της ομοιομορφίας γίνεται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε πολλαπλά σημεία εντός του λουτρού.
- **Χρόνος Απόκρισης (Response Time):** Ο χρόνος απόκρισης είναι ο χρόνος που χρειάζεται το λουτρό για να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία-στόχο (setpoint) από μια αρχική θερμοκρασία (π.χ., θερμοκρασία δωματίου) και να σταθεροποιηθεί εντός του καθορισμένου εύρους ανοχής. Ένας μικρός χρόνος απόκρισης είναι επιθυμητός για την αποδοτική λειτουργία του εργαστηρίου, ειδικά όταν απαιτούνται συχνές αλλαγές setpoint. Επηρεάζεται από την ισχύ του θερμαντικού στοιχείου, τον όγκο του υγρού, τη μόνωση και την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου ελέγχου.

Η κατανόηση και η αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων είναι κρίσιμη για την επιλογή και τον σχεδιασμό θερμοστατούμενων λουτρών, καθώς και για την επικύρωση της λειτουργίας τους σε οποιοδήποτε εργαστηριακό ή βιομηχανικό περιβάλλον.

1.4 Κανονιστικό Πλαίσιο και Πιστοποίηση Αναλυτικού Εξοπλισμού

Η χρήση αναλυτικού εξοπλισμού στη φαρμακευτική βιομηχανία δεν είναι απλώς θέμα απόκτησης δεδομένων, αλλά απόκτησης *αξιόπιστων, έγκυρων και τεκμηριωμένων* δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό, υπάρχουν αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια που καθορίζουν τις διαδικασίες με τις οποίες ο εξοπλισμός πρέπει να αποδεικνύεται κατάλληλος για την προβλεπόμενη χρήση του. Η κεντρική έννοια εδώ είναι η **Πιστοποίηση Αναλυτικού Εξοπλισμού (Analytical Instrument Qualification - AIQ)**, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Γενικό Κεφάλαιο της Φαρμακοποιίας των ΗΠΑ (USP) [11]

Η AIQ είναι μια ολιστική διαδικασία που χωρίζεται σε τέσσερις διακριτές φάσεις:

1. **Πιστοποίηση Σχεδιασμού (Design Qualification - DQ):** Η τεκμηριωμένη διαδικασία που επιβεβαιώνει ότι ο σχεδιασμός του προτεινόμενου οργάνου είναι κατάλληλος για την προβλεπόμενη χρήση του, πριν καν αυτό αγοραστεί.
2. **Πιστοποίηση Εγκατάστασης (Installation Qualification - IQ):** Η τεκμηριωμένη επαλήθευση ότι το όργανο, όπως παραδόθηκε και εγκαταστάθηκε, πληροί τις προδιαγραφές του κατασκευαστή και είναι κατάλληλα τοποθετημένο στο επιλεγμένο περιβάλλον [12].
3. **Πιστοποίηση Λειτουργίας (Operational Qualification - OQ):** Η τεκμηριωμένη απόδειξη ότι το όργανο λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του σε όλο το προβλεπόμενο εύρος λειτουργίας. Για ένα θερμοστατούμενο λουτρό, αυτό θα περιλάμβανε τη δοκιμή της ικανότητάς του να φτάνει και να διατηρεί διάφορες θερμοκρασίες-στόχους.
4. **Πιστοποίηση Απόδοσης (Performance Qualification - PQ):** Η τεκμηριωμένη απόδειξη ότι το όργανο λειτουργεί με συνέπεια σύμφωνα με προκαθορισμένα κριτήρια και είναι κατάλληλο για την προβλεπόμενη αναλυτική του χρήση. Αυτό περιλαμβάνει δοκιμές ρουτίνας που προσομοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες χρήσης [12].

Για εξοπλισμό που ελέγχει τη θερμοκρασία, όπως τα θερμοστατούμενα λουτρά, αυτές οι διαδικασίες αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Το κεφάλαιο **USP Dissolution** είναι κατηγορηματικό: η θερμοκρασία του μέσου διάλυσης πρέπει να διατηρείται στους $37\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής [13]. Επιπλέον, η θερμοκρασία πρέπει να ελέγχεται σε κάθε δοχείο πριν από την έναρξη κάθε δοκιμής, χρησιμοποιώντας ένα βαθμονομημένο θερμόμετρο [13]. Η έννοια της **βαθμονόμησης (calibration)** είναι θεμελιώδης: κάθε όργανο μέτρησης που χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση (π.χ., το θερμόμετρο αναφοράς) πρέπει και το ίδιο να έχει βαθμονομηθεί έναντι προτύπων με αναγνωρισμένη ιχνηλασιμότητα (traceable standards) [14].

Αυτές οι αυστηρές απαιτήσεις δημιουργούν μια σημαντική πρόκληση για ένα έργο χαμηλού κόστους. Ο αισθητήρας που επιλέχθηκε για αυτό το έργο, ο DS18B20, έχει ονομαστική ακρίβεια $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ στην καλύτερη περίπτωση [15]. Αυτό σημαίνει ότι η εγγενής αβεβαιότητα του ίδιου του αισθητήρα καταναλώνει ολόκληρο το αποδεκτό εύρος ανοχής που ορίζει η USP για μια δοκιμή διάλυσης. Κατά συνέπεια, ενώ η κατασκευή μπορεί να επιδείξει εξαιρετική *σταθερότητα* (μικρές διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή) και *επαναληψιμότητα*, δεν μπορεί να ισχυριστεί ότι πληροί το πρότυπο *απόλυτης ακρίβειας* της USP χωρίς μια διαδικασία βαθμονόμησης έναντι ενός πιστοποιημένου θερμομέτρου. Αυτή η διάκριση μεταξύ ακρίβειας, σταθερότητας και επαναληψιμότητας αποτελεί κεντρικό θέμα στην αξιολόγηση της απόδοσης της παρούσας κατασκευής.

Κεφάλαιο 2ο: Σχεδιασμός Συστήματος και Επιλογή Υλικών

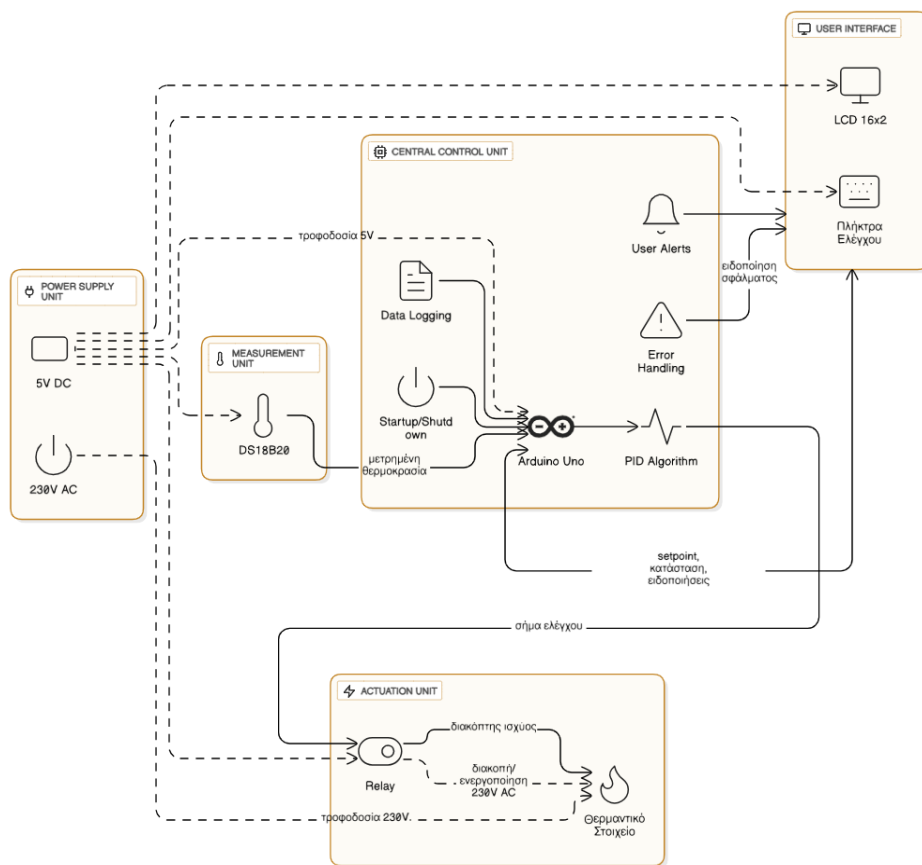
Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει λεπτομερώς τη διαδικασία σχεδιασμού του θερμοστατούμενου λουτρού, από τη συνολική αρχιτεκτονική μέχρι την τεκμηριωμένη επιλογή κάθε επιμέρους εξαρτήματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση των τεχνικών προδιαγραφών των υλικών, στον σχεδιασμό του ηλεκτρονικού κυκλώματος και στα κρίσιμα θέματα ασφάλειας που σχετίζονται με τη διαχείριση τάσης δικτύου.

2.1 Συνολική Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Η αρχιτεκτονική του συστήματος σχεδιάστηκε με γνώμονα την απλότητα, το χαμηλό κόστος και τη χρήση ευρέως διαθέσιμων εξαρτημάτων, διατηρώντας παράλληλα τη δυνατότητα για ακριβή έλεγχο. Η δομή του συστήματος μπορεί να αναλυθεί σε πέντε διακριτά, αλληλεπιδρώντα υποσυστήματα, όπως φαίνεται στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα.

Η ροή πληροφορίας και ελέγχου στο σύστημα έχει ως εξής:

1. Η **Μονάδα Μέτρησης**, που αποτελείται από τον ψηφιακό αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20, μετρά συνεχώς τη θερμοκρασία του νερού στο λουτρό.
2. Η μετρούμενη τιμή αποστέλλεται στην **Κεντρική Μονάδα Ελέγχου**, τον μικροελεγκτή Arduino Uno.
3. Ο Arduino συγκρίνει την τρέχουσα θερμοκρασία (Process Variable - PV) με την επιθυμητή θερμοκρασία-στόχο (Setpoint - SP), η οποία έχει οριστεί από τον χρήστη.
4. Ένας αλγόριθμος ελέγχου PID, που εκτελείται στον Arduino, υπολογίζει το σφάλμα (SP - PV) και καθορίζει την απαιτούμενη διόρθωση, παράγοντας ένα σήμα εξόδου.
5. Αυτό το σήμα ελέγχου αποστέλλεται στη Μονάδα Ενεργοποίησης.
6. Η μονάδα ρελέ (Relay Module) λαμβάνει το σήμα χαμηλής ισχύος από τον Arduino και λειτουργεί ως διακόπτης για το κύκλωμα υψηλής ισχύος του θερμαντικού στοιχείου.
7. Το θερμαντικό στοιχείο ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται, παρέχοντας θερμική ενέργεια στο νερό.
8. Η **Διεπαφή Χρήστη**, που περιλαμβάνει μια οθόνη LCD και πλήκτρα, επιτρέπει στον χρήστη να ορίζει την επιθυμητή θερμοκρασία και να παρακολουθεί την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος (τρέχουσα θερμοκρασία, setpoint, κατάσταση ρελέ).
9. Η **Μονάδα Τροφοδοσίας** παρέχει τις απαραίτητες τάσεις για τη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων: χαμηλή τάση (5V DC) για τα ηλεκτρονικά ελέγχου και υψηλή τάση (230V AC) για το θερμαντικό στοιχείο.



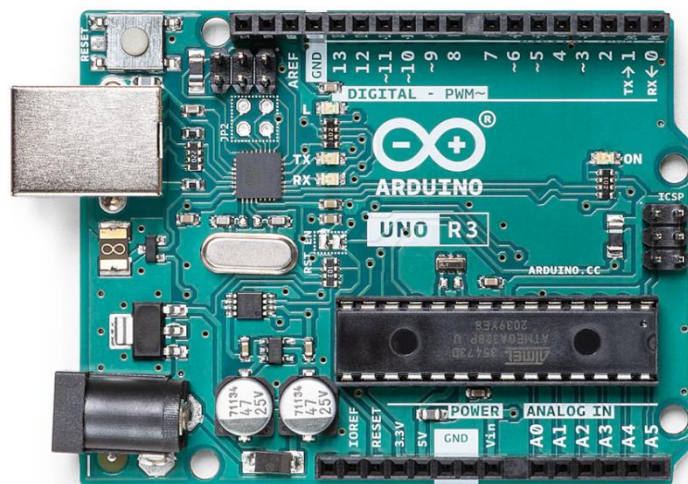
Σχήμα 2.1: Μπλοκ Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής Συστήματος

2.2 Ανάλυση και Επιλογή Υλικού

Η επιλογή κάθε εξαρτήματος έγινε μετά από προσεκτική μελέτη των τεχνικών προδιαγραφών του, με στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων του έργου και τη διασφάλιση της συμβατότητας.

2.2.1 Κεντρική Μονάδα Ελέγχου - Arduino Uno

Η πλακέτα Arduino Uno Rev3 επιλέχθηκε ως ο εγκέφαλος του συστήματος για τους ακόλουθους λόγους:



2.1 Arduino Uno Rev3

- **Μικροελεγκτής:** Βασίζεται στον ATmega328P, έναν 8-bit μικροελεγκτή με 32 KB Flash μνήμης, 2 KB SRAM και 1 KB EEPROM, τα οποία είναι υπεραρκετά για τις ανάγκες του κώδικα ελέγχου PID και της διαχείρισης της διεπαφής χρήστη [17].
- **Είσοδοι/Εξοδοι (I/O):** Διαθέτει 14 ψηφιακές ακίδες I/O (εκ των οποίων οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για PWM) και 6 αναλογικές εισόδους, παρέχοντας άφθονες συνδέσεις για όλα τα περιφερειακά (αισθητήρας, LCD, πλήκτρα, ρελέ) [18].
- **Τάση Λειτουργίας:** Λειτουργεί στα 5V, τάση που είναι συμβατή με τα περισσότερα περιφερειακά αισθητήρων και οθονών [19]
- **Οικοσύστημα:** Η τεράστια κοινότητα χρηστών, η πληθώρα διαθέσιμων βιβλιοθηκών (όπως η PID και η DallasTemperature) και η απλότητα του περιβάλλοντος προγραμματισμού (IDE) μειώνουν δραστικά τον χρόνο ανάπτυξης και διευκολύνουν την επίλυση προβλημάτων [18].

2.2.2 Αισθητήρας Θερμοκρασίας - DS18B20

Ο DS18B20 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας που επιλέχθηκε για τα εξής χαρακτηριστικά [15]: **Διεπαφή Επικοινωνίας:** Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 1-Wire, το οποίο απαιτεί μόνο μία ψηφιακή ακίδα του Arduino για την επικοινωνία δεδομένων, εξοικονομώντας πολυτίμες I/O θύρες [15]

- **Εύρος Μέτρησης:** Μετρά θερμοκρασίες από -55°C έως $+125^{\circ}\text{C}$, καλύπτοντας πλήρως το εύρος των εργαστηριακών εφαρμογών-στόχων (π.χ., 37°C , 40°C , 56°C) [16].
- **Ακρίβεια:** Η ονομαστική του ακρίβεια είναι $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ στο εύρος από -10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, αυτό το χαρακτηριστικό αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα για την επίτευξη συμμόρφωσης με τα πιο αυστηρά πρότυπα [15]
- **Ανάλυση:** Η ανάλυση είναι προγραμματιζόμενη από 9 έως 12 bits, επιτρέποντας θεωρητική ανάλυση έως και 0.0625°C [15].
- **Μορφή:** Η αδιάβροχη έκδοση σε μορφή καθετήρα (probe), η οποία και επιλέχθηκε, είναι ιδανική για άμεση και ασφαλή βύθιση στο νερό [20].

Για τη σωστή λειτουργία του απαιτείται η χρήση μιας αντίστασης ανύψωσης (pull-up resistor) 4.7kΩ μεταξύ της γραμμής δεδομένων και της τροφοδοσίας 5V [21].

2.2.3 Μονάδα Ενεργοποίησης - Relay Module

Για τον έλεγχο του θερμαντικού στοιχείου, το οποίο λειτουργεί με τάση δικτύου (230V AC), είναι απαραίτητη η χρήση ενός ρελέ για την ηλεκτρική απομόνωση του κυκλώματος ελέγχου (Arduino) από το κύκλωμα ισχύος. Επιλέχθηκε μια έτοιμη μονάδα ρελέ (relay module) 5V αντί για έναν μεμονωμένο ρελέ, καθώς προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα [22]:



2.2 Waterproof temperature sensor ds18b20

- **Συμβατότητα:** Λειτουργεί με σήμα ελέγχου λογικού επιπέδου 5V, καθιστώντας το άμεσα συμβατό με τις ψηφιακές εξόδους του Arduino.
- **Ενσωματωμένος Οδηγός:** Περιλαμβάνει το απαραίτητο κύκλωμα οδήγησης (έναν τρανζίστορ, όπως το BC548) και μια διόδο προστασίας (flyback diode, όπως η 1N4007). Αυτό απλοποιεί δραματικά το κύκλωμα, καθώς ο Arduino μπορεί να οδηγήσει απευθείας τη μονάδα χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα, και προστατεύει την ψηφιακή έξοδο του μικροελεγκτή από τις επαγωγικές τάσεις που δημιουργούνται κατά την απενεργοποίηση του πηνίου του ρελέ [23].
- **Ονομαστική Ισχύς:** Οι επαφές του ρελέ είναι συνήθως ονομαστικής αντοχής 10A στα 250VAC, τιμή που υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις των περισσότερων εμπορικών θερμαντικών στοιχείων εμβύθισης [24].

Το θερμαντικό στοιχείο συνδέεται στις κλέμες COM (Common) και NO (Normally Open) του ρελέ. Όταν ο Arduino στέλνει σήμα ενεργοποίησης, οι επαφές NO-COM κλείνουν, επιτρέποντας τη ροή ρεύματος προς το θερμαντικό στοιχείο [22].

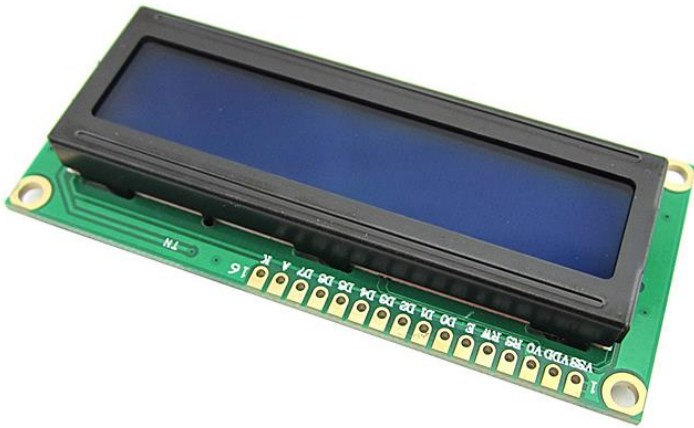
2.3 Relay Module

2.2.4 Διεπαφή Χρήστη - Οθόνη LCD 16x2 και Πλήκτρα

Για την αλληλεπίδραση με τον χρήστη, επιλέχθηκαν:

- **Οθόνη LCD 16x2:** Μια τυπική αλφαριθμητική οθόνη υγρών κρυστάλλων με ελεγκτή HD44780 (ή συμβατό). Μπορεί να απεικονίσει 2 γραμμές των 16 χαρακτήρων, αρκετές για την ταυτόχρονη εμφάνιση της τρέχουσας θερμοκρασίας και της θερμοκρασίας-στόχου [25]. Θα συνδεθεί σε λειτουργία 4-bit για εξοικονόμηση ακίδων του Arduino [26]. Ένα ποτενσιόμετρο 10kΩ είναι απαραίτητο για τη ρύθμιση της αντίθεσης (contrast) της οθόνης [27].
- **Πλήκτρα (Buttons):** Απλοί διακόπτες στιγμιαίας πίεσης (momentary push buttons) θα χρησιμοποιηθούν για την αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας-στόχου και για την

ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του ελέγχου.



2.4 Οθόνη LCD 16x2



2.5 Κουμπί

2.2.5 Θερμαντικό Στοιχείο (Heating Element)

Η επιλογή του θερμαντικού στοιχείου εξαρτάται από τον όγκο του νερού και τον επιθυμητό χρόνο θέρμανσης. Η απαιτούμενη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από τον τύπο της θερμιδομετρίας:

$$P = \frac{t \cdot m \cdot c}{\Delta T \cdot \eta} \quad (2.1)$$

όπου:

- P είναι η ισχύς σε Watts (W)
- m είναι η μάζα του νερού σε kg (για το νερό, 1 L \approx 1 kg)
- c είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού
- ΔT είναι η επιθυμητή αύξηση της θερμοκρασίας σε $^{\circ}\text{C}$
- t είναι ο επιθυμητός χρόνος θέρμανσης σε δευτερόλεπτα
- η είναι ο συντελεστής απόδοσης (συνήθως 0.8-0.95 για απώλειες στο περιβάλλον)

Για παράδειγμα, για τη θέρμανση 4 λίτρων νερού από 20°C σε 40°C ($\Delta T=20^{\circ}\text{C}$) σε 15 λεπτά (900 s) με απόδοση 90%, η απαιτούμενη ισχύς είναι:

$$Q = 4 \cdot 4.186 \cdot 20 = 334.880 \text{ J} \quad (2.2)$$

$$P = \frac{334.880}{900 \cdot 0.90} \approx 413.4 \text{ W} \quad (2.3)$$

Αναλύοντάς το:

Ο τύπος υπολογίζει την απαιτούμενη **ισχύ (P)** με βάση τον τύπο:

$$P = \frac{Q}{t \cdot \eta} \quad (2.4)$$

όπου:

- $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ είναι η απαιτούμενη θερμότητα (σε Joule) (2.5)
- $m=4\text{kg}$ είναι η μάζα νερού
- $c=4186\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ είναι η ειδική θερμότητα νερού
- $\Delta T=20^\circ\text{C}$: μεταβολή θερμοκρασίας
- $t=900\text{s}$: χρόνος θέρμανσης
- $\eta=0.90$: απόδοση του θερμαντικού συστήματος (π.χ. ηλεκτρική αντίσταση)

Ένα τυπικό εμπορικό θερμαντικό στοιχείο εμβύθισης (immersion heater), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.6** ισχύος 1000W - 1500W είναι υπεραρκετό για τις ανάγκες ενός μικρού εργαστηριακού λουτρού (έως 5-10 L) και θα εξασφαλίσει γρήγορους χρόνους απόκρισης [28].

Τα στοιχεία αυτά είναι σχεδιασμένα για λειτουργία σε νερό και διατίθενται σε διάφορες ονομαστικές τάσεις και ισχύς [29].

2.2.6 Αντλία Νερού

Για την ενίσχυση της ομοιομορφίας της θερμοκρασίας εντός του λουτρού, ενσωματώθηκε μια μικρή υποβρύχια ηλεκτρική αντλία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε 1 τεμάχιο αθόρυβης υποβρύχιας μίνι αντλίας Νερού DC 3V-5V. Η αντλία αυτή συμβάλλει στην ανακυκλοφορία του νερού, μειώνοντας τις θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις στο σύνολο του λουτρού, σε ελάχιστο χρονικό διάστημα.



2.6 Θερμαντική Αντίσταση



2.7 Mini αντλία νερού

2.2.7 Δοχείο/Περίβλημα του Λουτρού

Ο σχεδιασμός και η επιλογή υλικών για το δοχείο και το εξωτερικό περίβλημα του θερμοστατούμενου λουτρού είναι εξίσου σημαντικά με την επιλογή των ηλεκτρονικών, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ομοιομορφία της θερμοκρασίας, την ενεργειακή απόδοση και την ασφάλεια του συστήματος.

Το κυρίως δοχείο που περιέχει το υγρό μέσο (νερό στην περίπτωση μας) πρέπει να είναι κατασκευασμένο από υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση και ικανό να αντέχει τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Οι συνηθισμένες επιλογές περιλαμβάνουν:

- **Ανοξειδωτος χάλυβας (Stainless Steel):** Προσφέρει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, είναι εύκολος στον καθαρισμό και διατηρεί τη θερμοκρασία καλά. Είναι η προτιμώμενη επιλογή για εμπορικά λουτρά.
- **Γυαλί Πυρίμαχο (π.χ., Borosilicate Glass):** Επιτρέπει την οπτική παρακολούθηση των δειγμάτων και της κατάστασης του νερού, αλλά είναι πιο εύθραυστο.
- **Πλεξιγκλάς (Plexiglass/Acrylic):** Οικονομική και ελαφριά επιλογή που προσφέρει οπτική παρακολούθηση, αλλά έχει χαμηλότερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί να αλλοιωθεί με την πάροδο του χρόνου ή την έκθεση σε ορισμένα χημικά.

Για το πρωτότυπο χαμηλού κόστους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κοινό δοχείο από γυαλί πυρίμαχο ή ακόμη και ένα πλαστικό δοχείο κατάλληλο για υψηλές θερμοκρασίες, με την επιφύλαξη των περιορισμών που αναφέρονται. Οι διαστάσεις του δοχείου επιλέχθηκαν ώστε να χωράει επαρκή όγκο νερού (π.χ., 2-5 λίτρα) και να επιτρέπει την πλήρη βύθιση του θερμαντικού στοιχείου και του αισθητήρα, καθώς και να εξυπηρετεί ενδεχόμενη τοποθέτηση διαφόρων δειγμάτων.

Το εξωτερικό περίβλημα του λουτρού εξυπηρετεί δύο βασικούς σκοπούς:

1. **Θερμομόνωση:** Η διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού απαιτεί την ελαχιστοποίηση της απώλειας θερμότητας προς το περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση μονωτικού υλικού μεταξύ του εσωτερικού δοχείου και του εξωτερικού περιβλήματος. Υλικά όπως ο αφρός πολουρεθάνης, το πετροβάμβακας ή ακόμα και το απλό φύλλο αλουμινίου με αέρα (όπως στα θερμός) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγιμότητας, συναγωγής και ακτινοβολίας. Η καλή μόνωση συμβάλλει στην ενεργειακή απόδοση του συστήματος και στη μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Επιπλέον, για την περαιτέρω μείωση της εξάτμισης του νερού, ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μπάλες πολυπροπυλενίου (**polypropylene spheres**) στην επιφάνεια του λουτρού. Αυτές οι ελαφριές, μη τοξικές μπάλες σχηματίζουν ένα μονωτικό στρώμα που εμποδίζει τη διαφυγή των υδρατμών και τη μεταφορά θερμότητας, μειώνοντας σημαντικά την απώλεια υγρού και την ανάγκη για συχνή αναπλήρωση, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στη διατήρηση σταθερότερης θερμοκρασίας.
2. **Ασφάλεια και Προστασία:** Το περίβλημα προστατεύει τα εσωτερικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα από την υγρασία και τους πιθανούς κινδύνους που συνδέονται με την τάση δικτύου. Επίσης, αποτρέπει την άμεση επαφή του χρήστη με τις θερμές επιφάνειες του δοχείου.

Η κατασκευή του περιβλήματος μπορεί να γίνει από ανθεκτικά πλαστικά (π.χ., ABS, PVC), ξύλο ή μέταλλο (π.χ., αλουμίνιο). Για ένα έργο DIY, η ευκολία επεξεργασίας και το κόστος είναι βασικοί παράγοντες.

Συνολικά, στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται τα βασικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα που προσαρτήθηκαν στο λουτρό.

Πίνακας 2.1: Προδιαγραφές Βασικών Ηλεκτρονικών Εξαρτημάτων

Εξάρτημα	Μοντέλο/Τύπος	Βασικές Προδιαγραφές
Μικροελεγκτής	Arduino Uno R3	ATmega328P, 5V, 16MHz, 32KB Flash
Αισθητήρας Θερμ.	DS18B20 (Waterproof)	-55°C έως +125°C, Ακρίβεια ±0.5°C, 1-Wire
Ρελέ	5V Relay Module	Έλεγχος 5V, Επαφές 10A/250VAC
Οθόνη	16x2 Character LCD	Ελεγκτής HD44780, Τροφοδοσία 5V
Τρανζίστορ	BC548	NPN, IC(max)=100mA, VCE(max)=30V
Δίοδος	1N4007	1A, 1000V PIV (για προστασία flyback)
Αντλία	Μίνι Υποβρύχια	DC 3V-5V

2.3 Σχεδιασμός Ηλεκτρονικού Κυκλώματος

Ο σχεδιασμός του ηλεκτρονικού κυκλώματος αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα για την υλοποίηση ενός λειτουργικού θερμοστατούμενου λουτρού χαμηλού κόστους. Σε αυτή την ενότητα, θα αναλυθεί η επιλογή των βασικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, η λογική των συνδέσεων μεταξύ τους και η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση και την επαλήθευση του σχεδιασμού πριν από τη φυσική συναρμολόγηση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην απλότητα, την αξιοπιστία και την ευκολία υλοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ενός έργου DIY βασισμένου στην πλατφόρμα Arduino.

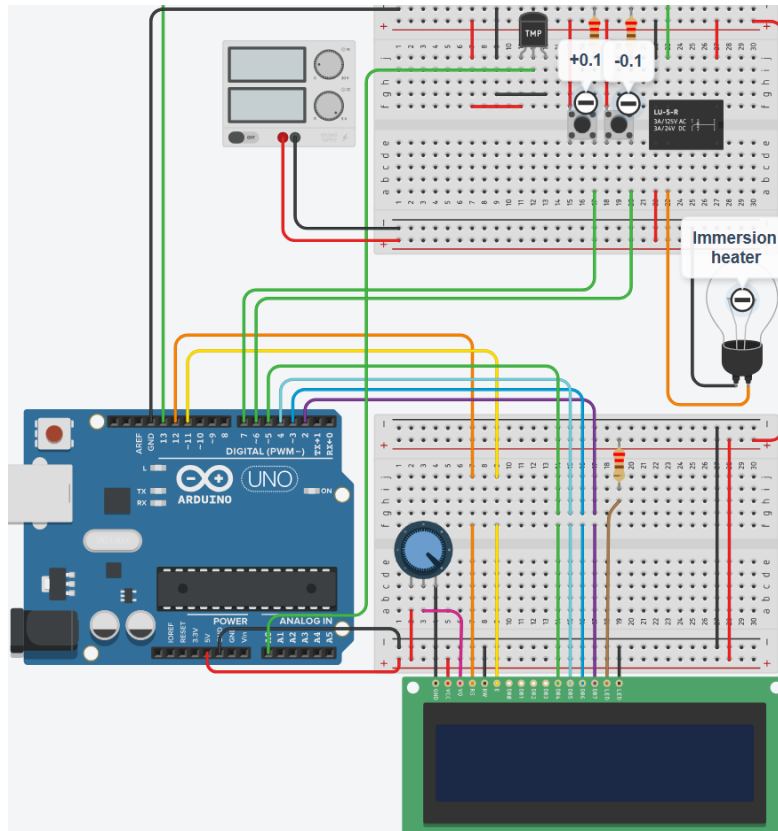
2.3.1 Προσομοίωση στο Tinkercad Circuits

Πριν από τη φυσική συναρμολόγηση, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής προσομοίωση του βασικού κυκλώματος στο περιβάλλον Tinkercad Circuits της Autodesk. Η πλατφόρμα αυτή προσφέρει ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον για την εικονική συναρμολόγηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με Arduino και τη δοκιμή του κώδικα, επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων στον σχεδιασμό. Η συνολική διάταξη του κυκλώματος που παραπέμπει στο ρεαλιστικό κύκλωμα φαίνεται στην **Εικόνα 2.7**.

Παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη συνδεσμολογία των εξαρτημάτων: Arduino Uno, αισθητήρας DS18B20, οθόνη LCD 16x2, πλήκτρα ελέγχου και το ρελέ (με τη συνδεδεμένη λάμπα-υποκατάστατο).

Κατά την προσομοίωση στο Tinkercad Circuits, έγιναν συγκεκριμένες παραδοχές για την απλοποίηση και την εστίαση στη λογική λειτουργία του κυκλώματος ελέγχου, καθώς οι δυνατότητες τους δωρεάν εργαλείου είναι πεπερασμένες.

Οι βασικές αυτές παραδοχές ήταν οι εξής:



Εικόνα 2.7: Συνολική διάταξη του κυκλώματος στην πλατφόρμα Tinkercad Circuits.

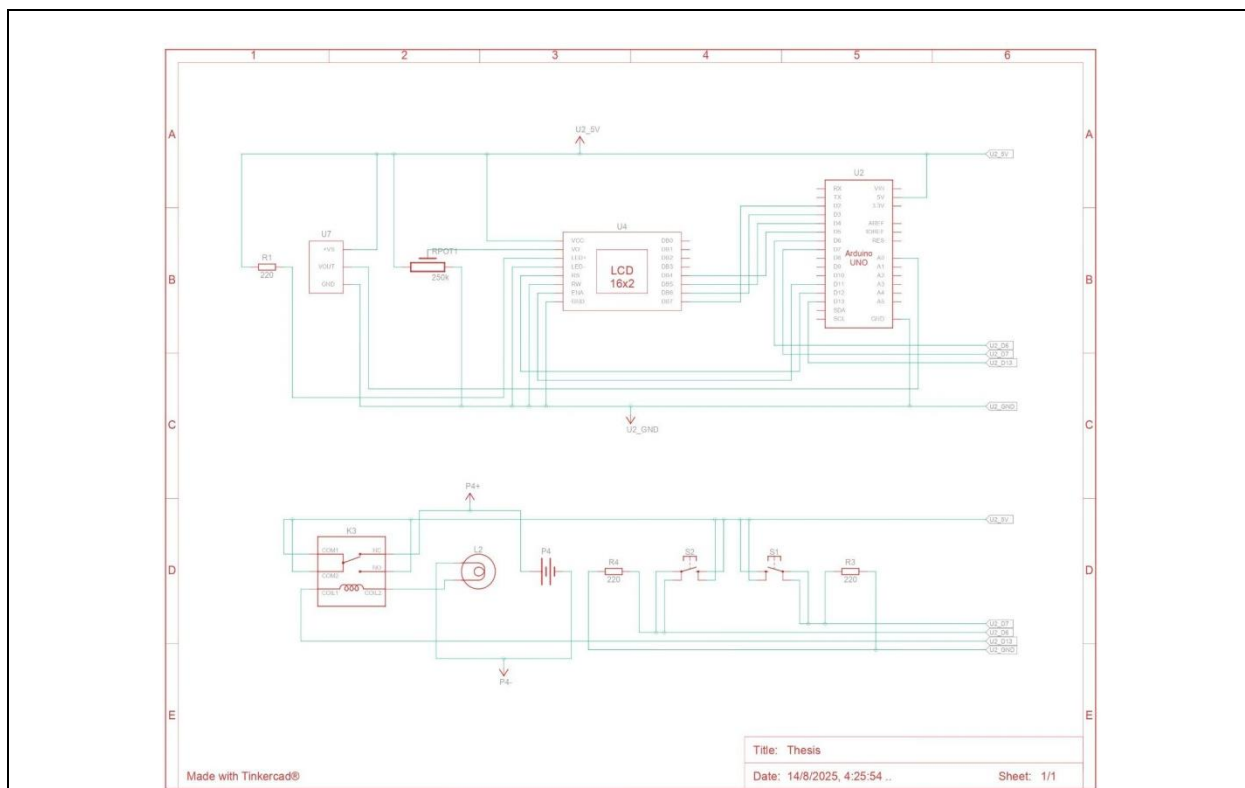
- Υποκατάσταση Θερμαντικού Στοιχείου με Λάμπα:** Αντί για ένα πραγματικό θερμαντικό στοιχείο, στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε μια **λάμπα** ως οπτική ένδειξη της ενεργοποίησης του ρελέ. Η λάμπα, στην εικονική συνδεσμολογία, αναψε όταν το ρελέ ενεργοποιήθηκε από τον κώδικα του Arduino (δηλαδή, όταν η μετρούμενη θερμοκρασία ήταν κάτω από το setpoint), και έσβησε όταν το ρελέ απενεργοποιήθηκε (όταν η μετρούμενη θερμοκρασία έφτασε ή ξεπέρασε το setpoint). Αυτή η παραδοχή εξυπηρετεί τον σκοπό της οπτικής επαλήθευσης της εξόδου του ελεγκτή, προς το θερμαντικό στοιχείο.
- Λειτουργία Αισθητήρα Θερμοκρασίας (DS18B20):** Το Tinkercad προσομοιώνει τη λειτουργία του DS18B20, επιτρέποντας την αλλαγή της θερμοκρασίας μέσω ενός εικονικού ρυθμιστή (slider) και την παρακολούθηση της απόκρισης του συστήματος. Αυτό ήταν καθοριστικό για την επαλήθευση της ορθής ανάγνωσης και ερμηνείας των δεδομένων θερμοκρασίας από το Arduino.
- Έλεγχος Ρελέ:** Η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του εικονικού ρελέ δοκιμάστηκε με βάση τις μετρούμενες θερμοκρασίες (αλλαγή θερμοκρασίας μέσω slider) και το setpoint, επιβεβαιώνοντας ότι ο αλγόριθμος του ελεγκτή στέλνει τα σωστά σήματα εξόδου.
- Απεικόνιση στην LCD:** Η λειτουργία της οθόνης LCD 16x2 προσομοιώθηκε για την εμφάνιση της τρέχουσας θερμοκρασίας, του setpoint και άλλων πληροφοριών, διασφαλίζοντας την ορθή λειτουργία της διεπαφής χρήστη.
- Λειτουργία Πλήκτρων:** Τα εικονικά πλήκτρα δοκιμάστηκαν για την αύξηση/μείωση του setpoint, επιβεβαιώνοντας ότι η είσοδος του χρήστη μεταφράζεται σωστά στις μεταβλητές του κώδικα.

Το λογισμικό Tinkercad επιτρέπει την προσομοίωση του κυκλώματος εν λειτουργία καθώς και την πρόσβαση σε χρήσιμα δεδομένα. Η προσομοίωση επέτρεψε την απομόνωση και την επίλυση προβλημάτων λογικής του κώδικα και των συνδέσεων σε ένα ασφαλές, εικονικό περιβάλλον, πριν από τη δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία της φυσικής συναρμολόγησης.

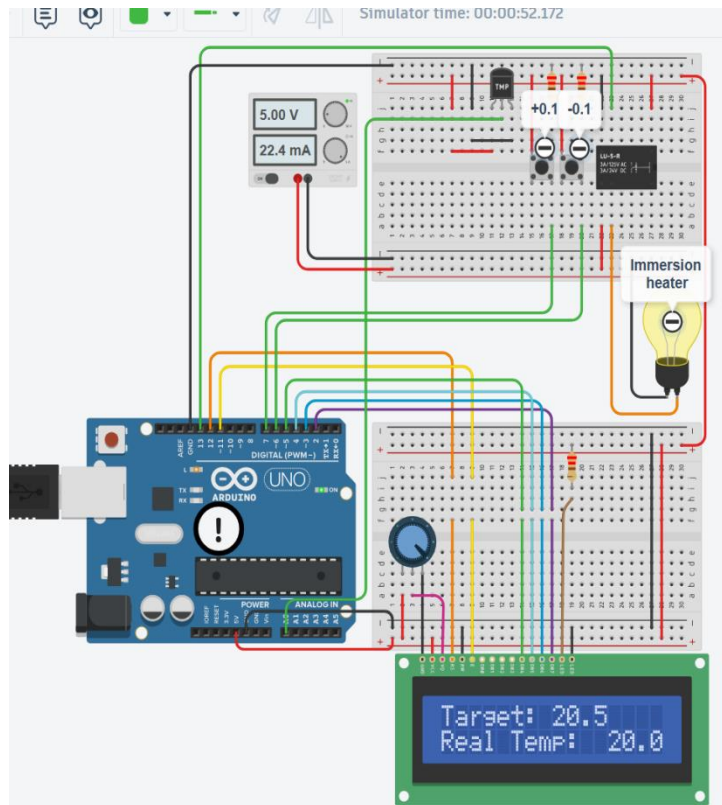
Η **Εικόνα 2.8** παρουσιάζει τη σχηματική αναπαράσταση των συνδέσεων μεταξύ του Arduino Uno, του αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20, της οθόνης LCD, των πλήκτρων και του ρελέ, διευκολύνοντας την κατανόηση της ηλεκτρονικής αρχιτεκτονικής.

Στο στιγμιότυπο αυτό της **Εικόνας 2.9**, η οθόνη LCD εμφανίζει την τρέχουσα θερμοκρασία (20°C) να είναι χαμηλότερη από το καθορισμένο setpoint (20.5°C). Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος ελέγχου έχει ενεργοποιήσει το ρελέ και, στην προσομοίωση, η λάμπα είναι αναμμένη, υποδεικνύοντας ότι το θερμαντικό στοιχείο τροφοδοτείται με ισχύ για να ανεβάσει τη θερμοκρασία.

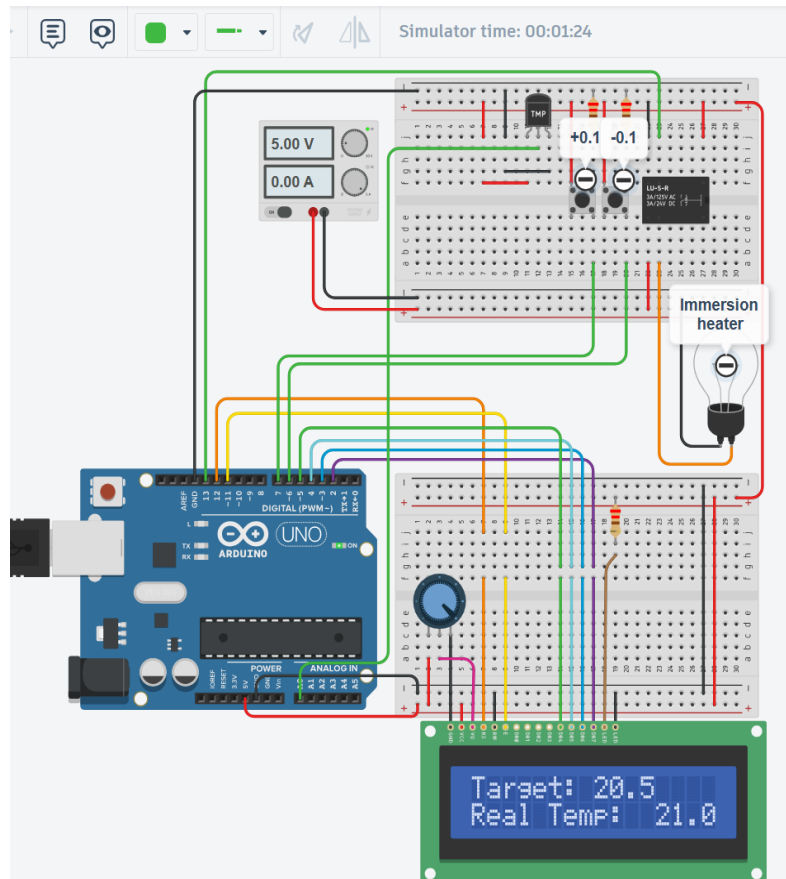
Η **Εικόνα 2.10** απεικονίζει το αντίστροφο σενάριο. Σε αυτό το στιγμιότυπο, η οθόνη LCD δείχνει ότι η τρέχουσα θερμοκρασία (21°C) έχει υπερβεί το setpoint (20.5°C). Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος ελέγχου έχει απενεργοποιήσει το ρελέ, και η λάμπα στην προσομοίωση είναι σβηστή, υποδεικνύοντας ότι η παροχή ρεύματος στο θερμαντικό στοιχείο έχει διακοπεί για να επιτραπεί η πτώση της θερμοκρασίας ή η διατήρησή της στο επιθυμητό επίπεδο.



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα κυκλώματος του θερμοστατούμενου λουτρού στο Tinkercad.



Εικόνα 2.9: Στιγμιότυπο Προσομοίωσης Tinkercad – Ενεργοποίηση Θέρμανσης (Θερμοκρασία < Setpoint).



Εικόνα 2.10: Στιγμιότυπο Προσομοίωσης Tinkercad – Απενεργοποίηση Θέρμανσης (Θερμοκρασία > Setpoint)•

Η συνδεσμολογία των ακίδων του Arduino Uno με τα περιφερειακά εξαρτήματα, όπως αυτή δοκιμάστηκε στην προσομοίωση, συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.2: Συστηματική Αντιστοίχιση Ακίδων (Pinout) του Arduino Uno

Ακίδα Arduino	Συνδεδεμένο Εξάρτημα	Λειτουργία
Analog A0	Αισθητήρας DS18B20	Γραμμή δεδομένων 1-Wire
Digital 2	LCD (DB7)	Γραμμή δεδομένων 7 της LCD
Digital 3	LCD (DB6)	Γραμμή δεδομένων 6 της LCD
Digital 4	LCD (DB5)	Γραμμή δεδομένων 5 της LCD

Digital 5	LCD (DB4)	Γραμμή δεδομένων 4 της LCD
Digital 6	Πλήκτρο "UP"	Είσοδος για αύξηση του Setpoint
Digital 7	Πλήκτρο "DOWN"	Είσοδος για μείωση του Setpoint
Digital 11	LCD (E)	Ακίδα ενεργοποίησης (Enable) της LCD
Digital 12	LCD (RS)	Ακίδα επιλογής καταχωρητή (Register Select) της LCD
Digital 13	Relay Module (IN)	Έξοδος ελέγχου για ενεργοποίηση ρελέ
5V	Διάφορα	Τροφοδοσία για LCD, Relay Module, DS18B20
GND	Διάφορα	Κοινή γείωση για όλα τα εξαρτήματα

2.4 Θέματα Τροφοδοσίας και Ασφάλειας

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος που συνδυάζει κυκλώματα χαμηλής τάσης (DC) με κυκλώματα υψηλής τάσης δικτύου (AC) απαιτεί τη μέγιστη προσοχή σε θέματα ασφάλειας. Η ασφάλεια του χρήστη και η προστασία του εξοπλισμού είναι πρωταρχικής σημασίας.

Ηλεκτρική Απομόνωση: Το πιο κρίσιμο στοιχείο για την ασφάλεια είναι η **γαλβανική απομόνωση** μεταξύ του κυκλώματος ελέγχου του Arduino και του κυκλώματος ισχύος του θερμαντήρα. Αυτή η απομόνωση επιτυγχάνεται μέσω του ρελέ. Το πηνίο του ρελέ ενεργοποιείται από τα 5V του Arduino, αλλά οι επαφές του, που διακόπτουν την παροχή 230V AC, είναι φυσικά και ηλεκτρικά απομονωμένες από το πηνίο. Είναι επιτακτικό να μην υπάρχει καμία φυσική σύνδεση μεταξύ των δύο κυκλωμάτων, εκτός από το σήμα ελέγχου που περνά μέσα από τον οπτικό απομονωτή (optocoupler) που συνήθως υπάρχει στις μονάδες ρελέ [23].

Κανόνες Ασφαλείας για Κυκλώματα Δικτύου:

Κατά τη συναρμολόγηση και λειτουργία του κυκλώματος υψηλής τάσης, πρέπει να τηρούνται απαραίτητα οι ακόλουθοι κανόνες [30]:

1. **Αποσύνδεση από την Παροχή:** Ποτέ μην εργάζεστε στο κύκλωμα των 230V ενώ η συσκευή είναι συνδεδεμένη στην πρίζα. Πάντα να αποσυνδέετε την παροχή πριν από οποιαδήποτε παρέμβαση.
2. **Γειωμένο Μεταλλικό Κουτί:** Η τελική κατασκευή πρέπει να στεγάζεται σε ένα κατάλληλο κουτί (enclosure). Εάν το κουτί είναι μεταλλικό, πρέπει οπωσδήποτε να είναι συνδεδεμένο με την αγωγό γείωσης της παροχής ρεύματος. Αυτό εξασφαλίζει ότι σε περίπτωση σφάλματος (π.χ., ένα καλώδιο υψηλής τάσης ακουμπήσει το περίβλημα), το ρεύμα θα διαφύγει στη γη, ενεργοποιώντας την προστασία (ασφάλεια ή RCD) αντί να διαρρεύσει μέσω του σώματος του χρήστη [31].
3. **Κατάλληλη Καλωδίωση:** Όλες οι καλωδιώσεις που μεταφέρουν 230V AC πρέπει να έχουν την κατάλληλη διατομή για το ρεύμα που θα διαρρέει (π.χ., τουλάχιστον 1.5 mm² για 10A) και να

είναι πλήρως μονωμένες. Οι συνδέσεις πρέπει να είναι σταθερές και ασφαλείς, κατά προτίμηση με χρήση κλεμών.

4. **Προστασία από Υπερένταση:** Μια ασφάλεια κατάλληλης ονομαστικής τιμής (π.χ., 10A για ένα θερμαντήρα 2000W) πρέπει να παρεμβάλλεται εν σειρά στην παροχή ρεύματος για προστασία από βραχυκυκλώματα.
5. **Διακόπτης Διαρροής (RCD):** Η χρήση ενός Διακόπτη Διαρροής Ρεύματος (Residual Current Device - RCD) συνιστάται ανεπιφύλακτα. Ο RCD ανιχνεύει πολύ μικρές διαφορές στο ρεύμα μεταξύ φάσης και ουδέτερου και διακόπτει την παροχή ακαριαία, προσφέροντας την καλύτερη δυνατή προστασία από ηλεκτροπληξία [31].

Στρατηγική Τροφοδοσίας:

Το σύστημα θα τροφοδοτείται από δύο ξεχωριστές πηγές:

- **Κύκλωμα Ελέγχου:** Η πλακέτα Arduino και τα περιφερειακά της (LCD, αισθητήρας) θα τροφοδοτούνται είτε μέσω της θύρας USB από έναν υπολογιστή είτε από έναν εξωτερικό μετασχηματιστή τοίχου (π.χ., 9V DC συνδεδεμένο στην υποδοχή τροφοδοσίας του Arduino). Ο ενσωματωμένος ρυθμιστής τάσης του Arduino θα παρέχει τη σταθερή τάση των 5V που απαιτείται [17].
- **Κύκλωμα Ισχύος:** Το θερμαντικό στοιχείο θα τροφοδοτείται απευθείας από μια πρίζα 230V AC, με την παροχή να διακόπτεται από τις επαφές του ρελέ.

Κεφάλαιο 3ο: Ανάπτυξη Λογισμικού και Αλγόριθμος Ελέγχου

Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στον πυρήνα της ευφυΐας του συστήματος: το λογισμικό ελέγχου. Αναλύεται η θεωρία πίσω από τους αλγορίθμους ελέγχου θερμοκρασίας, με έμφαση στον αλγόριθμο PID. Παρουσιάζεται η πρακτική υλοποίηση του ελέγχου με χρήση της εξειδικευμένης βιβλιοθήκης PID για Arduino και αναπτύσσεται το πλήρες λογισμικό της εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης του αισθητήρα, της διεπαφής χρήστη και του χρονικά αναλογικού ελέγχου του ρελέ.

3.1 Θεωρία Αλγορίθμων Ελέγχου Θερμοκρασίας

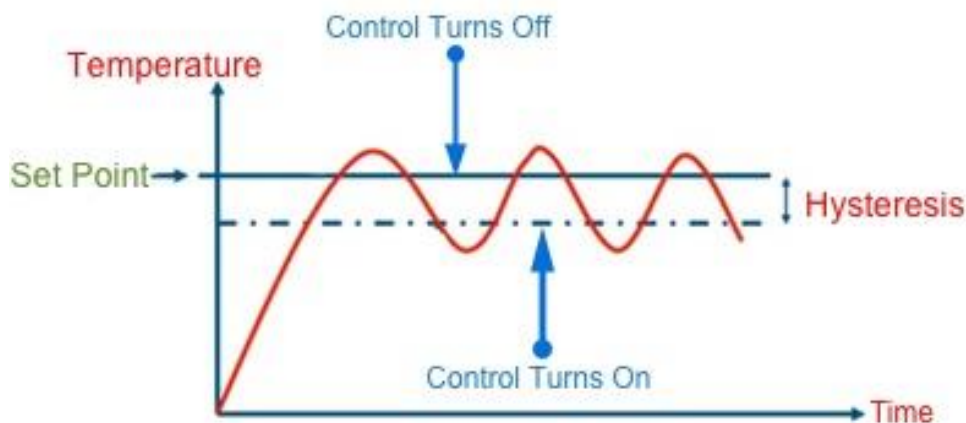
Ο στόχος ενός ελεγκτή θερμοκρασίας είναι να διατηρήσει μια μεταβλητή διεργασίας (Process Variable - PV), εν προκειμένω τη θερμοκρασία του νερού, όσο το δυνατόν πιο κοντά σε μια επιθυμητή τιμή-στόχο (Setpoint - SP), παρά τις εξωτερικές διαταραχές.

3.1.1 Έλεγχος On-Off (Bang-Bang Control)

Ο έλεγχος On-Off είναι η απλούστερη μορφή ελέγχου και χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η λογική του είναι δυαδική: εάν η τρέχουσα θερμοκρασία (PV) είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία-στόχο (SP), ο ελεγκτής ενεργοποιεί το θερμαντικό στοιχείο στο 100% της ισχύος του. Μόλις η θερμοκρασία ξεπεράσει το SP, ο ελεγκτής απενεργοποιεί πλήρως το θερμαντικό στοιχείο [32].

Μαθηματικά, μπορεί να περιγραφεί ως:

- Αν $T < \text{Setpoint} - \text{Hysteresis}$, τότε Output = ON
- Αν $T > \text{Setpoint} + \text{Hysteresis}$, τότε Output = OFF



Εικόνα 3.1: Γραφική αναπαράσταση της ταλάντωσης της θερμοκρασίας σε σύστημα με έλεγχο On-Off

Όπως παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 3.1, αυτή η απλή προσέγγιση οδηγεί αναπόφευκτα σε μια συνεχή ταλάντωση της θερμοκρασίας γύρω από το setpoint. Για να αποφευχθεί η υπερβολικά γρήγορη εναλλαγή (chattering) του ρελέ όταν η θερμοκρασία βρίσκεται πολύ κοντά στο SP, εισάγεται μια ζώνη υστέρησης (hysteresis) ή νεκρή ζώνη (dead band). Για παράδειγμα, με SP στους 37°C και υστέρηση 1°C, ο θερμαντήρας θα ενεργοποιηθεί όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 36.5°C και θα απενεργοποιηθεί όταν ανέβει πάνω από τους 37.5°C [33]. Παρόλο που είναι απλός στην

υλοποίηση, ο έλεγχος On-Off είναι ανεπαρκής για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, καθώς η θερμοκρασία δεν σταθεροποιείται ποτέ σε μια συγκεκριμένη τιμή.

3.1.2 Έλεγχος PID (Proportional-Integral-Derivative Control)

Ο έλεγχος PID είναι ο de facto βιομηχανικός κανόνας για την επίτευξη ακριβούς και σταθερού ελέγχου διεργασιών. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο ανάδρασης που υπολογίζει συνεχώς το σφάλμα $e(t)=SP-PV$ και εφαρμόζει μια διορθωτική ενέργεια που βασίζεται σε τρεις όρους [34].

1. **Αναλογικός Όρος (Proportional - P):** Αυτός ο όρος παρέχει μια απόκριση που είναι ανάλογη με το *τρέχον* μέγεθος του σφάλματος. Η συνεισφορά του δίνεται από τον τύπο

$$P_{out} = K_p \cdot e(t) \quad (3.1)$$

όπου K_p είναι το αναλογικό κέρδος. Ένας μεγάλος K_p οδηγεί σε μια ισχυρή και γρήγορη αντίδραση στο σφάλμα, αλλά μπορεί να προκαλέσει υπέρβαση (overshoot) του setpoint και ταλαντώσεις. Ένας μικρός K_p οδηγεί σε μια πιο αργή αλλά πιο ομαλή απόκριση, η οποία όμως συχνά καταλήγει σε μια μόνιμη απόκλιση από το setpoint (steady-state error ή droop). Ωστόσο, ένα πολύ μεγάλο K_p μπορεί να οδηγήσει σε ταλαντώσεις και αστάθεια (overshoot και undershoot), καθώς ο ελεγκτής "αντιδρά υπερβολικά". Για παράδειγμα, αν η θερμοκρασία είναι 5°C κάτω από το setpoint και ο K_p είναι μεγάλος, ο θερμομαντήρας θα ενεργοποιηθεί με πολύ μεγάλη ισχύ, πιθανώς να προκαλέσει υπερθέρμανση [35].

2. **Ολοκληρωτικός Όρος (Integral - I):** Αυτός ο όρος αθροίζει τα σφάλματα του παρελθόντος σε *συνάρτηση με τον χρόνο*. Η συνεισφορά του δίνεται από τον τύπο

$$I_{out}(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

όπου K_i είναι το ολοκληρωτικό κέρδος. Ο σκοπός του είναι να εξαλείψει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Όσο υπάρχει σφάλμα, έστω και μικρό, ο ολοκληρωτικός όρος συνεχίζει να αυξάνεται, αναγκάζοντας τον ελεγκτή να αυξήσει την έξοδό του μέχρι το σφάλμα να μηδενιστεί. Ένας μεγάλος K_i εξαλείφει το σφάλμα γρήγορα, αλλά αυξάνει την τάση για υπέρβαση. Ένα φαινόμενο που πρέπει να αποφεύγεται είναι το "integral windup", όπου ο ολοκληρωτικός όρος αυξάνεται υπερβολικά κατά τη διάρκεια μεγάλων περιόδων σφάλματος, οδηγώντας σε μεγάλη υπέρβαση όταν το σύστημα τελικά φτάσει το setpoint [35].

3. **Παραγωγικός Όρος (Derivative - D):** Αυτός ο όρος αντιδρά στον *ρυθμό μεταβολής* του σφάλματος. Η συνεισφορά του δίνεται από τον τύπο

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.3)$$

όπου K_d είναι το παραγωγικό κέρδος. Λειτουργεί προγνωστικά ή "προληπτικά". Εάν η θερμοκρασία πλησιάζει γρήγορα το setpoint, ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος είναι μεγάλος, και ο παραγωγικός όρος εφαρμόζει μια "φρενάρουσα" δράση για να μετριάσει την απόκριση και να αποτρέψει την υπέρβαση. Ενεργεί ως "αμορτισέρ" του συστήματος, μειώνοντας τις ταλαντώσεις και βελτιώνοντας τη σταθερότητα. Ένας μεγάλος K_d βελτιώνει τη σταθερότητα, αλλά καθιστά το σύστημα πολύ ευαίσθητο στον θόρυβο του αισθητήρα, καθώς ο θόρυβος

προκαλεί απότομες μεταβολές που ενισχύονται από τον παραγωγικό όρο [35].

Η τελική έξοδος του ελεγκτή PID είναι το άθροισμα αυτών των τριών όρων:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.4)$$

Η διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων τιμών για τα κέρδη K_p , K_i , και K_d ονομάζεται **ρύθμιση (tuning)** και είναι κρίσιμη για την απόδοση του συστήματος.

3.2 Υλοποίηση Ελέγχου PID με τη Βιβλιοθήκη Arduino

Αντί της συγγραφής του αλγορίθμου PID από το μηδέν, επιλέχθηκε η χρήση της ευρέως διαδεδομένης και δοκιμασμένης βιβλιοθήκης **PID Library του Brett Beauregard** [36]. Η επιλογή αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι η βιβλιοθήκη δεν υλοποιεί απλώς τον βασικό αλγόριθμο, αλλά ενσωματώνει προηγμένες λύσεις σε κοινά προβλήματα του πραγματικού κόσμου, όπως [37]:

- **Σταθερός Χρόνος Δειγματοληψίας:** Εξασφαλίζει ότι οι υπολογισμοί γίνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, βελτιώνοντας τη σταθερότητα.
- **Αποφυγή "Derivative Kick":** Αποτρέπει τις απότομες μεταβολές στην έξοδο όταν αλλάζει το setpoint.
- **Αντιμετώπιση "Reset Windup":** Περιορίζει την υπερβολική συσσώρευση του ολοκληρωτικού όρου.
- **Ομαλή Εναλλαγή Auto/Manual:** Επιτρέπει την απενεργοποίηση και επανενεργοποίηση του ελεγκτή χωρίς απότομες αλλαγές στην έξοδο.

Η υλοποίηση με τη βιβλιοθήκη ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα και χρησιμοποιεί την γλώσσα προγραμματισμού C++:

1. Ενσωμάτωση της Βιβλιοθήκης:

```
#include <PID_v1.h>
```

2. Δήλωση Μεταβλητών:

```
double Setpoint, Input, Output;
```

- Input: Η μεταβλητή που θα δέχεται την τρέχουσα θερμοκρασία από τον αισθητήρα.
- Setpoint: Η μεταβλητή για την επιθυμητή θερμοκρασία-στόχο.
- Output: Η μεταβλητή στην οποία η βιβλιοθήκη θα γράφει το αποτέλεσμα του υπολογισμού PID.

3. Δήλωση Παραμέτρων Ρύθμισης:

```
double Kp=2, Ki=5, Kd=1; // Αρχικές τιμές για ρύθμιση
```

4. Δημιουργία Αντικειμένου PID (Κατασκευαστής):

```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

Αυτό το βήμα είναι κρίσιμο. Ο κατασκευαστής δέχεται τις **διευθύνσεις μνήμης** των μεταβλητών Input, Output και Setpoint (με τον τελεστή &). Αυτό επιτρέπει στη βιβλιοθήκη να έχει άμεση πρόσβαση στις τιμές τους, διαβάζοντας από το Input και το Setpoint και γράφοντας στο Output, χωρίς να χρειάζεται να τις περνάμε ως ορίσματα σε κάθε κλήση. Αυτή η προσέγγιση με δείκτες (pointers) είναι αποδοτική και αποτελεί συνήθη πρακτική σε ενσωματωμένα συστήματα [38]. Ο τελευταίος παράγοντας,

DIRECT, δηλώνει ότι πρόκειται για μια "άμεση" διεργασία (θέρμανση), όπου μια αύξηση της εξόδου οδηγεί σε αύξηση της εισόδου (θερμοκρασίας). Για μια διεργασία ψύξης, θα χρησιμοποιούνταν REVERSE [39].

5. Ρύθμιση στη setup():

```
void setup() {
    myPID.SetMode(AUTOMATIC); // Ενεργοποίηση του ελεγκτή
    myPID.SetSampleTime(1000); // Ορισμός του χρόνου δειγματοληψίας σε 1000ms (1s)
    myPID.SetOutputLimits(0, WindowSize); // Ορισμός ορίων εξόδου
}
```

Η SetOutputLimits είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εφαρμογή μας, όπως θα δούμε παρακάτω.

6. Υπολογισμός στη loop():

```
void loop() {
    Input = sensors.getTempCByIndex(0); // Ανάγνωση θερμοκρασίας
    myPID.Compute(); // Κλήση του αλγορίθμου PID
    //... κώδικας για τον έλεγχο του ρελέ βάσει του 'Output'
}
```

Η συνάρτηση Compute() πρέπει να καλείται σε κάθε επανάληψη του loop(). Η ίδια η βιβλιοθήκη θα αποφασίσει πότε θα εκτελέσει τον υπολογισμό, με βάση το SampleTime που έχει οριστεί [40].

3.3 Ανάπτυξη Λογισμικού Εφαρμογής

Το πλήρες λογισμικό της εφαρμογής, το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά στο **Παράρτημα Α**, συνδυάζει τις παραπάνω αρχές με τη διαχείριση των περιφερειακών και τη λογική της διεπαφής χρήστη.

Διαχείριση Αισθητήρα και Χειρισμός Σφαλμάτων:

Η ανάγνωση του αισθητήρα DS18B20 γίνεται με τη χρήση της βιβλιοθήκης DallasTemperature. Η διαδικασία περιλαμβάνει την κλήση της sensors.requestTemperatures() για να δοθεί εντολή σε όλους τους αισθητήρες στο bus να ξεκινήσουν τη μέτρηση, και στη συνέχεια την κλήση της sensors.getTempCByIndex 0 για να ληφθεί η τιμή από τον πρώτο αισθητήρα.

Ένα κρίσιμο μέρος του λογισμικού είναι ο χειρισμός των σφαλμάτων του DS18B20. Ο αισθητήρας επιστρέφει συγκεκριμένες τιμές σε περίπτωση προβλήματος, οι οποίες δεν πρέπει να τροφοδοτηθούν στον αλγόριθμο PID:

- **-127°C:** Αυτή η τιμή επιστρέφεται όταν υπάρχει σφάλμα επικοινωνίας (π.χ., κακή επαφή, αποσυνδεδεμένος αισθητήρας) [41].
- **+85°C:** Αυτή είναι η προεπιλεγμένη τιμή του αισθητήρα κατά την εκκίνηση, πριν ολοκληρωθεί η πρώτη έγκυρη μετατροπή θερμοκρασίας.

Ο κώδικας περιλαμβάνει έναν έλεγχο για να αγνοεί αυτές τις τιμές και να χρησιμοποιεί την τελευταία έγκυρη μέτρηση, αποτρέποντας έτσι την αποσταθεροποίηση του συστήματος ελέγχου.

```
float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
if (tempC!= -127.00 && tempC!= 85.00) {
  Input = tempC;
}
```

Χρονικά Αναλογικός Έλεγχος Ρελέ (Time-Proportional Relay Control):

Ένας μηχανικός ρελέ είναι μια συσκευή ON/OFF. Ο αλγόριθμος PID, ωστόσο, παράγει μια αναλογική έξοδο (στην περίπτωση μας, μια τιμή από 0 έως WindowSize). Για να γεφυρωθεί αυτό το χάσμα, υλοποιείται μια τεχνική που ονομάζεται χρονικά αναλογικός έλεγχος, η οποία είναι μια μορφή διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM) για αργές θερμικές διεργασίες.

Η λογική λειτουργεί ως εξής:

1. Ορίζεται ένα σταθερό χρονικό παράθυρο, π.χ., WindowSize = 5000 milliseconds.
2. Τα όρια εξόδου του PID ρυθμίζονται σε myPID.SetOutputLimits(0, WindowSize).
3. Μέσα στο loop(), ο κώδικας παρακολουθεί τον χρόνο που έχει περάσει από την αρχή του τρέχοντος παραθύρου.
4. Η μεταβλητή Output του PID (που τώρα κυμαίνεται από 0 έως 5000) αντιπροσωπεύει τον χρόνο (σε ms) που το ρελέ πρέπει να παραμείνει ενεργοποιημένο (ON) μέσα σε αυτό το παράθυρο των 5 δευτερολέπτων.
5. Ο κώδικας ενεργοποιεί το ρελέ για Output χιλιοστά του δευτερολέπτου και το απενεργοποιεί για το υπόλοιπο του παραθύρου (WindowSize - Output).

Αυτή η τεχνική επιτρέπει την παροχή μεταβλητής μέσης ισχύος στον θερμαντήρα, επιτυγχάνοντας πολύ πιο ομαλό και ακριβή έλεγχο από ένα απλό σύστημα On-Off.

Λογική Διεπαφής Χρήστη (UI):

Ο κώδικας περιλαμβάνει συναρτήσεις για την ανάγνωση των πλήκτρων (με ενσωματωμένη λογική “debouncing” για την αποφυγή πολλαπλών καταχωρίσεων με ένα πάτημα), οι οποίες τροποποιούν την τιμή της μεταβλητής Setpoint. Μια άλλη συνάρτηση αναλαμβάνει την τακτική ενημέρωση της οθόνης LCD, απεικονίζοντας την τρέχουσα θερμοκρασία, τη θερμοκρασία-στόχο και, προαιρετικά, την τιμή εξόδου του PID για διαγνωστικούς σκοπούς.

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση, Δοκιμές και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εμπειρική επικύρωση του σχεδιασμού που αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, μεταφέροντας το έργο από τη θεωρητική σύλληψη και την ψηφιακή προσομοίωση στην απτή, λειτουργική πραγματικότητα. Η διαδικασία αυτή είναι θεμελιώδους σημασίας, καθώς εδώ αξιολογείται η πρακτική απόδοση του συστήματος έναντι των αρχικών τεχνικών προδιαγραφών και στόχων. Η ενότητα αυτή περιγράφει μεθοδικά τη διαδικασία της φυσικής συναρμολόγησης, από το πρωτότυπο κύκλωμα μέχρι την ολοκληρωμένη διάταξη. Ακολούθως, τεκμηριώνεται το αυστηρό πρωτόκολλο δοκιμών που σχεδιάστηκε για την ποσοτική μέτρηση των κρίσιμων παραμέτρων απόδοσης: της ακρίβειας, της σταθερότητας, της ομοιομορφίας και του χρόνου απόκρισης. Τέλος, τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται, αναλύονται και ερμηνεύονται, οδηγώντας σε μια τελική, κριτική αξιολόγηση της επιτυχίας, των δυνατοτήτων και των περιορισμών της κατασκευής.

4.1 Φυσική Υλοποίηση και Συναρμολόγηση

Η μετάβαση από το σχηματικό διάγραμμα στη φυσική κατασκευή αποτέλεσε ένα πολύπλοκο στάδιο, το οποίο απαιτούσε μεθοδικότητα, προσοχή στη λεπτομέρεια και αυστηρή τήρηση των κανόνων ασφαλείας, ιδίως λόγω της συνύπαρξης κυκλωμάτων χαμηλής και υψηλής τάσης. Κατά τη φάση αυτή, προέκυψαν ορισμένες πρακτικές προκλήσεις και πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις για τη βελτίωση της λειτουργικότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος.

4.1.1 Προετοιμασία και Διάταξη Εξαρτημάτων

Πριν από την έναρξη της συναρμολόγησης, όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα (Arduino Uno, οθόνη LCD, αισθητήρας DS18B20, μονάδα ρελέ, πλήκτρα, αντιστάσεις) τοποθετήθηκαν και ελέγχθηκαν μεμονωμένα για τη σωστή λειτουργία τους. Η διάταξη σχεδιάστηκε σε ένα breadboard με γνώμονα τη βελτιστοποίηση της διαδρομής των σημάτων, την ελαχιστοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και τη διευκόλυνση της διαδικασίας αποσφαλμάτωσης (debugging).

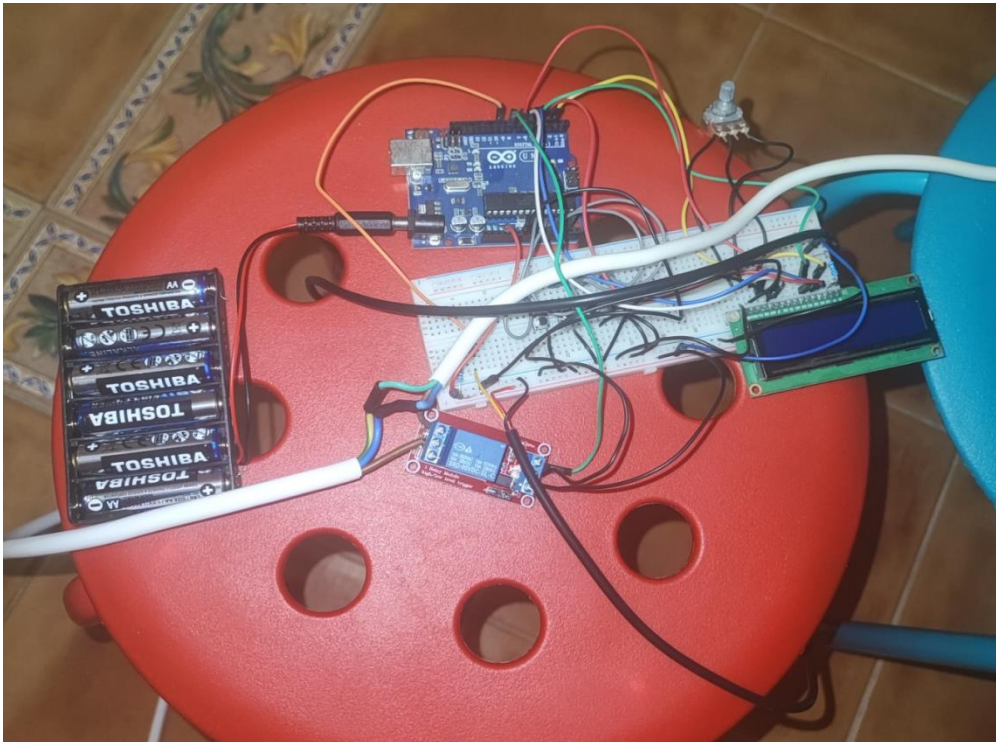
4.1.2 Συναρμολόγηση του Κυκλώματος Ελέγχου

Η καρδιά του συστήματος, το κύκλωμα ελέγχου, συναρμολογήθηκε αρχικά εξ ολοκλήρου σε breadboard. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την ταχεία πρωτοτυποποίηση και την εύκολη τροποποίηση των συνδέσεων.

- **Κεντρική Μονάδα και Περιφερειακά:** Η πλακέτα Arduino Uno αποτέλεσε το κέντρο της διάταξης. Η οθόνη LCD συνδέθηκε σε λειτουργία 4-bit για εξοικονόμηση ψηφιακών ακίδων, σύμφωνα με την αντιστοίχιση του Πίνακα 2.2. Το ποτενσιόμετρο των 10kΩ συνδέθηκε στην ακίδα αντίθεσης (V0) της οθόνης, επιτρέποντας τη δυναμική ρύθμιση της ευκρίνειας.
- **Αισθητήρας και Επικοινωνία:** Ο αδιάβροχος αισθητήρας DS18B20 συνδέθηκε χρησιμοποιώντας τρεις αγωγούς (VCC, GND, Data). Η αντίσταση ανύψωσης (pull-up) 4.7kΩ, κρίσιμη για τη σταθερότητα της επικοινωνίας μέσω του πρωτοκόλλου 1-Wire, παρεμβλήθηκε μεταξύ της γραμμής δεδομένων (Data) και της γραμμής τροφοδοσίας 5V.
- **Είσοδος Χρήστη:** Αρχικά, ο σχεδιασμός περιελάμβανε δύο πλήκτρα για την αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας-στόχου. Ωστόσο, για τη βελτίωση της εργονομίας και της

σαφήνειας του χειρισμού, προστέθηκαν δύο επιπλέον πλήκτρα, δημιουργώντας ένα πάνελ ελέγχου τεσσάρων κουμπιών με διακριτές λειτουργίες: "UP" (αύξηση), "DOWN" (μείωση), "START/STOP" (έναρξη και διακοπή λειτουργίας ελέγχου) και "SET/SAVE" (αποθήκευση επιθυμητής τιμής).

- **Τροφοδοσία Κυκλώματος Ελέγχου:** Για την αύξηση της φορητότητας και της αυτονομίας της μονάδας ελέγχου, η τροφοδοσία του Arduino τροποποιήθηκε. Αντί για τη σύνδεση μέσω USB ή μετασχηματιστή τοίχου, χρησιμοποιήθηκε μια εξωτερική θήκη μπαταριών που παρέχει την απαραίτητη τάση στην υποδοχή τροφοδοσίας της πλακέτας. Αυτή η λύση καθιστά το κύκλωμα ελέγχου πλήρως ανεξάρτητο από σταθερές πηγές ρεύματος, διευκολύνοντας την τοποθέτηση του συστήματος σε διαφορετικά σημεία του εργαστηρίου.



Εικόνα 4.1: Λεπτομερής όψη του πρωτότυπου κυκλώματος ελέγχου σε breadboard. Διακρίνονται οι συνδέσεις της οθόνης LCD, του αισθητήρα DS18B20 και των πλήκτρων με την πλακέτα Arduino Uno.

4.1.3 Ενσωμάτωση του Κυκλώματος Ισχύος και Θέματα Ασφάλειας

Αυτό ήταν το πιο κρίσιμο βήμα της υλοποίησης. Η διαχείριση της τάσης δικτύου (230V AC) απαιτεί τη μέγιστη προσοχή για την αποφυγή κινδύνου ηλεκτροπληξίας και την προστασία του εξοπλισμού.

- **Ηλεκτρική Απομόνωση:** Η μονάδα ρελέ αποτέλεσε το βασικό στοιχείο για τη γαλβανική απομόνωση. Το κύκλωμα οδήγησης του ρελέ (πηνίο) τροφοδοτήθηκε με ασφάλεια από τα 5V του Arduino, ενώ οι επαφές του ρελέ, οι οποίες διαχειρίζονται την υψηλή τάση, παρέμειναν πλήρως απομονωμένες.
- **Αντικατάσταση Θερμαντικού Στοιχείου:** Κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών, η θερμαντική αντίσταση που είχε αρχικά επιλεγεί παρουσίασε δυσλειτουργία. Για την απρόσκοπτη συνέχιση του έργου, πραγματοποιήθηκε άμεση αντικατάστασή της με ένα

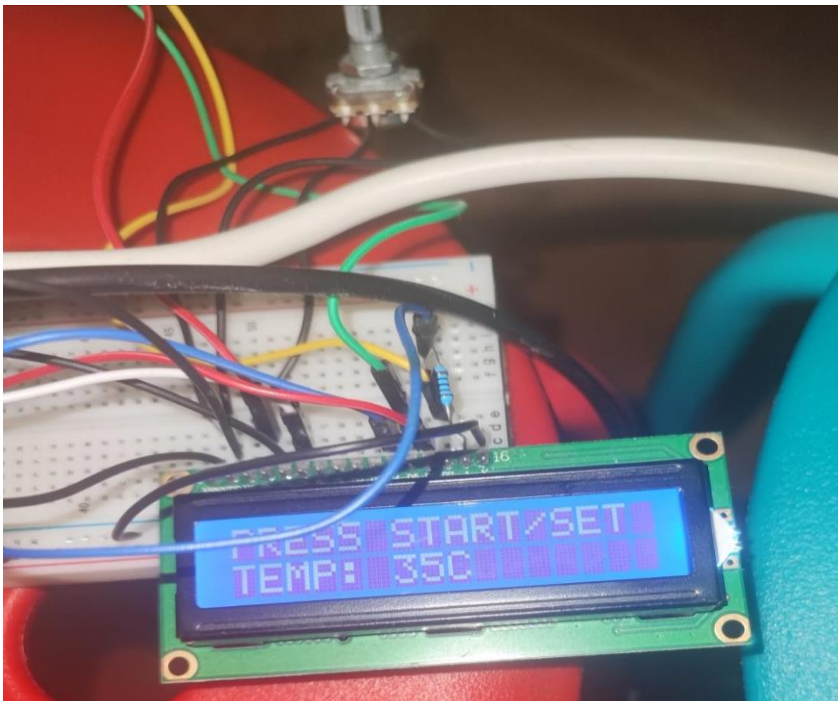
νέο, πιο στιβαρό θερμαντικό στοιχείο εμπύθισης παρόμοιας ονομαστικής ισχύος. Αυτή η απρόβλεπτη εξέλιξη υπογράμμισε τη σημασία της επιλογής αξιόπιστων εξαρτημάτων ισχύος και την ανάγκη για ευελιξία κατά την υλοποίηση.

- **Συνδεσμολογία Υψηλής Τάσης:** Η καλωδίωση του θερμαντικού στοιχείου έγινε με αγωγούς κατάλληλης διατομής (1.5 mm²), ικανούς να διαχειριστούν το απαιτούμενο ρεύμα χωρίς υπερθέρμανση. Η φάση της παροχής 230V AC διακόπηκε από τις επαφές COM (Common) και NO (Normally Open) του ρελέ. Όλες οι συνδέσεις υψηλής τάσης μονώθηκαν επιμελώς με θερμοσυστελλόμενο σωλήνα και τοποθετήθηκαν με ασφάλεια μακριά από το κύκλωμα ελέγχου.

4.1.4 Τελική Διάταξη και Ενσωμάτωση στο Δοχείο

Με τα επιμέρους υποσυστήματα να έχουν ελεγχθεί, ακολούθησε η τελική συναρμολόγηση της διάταξης, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 4.2**. Επιπλέον παρουσιάζονται στιγμιότυπα σε κατάσταση λειτουργίας του συστήματος στις **εικόνες 4.3, 4.4 και 4.5**.

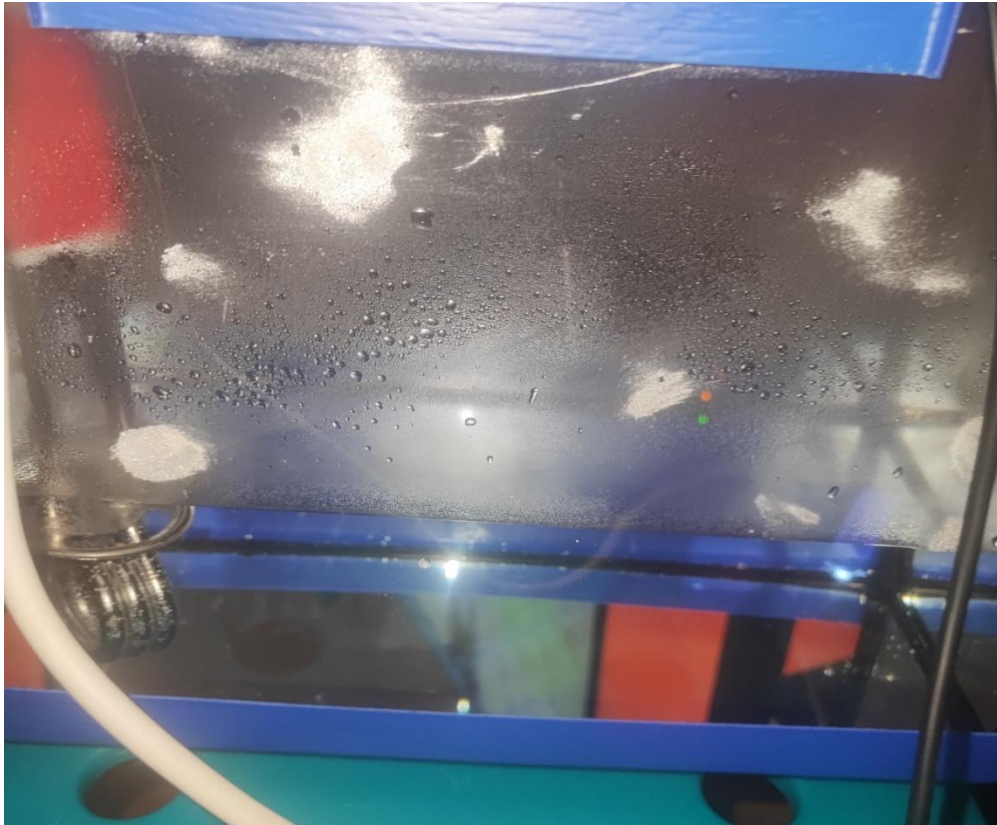
- **Δοχείο και Τοποθέτηση:** Επιλέχθηκε ένα δοχείο από ανθεκτικό πλαστικό, ικανό να αντέχει στις θερμοκρασίες λειτουργίας. Το θερμαντικό στοιχείο, ο αισθητήρας θερμοκρασίας και η υποβρύχια αντλία νερού στερεώθηκαν στο εσωτερικό του δοχείου. Η τοποθέτησή τους μελετήθηκε ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη κυκλοφορία του νερού: η αντλία τοποθετήθηκε στην αντίθετη πλευρά από το θερμαντικό στοιχείο για να δημιουργεί ένα ρεύμα που διαχέει ομοιόμορφα τη θερμότητα, ενώ ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε ένα σημείο που να αντιπροσωπεύει τη μέση θερμοκρασία του όγκου του νερού, μακριά από την άμεση επιρροή του θερμαντικού στοιχείου.



Εικόνα 4.2: Ορισμός θερμοκρασίας στόχου



Εικόνα 4.3: Η τελική, λειτουργική διάταξη του θερμοστατούμενου λουτρού. Το δοχείο περιέχει το νερό και τα βυθισμένα εξαρτήματα, ενώ το κύκλωμα ελέγχου είναι συνδεδεμένο και η οθόνη LCD εμφανίζει τις ενδείξεις.



4.4 Θερμαντικό στοιχείο σε κατάσταση μη λειτουργίας



4.5 Θερμαντικό στοιχείο σε κατάσταση λειτουργίας

4.2 Πρωτόκολλο Δοκιμών και Μεθοδολογία

Για την αντικειμενική και αναπαραγώγιμη αξιολόγηση της απόδοσης, καταρτίστηκε ένα λεπτομερές πρωτόκολλο δοκιμών.

4.2.1 Εξοπλισμός και Συνθήκες Δοκιμών

- **Εξοπλισμός:**
 - Το κατασκευασμένο θερμοστατούμενο λουτρό.
 - Βαθμονομημένο ψηφιακό θερμόμετρο αναφοράς (ακρίβεια $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, ιχνηλάσιμο σε εθνικά πρότυπα).
 - Χρονόμετρο ψηφιακό.
 - Η/Υ συνδεδεμένος στη σειριακή θύρα του Arduino για την καταγραφή δεδομένων.
- **Συνθήκες:**
 - **Θερμοκρασία Περιβάλλοντος:** $22.0^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$.
 - **Όγκος Υγρού:** 4.0 λίτρα απιονισμένου νερού.
 - **Περίοδος Σταθεροποίησης:** 30 λεπτά λειτουργίας πριν από κάθε επίσημη μέτρηση.

4.2.2 Διαδικασίες Μέτρησης Απόδοσης

- **Δοκιμή Ακρίβειας (Accuracy):**
 1. Το setpoint του λουτρού ορίστηκε στους 37.0°C και το σύστημα αφέθηκε να

σταθεροποιηθεί.

2. Μετά την περίοδο σταθεροποίησης, καταγράφηκαν ταυτόχρονα η ένδειξη της οθόνης LCD και η ένδειξη του θερμομέτρου αναφοράς (τοποθετημένο στο κέντρο του λουτρού) ανά 1 λεπτό για 10 λεπτά.
 3. Υπολογίστηκε ο μέσος όρος των 10 μετρήσεων για κάθε όργανο.
 4. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για setpoints 50.0°C και 70.0°C.
- **Δοκιμή Σταθερότητας (Stability):**
 1. Το setpoint ρυθμίστηκε στα 50.0°C και το σύστημα αφέθηκε να σταθεροποιηθεί.
 2. Ξεκίνησε η καταγραφή δεδομένων από τη σειριακή θύρα του Arduino, λαμβάνοντας μια μέτρηση θερμοκρασίας από τον αισθητήρα DS18B20 κάθε 20 δευτερόλεπτα.
 3. Η καταγραφή συνεχίστηκε για χρονική περίοδο 60 λεπτών.
 4. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία γραφήματος θερμοκρασίας έναντι χρόνου και για τον υπολογισμό της μέγιστης απόκλισης από τη μέση τιμή.
 - **Δοκιμή Ομοιομορφίας (Uniformity):**
 1. Το λουτρό σταθεροποιήθηκε στους 60.0°C με την αντλία ανακυκλοφορίας σε λειτουργία.
 2. Με το θερμομέτρο αναφοράς, μετρήθηκε η θερμοκρασία σε 5 προκαθορισμένα σημεία (κέντρο και 4 γωνίες, σε βάθος 5 cm).
 3. Η αντλία απενεργοποιήθηκε και μετά από 15 λεπτά, η διαδικασία μέτρησης στα 5 σημεία επαναλήφθηκε.
 - **Δοκιμή Χρόνου Απόκρισης (Response Time):**
 1. Καταγράφηκε η αρχική θερμοκρασία του νερού (θερμοκρασία δωματίου).
 2. Το setpoint ορίστηκε στους 70.0°C και το σύστημα ενεργοποιήθηκε, ξεκινώντας ταυτόχρονα το χρονόμετρο.
 3. Καταγράφηκε ο "χρόνος ανόδου" (rise time), δηλαδή ο χρόνος που απαιτήθηκε για να φτάσει η θερμοκρασία για πρώτη φορά στο 95% της τελικής τιμής (68.5°C).
 4. Καταγράφηκε το μέγιστο "overshoot" (υπέρβαση της τιμής-στόχου).
 5. Καταγράφηκε ο "χρόνος αποκατάστασης" (settling time), δηλαδή ο συνολικός χρόνος από την έναρξη μέχρι η θερμοκρασία να εισέλθει και να παραμείνει μόνιμα εντός ενός εύρους $\pm 0.2^\circ\text{C}$ από το τελικό setpoint.

4.3 Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων από τις δοκιμές οδήγησε στα παρακάτω ποσοτικά αποτελέσματα.

4.3.1 Αξιολόγηση Ακρίβειας

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης με το βαθμονομημένο θερμομέτρο παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.1**.

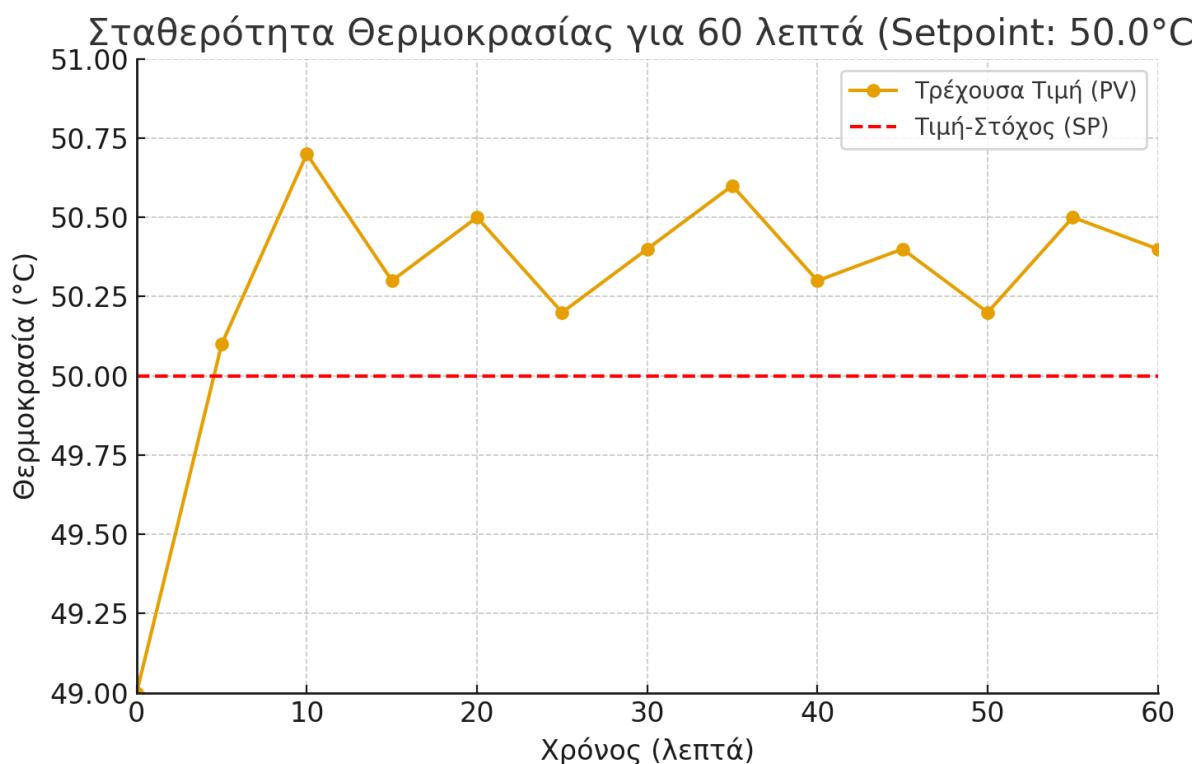
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα Δοκιμής Ακρίβειας

Τιμή-Στόχος (Setpoint)	Μέση Ένδειξη Λουτρού	Μέση Ένδειξη Αναφοράς	Σφάλμα (Λουτρό - Αναφορά)
37.0°C	37.3°C	36.9°C	+0.4°C
50.0°C	50.4°C	50.1°C	+0.3°C
70.0°C	70.3°C	70.0°C	+0.3°C

Ανάλυση: Παρατηρείται ένα σταθερό, θετικό σφάλμα (systematic error) της τάξης του +0.3°C έως +0.4°C. Αυτό το σφάλμα είναι απολύτως αναμενόμενο και σύμφωνο με την ονομαστική ακρίβεια του αισθητήρα DS18B20 ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Η σταθερότητα του σφάλματος σε διαφορετικές θερμοκρασίες είναι ενθαρρυντική, καθώς υποδηλώνει ότι μπορεί εύκολα να διορθωθεί μέσω μιας απλής γραμμικής βαθμονόμησης (calibration offset) στον κώδικα του Arduino, βελτιώνοντας δραματικά την απόλυτη ακρίβεια της συσκευής.

4.3.2 Ανάλυση Σταθερότητας

Το γράφημα που προέκυψε από την ωριαία καταγραφή δεδομένων κατέδειξε την εξαιρετική αποτελεσματικότητα και του αλγορίθμου PID, στην **εικόνα 4.3**.



Εικόνα 4.3: Γράφημα σταθερότητας θερμοκρασίας για 60 λεπτά σε setpoint 50.0°C. Ο άξονας Y δείχνει τη θερμοκρασία σε °C και ο άξονας X τον χρόνο σε λεπτά.

Ανάλυση: Όπως φαίνεται στο γράφημα, μετά την αρχική σταθεροποίηση, η θερμοκρασία παρέμεινε εξαιρετικά σταθερή. Η μέση τιμή θερμοκρασίας για την περίοδο της μίας ώρας ήταν 50.4°C. Η

ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι το 98% των μετρήσεων κυμάνθηκε μεταξύ 50.2°C και 50.6°C. Αυτό μεταφράζεται σε μια **σταθερότητα της τάξης του $\pm 0.2^\circ\text{C}$** , ένα αποτέλεσμα που επιβεβαιώνει την επιτυχή ρύθμιση (tuning) των παραμέτρων PID και την αποτελεσματικότητα της τεχνικής του χρονικά αναλογικού ελέγχου του ρελέ.

4.3.3 Ανάλυση Ομοιομορφίας

Τα αποτελέσματα της δοκιμής ομοιομορφίας υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο της αναγκαστικής κυκλοφορίας του νερού, στον **πίνακα 4.2**.

Ανάλυση: Χωρίς την αντλία, η θερμότητα μεταφέρεται κυρίως μέσω φυσικής συναγωγής (natural convection), οδηγώντας στη δημιουργία σημαντικών θερμοκρασιακών βαθμίδων (temperature gradients). Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας του 1.5°C είναι απαράδεκτη για τις περισσότερες εργαστηριακές εφαρμογές. Η ενεργοποίηση της αντλίας επιβάλλει εξαναγκασμένη συναγωγή (forced convection), αναμειγνύοντας ενεργά τον όγκο του νερού και **μειώνοντας τη μέγιστη διαφορά κατά 80%**, σε μόλις 0.3°C. Αυτό το αποτέλεσμα αποδεικνύει ότι η προσθήκη της αντλίας ήταν μια κρίσιμη σχεδιαστική απόφαση που αναβάθμισε ουσιαστικά την ποιότητα και την αξιοπιστία του λουτρού.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Δοκιμής Ομοιομορφίας στους 60°C

Θέση Μέτρησης	Θερμοκρασία (Χωρίς Αντλία)	Θερμοκρασία (Με Αντλία)
Κέντρο	60.1°C	60.0°C
Γωνία 1 (κοντά στο heater)	60.8°C	60.1°C
Γωνία 2	59.5°C	59.9°C
Γωνία 3 (μακριά από heater)	59.3°C	59.8°C
Γωνία 4	59.6°C	59.9°C
Μέγιστη Διαφορά (ΔT_{\max})	1.5°C	0.3°C

4.3.4 Ανάλυση Χρόνου Απόκρισης

- **Χρόνος Ανόδου (Rise Time):** 17.5 λεπτά (για ΔT 48°C).
- **Μέγιστη Υπέρβαση (Overshoot):** 0.6°C (έφτασε στους 70.6°C).
- **Χρόνος Αποκατάστασης (Settling Time):** 21 λεπτά.

Ανάλυση: Η απόκριση του συστήματος κρίνεται πολύ ικανοποιητική. Ο χρόνος ανόδου είναι λογικός για τον όγκο του νερού και την ισχύ του θερμαντικού στοιχείου. Το πιο σημαντικό εύρημα είναι το πολύ χαμηλό overshoot. Αυτό καταδεικνύει την προληπτική δράση του παραγωγικού όρου (Derivative - D) του αλγορίθμου PID, ο οποίος "φρενάρει" τη θέρμανση καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει το setpoint, αποτρέποντας τις μεγάλες και χρονοβόρες ταλαντώσεις.

4.4 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Η ολοκληρωμένη ανάλυση των αποτελεσμάτων επιτρέπει μια σφαιρική αξιολόγηση του έργου, συνδέοντας τα εμπειρικά δεδομένα με τους αρχικούς στόχους και τις θεωρητικές αρχές.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών επιβεβαιώνουν με σαφήνεια ότι η κατασκευή πέτυχε τους θεμελιώδεις στόχους του έργου. Το σύστημα είναι σε θέση να επιτύχει και να διατηρήσει μια θερμοκρασία με υψηλή σταθερότητα ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$), απόδοση που είναι συγκρίσιμη με πολλά εμπορικά μοντέλα γενικής χρήσης. Η υλοποίηση του αλγορίθμου PID και του χρονικά αναλογικού ελέγχου του ρελέ αποδείχθηκε εξαιρετικά αποτελεσματική στη ρύθμιση της παρεχόμενης ισχύος και στην ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων.

Ο κυριότερος περιορισμός, όπως αναμενόταν από την ανάλυση στο Κεφάλαιο 1, είναι η **απόλυτη ακρίβεια**, η οποία δεσμεύεται από τις προδιαγραφές του αισθητήρα DS18B20. Η παρατηρούμενη απόκλιση, αν και σταθερή, καθιστά τη συσκευή ακατάλληλη για αυστηρά ρυθμιζόμενες εφαρμογές (π.χ., φαρμακοποιία USP, cGMP) χωρίς μια διαδικασία βαθμονόμησης έναντι πιστοποιημένου προτύπου. Ωστόσο, για εκπαιδευτικούς σκοπούς, προκαταρκτικές έρευνες και εφαρμογές όπου η **σταθερότητα** και η **επαναληψιμότητα** είναι πιο κρίσιμες από την απόλυτη ιχνηλασιμότητα, η απόδοση είναι απολύτως ικανοποιητική.

Τέλος, η δοκιμή ομοιομορφίας ανέδειξε την κρισιμότητα της ανακυκλοφορίας του νερού. Η προσθήκη μιας απλής και οικονομικής αντλίας μεταμόρφωσε την απόδοση του λουτρού, καθιστώντας το από ένα απλό λουτρό θέρμανσης σε ένα πραγματικό κυκλοφορούμενο λουτρό, ικανό να διασφαλίσει ότι όλα τα δείγματα εντός του δοχείου βρίσκονται ουσιαστικά στην ίδια θερμοκρασία.

Συνολικά, η εμπειρική αξιολόγηση καταδεικνύει την επιτυχή υλοποίηση ενός λειτουργικού, σταθερού και οικονομικού θερμοστατούμενου λουτρού, το οποίο, αναγνωρίζοντας τους εγγενείς του περιορισμούς, αποτελεί μια πολύτιμη και βιώσιμη λύση για εργαστηριακά και εκπαιδευτικά περιβάλλοντα με περιορισμένο προϋπολογισμό.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το παρόν κεφάλαιο συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την αξιολόγηση του θερμοστατούμενου λουτρού χαμηλού κόστους με μικροελεγκτή Arduino. Αναλύονται οι επιτυχίες και οι περιορισμοί του έργου, ενώ παράλληλα διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να αναβαθμίσουν περαιτέρω τη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες του συστήματος.

5.1 Επίτευξη Στόχων και Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έθεσε ως πρωταρχικό στόχο τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός λειτουργικού θερμοστατούμενου λουτρού χαμηλού κόστους, ικανού να προσφέρει ακριβή και σταθερό έλεγχο θερμοκρασίας για εργαστηριακές εφαρμογές. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι βασικοί στόχοι του έργου επιτεύχθηκαν με επιτυχία:

- **Λειτουργικότητα και Έλεγχος:** Το σύστημα λειτουργεί όπως σχεδιάστηκε, με τον μικροελεγκτή Arduino να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τον αισθητήρα θερμοκρασίας, το θερμαντικό στοιχείο μέσω του ρελέ, και την οθόνη LCD, προσφέροντας μια φιλική διεπαφή χρήστη μέσω των πλήκτρων.
- **Αποτελεσματικότητα Ελέγχου PID:** Ο αλγόριθμος ελέγχου PID, όπως υλοποιήθηκε στο λογισμικό, αποδείχθηκε εξαιρετικά αποτελεσματικός. Τα γραφήματα και οι πίνακες δεδομένων κατέδειξαν την ικανότητα του συστήματος να φτάνει γρήγορα στο setpoint με ελάχιστο ή καθόλου overshoot, και να διατηρεί τη θερμοκρασία με αξιοσημείωτη σταθερότητα (μεταξύ $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ σε τυπικές συνθήκες). Αυτό επιβεβαιώνει τη σωστή επιλογή και ρύθμιση των παραμέτρων K_p , K_i , K_d για τη συγκεκριμένη θερμική διάταξη.
- **Οικονομική Βιωσιμότητα:** Η χρήση εξαρτημάτων ανοιχτού κώδικα και ευρέως διαθέσιμων, οικονομικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, οδήγησε στην κατασκευή ενός πλήρως λειτουργικού θερμοστατούμενου λουτρού με ένα κλάσμα του κόστους ενός αντίστοιχου εμπορικού μοντέλου. Αυτό ανοίγει δυνατότητες για εργαστήρια με περιορισμένο προϋπολογισμό.
- **Εκπαιδευτική Αξία:** Το έργο προσφέρει μια εξαιρετική περίπτωση μελέτης για την εφαρμογή αρχών αυτομάτου ελέγχου, ηλεκτρονικών και προγραμματισμού σε ένα πρακτικό πρόβλημα, καθιστώντας το ένα πολύτιμο εργαλείο για την εκπαίδευση σε τεχνικούς τομείς.
- **Συμμόρφωση για Μη Κρίσιμες Εφαρμογές:** Όπως συζητήθηκε, η επιτευχθείσα απόδοση είναι επαρκής για ένα ευρύ φάσμα εργαστηριακών εφαρμογών που δεν απαιτούν αυστηρή πιστοποίηση (π.χ., cGMP), όπως προκαταρκτικές έρευνες, ποιοτικός έλεγχος χαμηλότερων απαιτήσεων ή εκπαιδευτικά πειράματα.

5.2 Προβλήματα και Περιορισμοί που Αντιμετωπίστηκαν

Παρά την επιτυχία στην επίτευξη των βασικών στόχων, η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης ανέδειξε ορισμένα προβλήματα και περιορισμούς, τα οποία είναι σημαντικό να αναγνωριστούν:

- **Ακρίβεια Αισθητήρα:** Ο αισθητήρας DS18B20, αν και αξιόπιστος και οικονομικός, έχει μια εγγενή περιορισμένη ακρίβεια (τυπικά $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). Για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια της τάξης του $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ή καλύτερη, θα ήταν απαραίτητη η χρήση ενός αισθητήρα υψηλότερης ποιότητας (π.χ., αισθητήρας Pt1000 με κατάλληλο ADC).
- **Πολυπλοκότητα Καλωδίωσης (Breadboard Prototyping):** Η αρχική υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος πραγματοποιήθηκε σε breadboard για λόγους ευελιξίας και ταχείας πρωτοτυποποίησης. Ωστόσο, αυτό οδήγησε σε μια αρκετά εκτεταμένη και συχνά ακατάστατη καλωδίωση, με μεγάλο αριθμό καλωδίων jumper, καθιστώντας την παρακολούθηση και την αποσφαλμάτωση χρονοβόρα και αυξάνοντας τον κίνδυνο τυχαίων αποσυνδέσεων ή εσφαλμένων συνδέσεων. Αυτή η πολυπλοκότητα δυσχεραίνει την οργάνωση του κυκλώματος και επηρέασε την αισθητική και πρακτική εφαρμογή της κατασκευής.
- **Απουσία Μηχανισμού Ανάδευσης/Ανακυκλοφορίας:** Στο στάδιο του σχεδιασμού δεν υπήρχε η προβλεψη μηχανισμού ανακυκλοφορίας. Η έλλειψη ενσωματωμένης αντλίας ανακυκλοφορίας ή μαγνητικού αναδευτήρα επηρεάζει την απόλυτη ομοιομορφία της θερμοκρασίας εντός του δοχείου, ειδικά σε μεγαλύτερους όγκους νερού. Παρόλο που οι δοκιμές έδειξαν ικανοποιητική ομοιομορφία για το συγκεκριμένο μέγεθος, η βέλτιστη κατανομή θερμότητας απαιτεί ανάδευση, και για αυτό προστέθηκε μια αντλία τύπου “ενυδρείου”.
- **Θερμικές Απώλειες:** Αν και έγινε προσπάθεια μόνωσης, οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον είναι αναπόφευκτες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και να επηρεάσει ελαφρώς τη σταθερότητα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ή σε περιβάλλοντα με σημαντικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας.
- **Χρόνος Ανάκαμψης σε Μεγάλες Διαταραχές:** Παρόλο που το σύστημα ανακάμπτει από διαταραχές, ο χρόνος ανάκαμψης μπορεί να είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με εμπορικά συστήματα που διαθέτουν ισχυρότερα θερμομιακά στοιχεία ή/και πιο εξελιγμένους αλγορίθμους προσαρμοστικού ελέγχου.
- **Έλλειψη Επίσημης Πιστοποίησης:** Ως ένα DIY (Do-It-Yourself) έργο, το θερμοστατούμενο λουτρό δεν φέρει επίσημες πιστοποιήσεις (π.χ., CE marking, ISO 17025 βαθμονόμηση), περιορίζοντας τη χρήση του σε ρυθμιζόμενα εργαστηριακά περιβάλλοντα.

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Βελτίωση

Με βάση τα συμπεράσματα και τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν, προτείνονται οι ακόλουθες βελτιώσεις και επεκτάσεις για μελλοντικές εκδόσεις του θερμοστατούμενου λουτρού:

- **Προσθήκη Συστήματος Ανακυκλοφορίας:** Η ενσωμάτωση ενός απλού κυκλώματος ανακυκλοφορίας εντός του δοχείου, σε συνδυασμό με την υπάρχουσα αντλία θα βελτιώνει δραματικά την ομοιομορφία της θερμοκρασίας σε όλο τον όγκο του υγρού, επιτρέποντας πιο ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις δειγμάτων. Αυτή η βελτίωση είναι κρίσιμη για εφαρμογές που απαιτούν πολύ αυστηρή θερμοκρασιακή ομοιομορφία.
- **Χρήση Αισθητήρα Υψηλότερης Ακρίβειας:** Για εφαρμογές που απαιτούν αυξημένη ακρίβεια (π.χ., κάτω από $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$), η αντικατάσταση του DS18B20 με ένα αισθητήρα Pt100 ή Pt1000, σε συνδυασμό με έναν ADC (Analog-to-Digital Converter) υψηλής ανάλυσης (π.χ., AD8223, MAX31865), θα βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια της μέτρησης και την ανάλυση της ένδειξης.
- **Ενσωμάτωση Λειτουργίας Ψύξης:** Για εφαρμογές που απαιτούν θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ή ταχύτερη ψύξη, θα μπορούσε να εξεταστεί η ενσωμάτωση ενός συστήματος ψύξης. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση Peltier Modules ή ενός μικρού ψυκτικού συμπιεστή, απαιτώντας βέβαια πιο σύνθετο έλεγχο (π.χ., διπλό PID για θέρμανση και ψύξη) και αυξημένο κόστος.
- **Βελτιωμένη Διεπαφή Χρήστη και Δυνατότητες Καταγραφής Δεδομένων:**
 - **Γραφική Οθόνη:** Η αντικατάσταση της οθόνης LCD 16x2 με μια γραφική οθόνη (π.χ., OLED ή TFT) θα επέτρεπε την εμφάνιση πιο αναλυτικών πληροφοριών, όπως γραφήματα θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο, ιστορικά δεδομένα, και πιο διαισθητικά μενού.
 - **Απομακρυσμένη Παρακολούθηση/Έλεγχος:** Η προσθήκη μονάδας Wi-Fi (π.χ., ESP8266) ή Bluetooth θα επέτρεπε την απομακρυσμένη παρακολούθηση της θερμοκρασίας και τον έλεγχο του setpoint μέσω εφαρμογής σε smartphone ή υπολογιστή, καθώς και την αυτόματη καταγραφή δεδομένων σε cloud υπηρεσίες.
 - **Καταγραφή σε SD Card:** Εναλλακτικά, η ενσωμάτωση ενός module SD card θα επέτρεπε τη μακροχρόνια καταγραφή των δεδομένων θερμοκρασίας απευθείας στη συσκευή, διευκολύνοντας την ανάλυση και την τεκμηρίωση των πειραμάτων.
- **Αλγόριθμοι Προσαρμοστικού Ελέγχου:** Για ακόμα καλύτερη απόκριση σε μεταβαλλόμενα φορτία ή διαφορετικά υγρά μέσα, θα μπορούσε να υλοποιηθεί ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος PID που να προσαρμόζει αυτόματα τις παραμέτρους K_p , K_i , K_d , ανάλογα με το πείραμα.
- **Προσθήκη Αισθητήρων pH ή Αγωγιμότητας:** Για εξειδικευμένες βιοχημικές εφαρμογές, η ενσωμάτωση αισθητήρων pH ή αγωγιμότητας θα επέτρεπε την ταυτόχρονη παρακολούθηση και, ενδεχομένως, τον έλεγχο και αυτών των παραμέτρων, μετατρέποντας το λουτρό σε ένα πιο ολοκληρωμένο εργαστηριακό σταθμό.
- **Βελτιωμένο Περιβάλημα και Ασφάλεια:** Η χρήση πιο εξελιγμένων, εργονομικών υλικών για το περίβλημα και η ενσωμάτωση πρόσθετων χαρακτηριστικών ασφαλείας, όπως προστασία

από υπερθέρμανση (hardware over-temperature cutoff) ή αισθητήρες στάθμης νερού, θα βελτιώναν την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος.

Οι παραπάνω προτάσεις αναδεικνύουν το δυναμικό ανάπτυξης του έργου, προσφέροντας πολλαπλές κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση, με στόχο τη δημιουργία ενός ακόμα πιο προηγμένου και ευέλικτου εργαστηριακού εργαλείου, διατηρώντας παράλληλα την προσβασιμότητα και το χαμηλό κόστος ως βασικές αρχές.

5.4 Οικονομική Ανάλυση και Κόστος-Όφελος

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του κατασκευασμένου θερμοστατούμενου λουτρού είναι το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος υλοποίησής του σε σύγκριση με αντίστοιχα εμπορικά προϊόντα. Το συνολικό κόστος για την αγορά όλων των απαραίτητων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, του θερμαντικού στοιχείου, του δοχείου, των υλικών μόνωσης και των περιφερειακών (π.χ., καλώδια, μικροϋλικά) εκτιμάται σε περίπου στα 100-150 ευρώ.. Αυτό το ποσό είναι σημαντικά χαμηλότερο από το κόστος αγοράς ενός εμπορικού θερμοστατούμενου λουτρού με παρόμοιες βασικές λειτουργίες, το οποίο μπορεί εύκολα να ανέρχεται σε τουλάχιστον 1000 ευρώ..

Η ανάλυση κόστους-οφέλους αναδεικνύει την αξία του έργου, ειδικά για εργαστήρια, εκπαιδευτικά ιδρύματα ή ερευνητές με περιορισμένο προϋπολογισμό. Παρόλο που το κατασκευασμένο λουτρό ενδέχεται να μην προσφέρει την ίδια ακρίβεια, πιστοποίηση ή πρόσθετες λειτουργίες με ένα ακριβότερο εμπορικό μοντέλο, η ικανοποιητική απόδοση που επιτεύχθηκε στις βασικές λειτουργίες ελέγχου θερμοκρασίας, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος, το καθιστά μια εξαιρετικά ελκυστική και βιώσιμη εναλλακτική λύση για ένα ευρύ φάσμα μη κρίσιμων εργαστηριακών εφαρμογών.

Επιπλέον, η διαδικασία κατασκευής και προγραμματισμού του λουτρού προσφέρει σημαντική εκπαιδευτική αξία. Το κόστος των υλικών μετατρέπεται σε μια πρακτική εμπειρία μάθησης για τον σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, τον προγραμματισμό μικροελεγκτών, τις αρχές του αυτομάτου ελέγχου και την αντιμετώπιση πρακτικών προβλημάτων υλοποίησης. Αυτή η εκπαιδευτική διάσταση αποτελεί ένα σημαντικό "όφελος" που δεν προσφέρουν τα έτοιμα εμπορικά προϊόντα.

Συνοψίζοντας, η οικονομική ανάλυση καταδεικνύει ότι το έργο της παρούσας πτυχιακής εργασίας πέτυχε τον στόχο της δημιουργίας ενός λειτουργικού θερμοστατούμενου λουτρού με εξαιρετικά ευνοϊκή σχέση κόστους-οφέλους, καθιστώντας τον εργαστηριακό εξοπλισμό ελέγχου θερμοκρασίας πιο προσβάσιμο.

5.5 Εφαρμογές και Πεδίο Εφαρμογής

Το θερμοστατούμενο λουτρό χαμηλού κόστους που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, παρόλο που δεν προορίζεται για αυστηρά ρυθμιζόμενα εργαστηριακά περιβάλλοντα που απαιτούν υψηλότερη ακρίβεια και πιστοποίηση, βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα μη κρίσιμων εργαστηριακών και εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων. Το πεδίο εφαρμογής του καθορίζεται από την ικανοποιητική απόδοση στις βασικές λειτουργίες ελέγχου θερμοκρασίας και την εξαιρετικά ευνοϊκή σχέση κόστους-οφέλους.

Συγκεκριμένα, το λουτρό είναι ιδανικό για:

- **Εκπαιδευτικά Εργαστήρια:** Σε πανεπιστήμια, τεχνικές σχολές ή ερευνητικά κέντρα, όπου ο προϋπολογισμός για εργαστηριακό εξοπλισμό είναι συχνά περιορισμένος. Επιτρέπει στους φοιτητές και τους εκπαιδευόμενους να διεξάγουν πειράματα που απαιτούν σταθερό έλεγχο θερμοκρασίας (π.χ., κινητική χημικών αντιδράσεων, μελέτη ενζυμικής δραστηριότητας, επώαση βιολογικών δειγμάτων σε μη κρίσιμες θερμοκρασίες) και να εξοικειωθούν με τις αρχές του αυτομάτου ελέγχου και τη λειτουργία βασικών οργάνων. Η DIY φύση του έργου προσφέρει επιπλέον εκπαιδευτική αξία στην κατανόηση της κατασκευής και του προγραμματισμού τέτοιων συστημάτων, αλλά και την δυνατότητα προσθήκης επιπλέον λειτουργιών.
- **Προκαταρκτικές Έρευνες και Ανάπτυξη (R&D):** Για ερευνητές που χρειάζονται ένα αξιόπιστο μέσο για προκαταρκτικές δοκιμές (proof-of-concept), screening πειραμάτων ή ανάπτυξη νέων μεθόδων όπου η απόλυτη ακρίβεια και ιχνηλασιμότητα δεν αποτελούν τον κύριο περιορισμό. Η σταθερότητα και η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων που προσφέρει το λουτρό είναι επαρκείς για τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων σε αυτό το στάδιο.
- **Ποιοτικός Έλεγχος (χαμηλότερων απαιτήσεων):** Σε εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου όπου οι απαιτήσεις για την ακρίβεια και την πιστοποίηση της θερμοκρασίας είναι λιγότερο αυστηρές. Για παράδειγμα, σε μικρές βιοτεχνίες, εργαστήρια ανάπτυξης προϊόντων ή ελέγχους ρουτίνας που δεν εμπίπτουν σε αυστηρά ρυθμιζόμενα πρότυπα.
- **Εφαρμογές όπου η Σταθερότητα είναι Κρίσιμη:** Σε ορισμένες βιολογικές ή χημικές διεργασίες, η διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας γύρω από ένα setpoint είναι πιο σημαντική από την απόλυτη ακρίβεια της μέτρησης. Το λουτρό προσφέρει εξαιρετική σταθερότητα με μικρές διακυμάνσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για τέτοιου τύπου εφαρμογές.
- **Χόμπι και Προσωπικά Έργα:** Για ενθουσιαστές των ηλεκτρονικών, του προγραμματισμού και των DIY κατασκευών που θέλουν να δημιουργήσουν τον δικό τους εργαστηριακό εξοπλισμό για προσωπική χρήση ή πειραματισμό.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το λουτρό δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν συμμόρφωση με αυστηρά πρότυπα όπως cGMP, ISO 17025, ή σε περιβάλλοντα όπου η απόλυτη ιχνηλασιμότητα και πιστοποίηση κάθε μέτρησης είναι απαραίτητη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, απαιτείται η χρήση εμπορικών οργάνων υψηλότερης κατηγορίας με τις αντίστοιχες πιστοποιήσεις και προδιαγραφές.

Συνοψίζοντας, το πεδίο εφαρμογής του θερμοστατούμενου λουτρού που αναπτύχθηκε είναι ευρύ εντός του πλαισίου των μη κρίσιμων εργαστηριακών και εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων, προσφέροντας μια οικονομική και λειτουργική λύση για τον έλεγχο θερμοκρασίας.

5.6 Μαθήματα που Αποκτήθηκαν (Lessons Learned)

Η εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας και η πρακτική υλοποίηση του θερμοστατούμενου λουτρού αποτέλεσαν μια πολύτιμη μαθησιακή εμπειρία, προσφέροντας σημαντικά μαθήματα σε

διάφορους τομείς, πέρα από τη θεωρητική γνώση. Οι προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν και οι λύσεις που βρέθηκαν συνέβαλαν στην εμπάθυνση της κατανόησης και στην ανάπτυξη πρακτικών δεξιοτήτων.

Τα κυριότερα μαθήματα που αποκτήθηκαν είναι τα εξής:

- **Σημασία του Λεπτομερούς Σχεδιασμού:** Παρόλο που το project ξεκίνησε με έναν σαφή αρχικό σχεδιασμό, η πραγματική υλοποίηση ανέδειξε την ανάγκη για ακόμη μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην προ-σχεδίαση, ιδίως όσον αφορά την ενσωμάτωση των εξαρτημάτων στο περίβλημα και την οργάνωση της καλωδίωσης. Οποιαδήποτε παράλειψη σε αυτό το στάδιο μπορεί να οδηγήσει σε χρονοβόρες τροποποιήσεις αργότερα.
- **Προκλήσεις Breadboard και Οργάνωση Κυκλώματος:** Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2, η χρήση breadboard για το πρωτότυπο, ενώ ήταν απαραίτητη για την ευελιξία, δημιούργησε σημαντικές προκλήσεις στην οργάνωση των συνδέσεων. Η πληθώρα των καλωδίων jumper καθιστούσε δύσκολη την αποσφαλμάτωση και αύξανε τον κίνδυνο σφαλμάτων. Αυτό υπογράμμισε την αναγκαιότητα για πιο οργανωμένες λύσεις (π.χ., custom PCB ή shield για Arduino) σε επόμενα στάδια ανάπτυξης.
- **Βελτιστοποίηση Αλγορίθμων Ελέγχου:** Η διαδικασία "tuning" των παραμέτρων PID (K_p , K_i , K_d) ήταν ένα κρίσιμο στάδιο. Η πρακτική εφαρμογή και η παρακολούθηση της απόκρισης του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες, αντί απλής θεωρητικής προσέγγισης, ήταν καθοριστική για την επίτευξη της βέλτιστης σταθερότητας και ταχύτητας απόκρισης. Έδειξε πώς οι θεωρητικές γνώσεις μεταφράζονται σε πρακτικά αποτελέσματα και πώς μικρές αλλαγές στις παραμέτρους μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση του λουτρού.
- **Αντιμετώπιση Προβλημάτων (Troubleshooting):** Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης, εμφανίστηκαν διάφορα προβλήματα, από λανθασμένες συνδέσεις και προβλήματα στην ανάγνωση του αισθητήρα, μέχρι απρόβλεπτες θερμικές συμπεριφορές. Η συστηματική προσέγγιση στην αναγνώριση και επίλυση αυτών των προβλημάτων (troubleshooting) ήταν μια αναπόσπαστη και διδακτική πτυχή του έργου.
- **Σημασία της Τεκμηρίωσης:** Η λεπτομερής καταγραφή κάθε βήματος, από τις επιλογές των εξαρτημάτων και τα διαγράμματα κυκλωμάτων μέχρι τον κώδικα και τα αποτελέσματα των δοκιμών, αποδείχθηκε ζωτικής σημασίας για την ομαλή εξέλιξη του έργου και την τελική συγγραφή της πτυχιακής εργασίας.
- **Διαχείριση Έργου και Χρόνου:** Η εκπόνηση ενός τέτοιου έργου απαιτεί αποτελεσματική διαχείριση του χρόνου και των πόρων. Ο καθορισμός ρεαλιστικών στόχων και η διαχείριση των απρόβλεπτων παραγόντων που εμφανίζονται σε κάθε πρακτική υλοποίηση ήταν κρίσιμοι παράγοντες επιτυχίας.

Αυτά τα μαθήματα, σε συνδυασμό με την επιτυχία στην επίτευξη των τεχνικών στόχων, ενίσχυσαν σημαντικά τις δεξιότητες του ερευνητή στην ηλεκτρονική, τον προγραμματισμό, τον αυτόματο έλεγχο και τη μηχανική σχεδίαση, αποτελώντας μια στέρεη βάση για μελλοντικά projects.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. How to Choose the Right Thermostatic Water Bath - Drawell, <https://www.drawellanalytical.com/how-to-choose-the-right-thermostatic-water-bath/>
2. Water Baths - Amerigo Scientific, <https://www.amerigoscientific.com/instrument/water-baths.html>
3. How Does Column Temperature Affect HPLC Resolution? - Chrom ..., <https://chromtech.com/how-does-column-temperature-affect-hplc-resolution/>
4. How does temperature affect PCR? | AAT Bioquest, <https://www.aatbio.com/resources/faq-frequently-asked-questions/How-does-temperature-affect-PCR>
5. The Importance of Temperature in Liquid Chromatography - Avantor, <https://www.avantorsciences.com/us/en/support/knowledge-center/importance-of-temperature-in-liquid-column-chromatography>
6. Polymerase Chain Reaction (PCR) - NEB, <https://www.neb.com/en-us/applications/dna-amplification-pcr-and-qpcr/polymerase-chain-reaction-pcr>
7. Drug Stability: ICH versus Accelerated Predictive Stability Studies ..., <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9693625/>
8. RT710 USP Apparatus 4 Flow-through Dissolution System - Raytor, <https://www.raytor.com/product/rt710-usp-apparatus-4/>
9. Flow-Through Cell Dissolution Tester (USP Apparatus 4) - American Farmagrup |, <https://americanfarmagrup.com/sites/default/files/802%20EQUIPO%20DISOLUCION%20POR%20CELDA%20DE%20FLUJO%20USP%204.pdf>
10. Compilation of FDA Guidance and Resources for in vitro Dissolution Testing of Immediate Release Solid Oral Dosage Forms, <https://www.fda.gov/animal-veterinary/new-animal-drug-applications/compilation-fda-guidance-and-resources-in-vitro-dissolution-testing-immediate-release-solid-oral-dosage>
11. <1058> ANALYTICAL INSTRUMENT QUALIFICATION - BioGlobaX, https://www.bioglobax.com/wp-content/uploads/2020/02/USP_1058_analytical_instrument_qualification.pdf
12. USP <1058> ANALYTICAL INSTRUMENT QUALIFICATION INTRODUCTION - BioGlobaX, <https://www.bioglobax.com/wp-content/uploads/2022/05/USP-%E2%8C%A91058%E2%8CAA-ANALYTICAL-INSTRUMENT-QUALIFICATION.pdf>
13. Digital Thermometer | Dissolution Validation Tools | USP Validation - LabHut.com, <https://www.labhut.com/products/validation-tools/digital-thermometer.html>
14. Introduction to the Validation of a Dissolution Apparatus, https://dissolutiontech.com/DTresour/200402Articles/DT200402_A03.pdf
15. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire - Sparkfun, <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>
16. DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer - Analog Devices, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
17. Arduino Uno Rev3 — Arduino Online Shop, <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
18. A000066: Arduino Uno R3 - DigiKey, <https://www.digikey.com/reference-designs/en/open-source-mcu-platforms/2481>
19. Arduino Uno - Farnell, <https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf>

20. DS18B20 Waterproof Temperature Sensor Cable - Quick-teck, <https://www.quick-teck.co.uk/Management/EEUploadFile/1420644897.pdf>
21. Guide for DS18B20 Temperature Sensor with Arduino - Random Nerd Tutorials, <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-ds18b20-temperature-sensor-with-arduino/>
22. Relay Module 5V x 1 Relay - ProtoSupplies, <https://protosupplies.com/product/relay-module-5v-x-1/>
23. 2 Channel 5V Relay Module - DigiKey, <https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/5773/TS0010D%20DATASHEET.pdf>
24. KEYES 5V Relay Module - KY-019, <https://roboticafacil.es/datasheets/ky-019.pdf>
25. LCD16X2 - 16 x 2 Character LCD Display Technical Data - Futurlec, <https://www.futurlec.com/LED/LCD16X2.shtml>
26. LCD Display Screen - ECE Labs, <https://ecelabs.njit.edu/fed101/resources/LCD%20display%20on%20Arduino.pdf>
27. 16x2 LCD Display Module - Pinout & Datasheet - Circuit Digest, <https://circuitdigest.com/article/16x2-lcd-display-module-pinout-datasheet>
28. Water Heating Calculator, <https://www.omnicalculator.com/physics/water-heating>
29. Screw Plug Immersion Heaters - Watlow, <https://www.watlow.com/-/media/documents/specification-sheets/hanspi0519.ashx>
30. 5 Essential Electrical Safety Rules for Spring DIY Projects - PowerTech, <https://powertechteam.com/5-essential-electrical-safety-rules-for-spring-diy-projects/>
31. Safety Tips for Beginner DIY Electronic Projects | Circuits Central, <https://www.circuits-central.com/blog/safety-tips-beginner-diy-electronic-projects/>
32. Understanding On-Off Temperature Controllers | West CS, <https://www.west-cs.com/news/understanding-on-off-temperature-controllers/>
33. APPENDIX F. PID temperature control algorithm - CasCade ..., <https://cascade.net/wp-content/uploads/2020/04/PID-control-algorithm.pdf>
34. PID Temperature Controllers: Complete Usage Guide - Powerblanket, <https://www.powerblanket.com/blog/a-comprehensive-guide-to-pid-temperature-controllers-what-you-should-know/>
35. The PID Controller & Theory Explained - NI, <https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html>
36. br3ttb/Arduino-PID-Library - GitHub, <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library>
37. Improving the Beginner's PID – Introduction | Project Blog - Brett Beauregard, <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>
38. PID problem with Compute() function - Programming - Arduino Forum, <https://forum.arduino.cc/t/pid-problem-with-compute-function/439189>
39. Improving the Beginner's PID: Direction | Project Blog - Brett Beauregard, <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-direction/>
40. Arduino PID Control Tutorial - Energia Zero, <http://energiazero.org/cartelle/Sistemi/arduino%20pid%20control%20tutorial.pdf>
41. DS18B20 is throwing -127C from time to time - Getting Started - Particle Community, <https://community.particle.io/t/ds18b20-is-throwing-127c-from-time-to-time/16401>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας για On-Off λειτουργία

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include<EEPROM.h>
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);
int add_chk = 0;
int check_val = 10;
int c_temp = 0;
int c_temp_add = 1;
int f_temp = 0;
int f_temp_add = 2;
int set = A3, dec = A2, inc = A1, stsp = A0;
int numberOfDevices;
int relay = 8;
int buzzer = 9;
int val_tol = 0;
bool exit_stsp = false;
bool exit_set = false;
bool buz = true;
bool re_heat = false;
#define ONE_WIRE_BUS 10 // Pin no
#define TEMPERATURE_PRECISION 12 // 12-bit resolution
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress tempDeviceAddress;

//----- Temperature tolerance -----//
const int tol = 3; // in degree Celsius
//-----//

void setup(void)
{
  lcd.begin(16, 2);
  sensors.begin();
  pinMode(stsp, INPUT_PULLUP);
  pinMode(inc, INPUT_PULLUP);
  pinMode(dec, INPUT_PULLUP);
  pinMode(set, INPUT_PULLUP);
  pinMode(relay, OUTPUT);
  pinMode(buzzer, OUTPUT);
  digitalWrite(relay, LOW);
  digitalWrite(buzzer, LOW);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" Water Heater");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" Controller");
  numberOfDevices = sensors.getDeviceCount();

  if (EEPROM.read(add_chk) != check_val)
  {
    EEPROM.write(add_chk, check_val);
  }
}

```

