

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Αυτόματος Ηλεκτρονικός Χρονοδιακόπτης Εκχύλισης
Νερού με Μέτρηση Θερμοκρασίας και Όγκου»



Φοιτητής

Κυρκόπουλος Ορφέας 517069

Επιβλέπων

Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Αύγουστος 2026

Στοιχεία και δήλωση εκπόνησης

Τίτλος: «Αυτόματος Ηλεκτρονικός Χρονοδιακόπτης Εκχύλισης Νερού με Μέτρηση

Θερμοκρασίας και Όγκου»

Κωδικός: 26157

Φοιτητής: Κυρκόπουλος Ορφέας

Επιβλέπων: Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε.: 10 / 03 / 2026

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε.: 06 / 09 / 2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις πηγές από τις οποίες έγινε χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Η εργασία προετοιμάστηκε ειδικά ως πτυχιακή εργασία στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος

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

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

Περίληψη

Η πτυχιακή εργασία παρουσιάζει τη μελέτη, τον σχεδιασμό και την τεχνική τεκμηρίωση ενός αυτόματου ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη εκχύλισης νερού με μέτρηση θερμοκρασίας και όγκου. Η πρωτότυπη κατασκευή αναπτύχθηκε ως ενσωματωμένο σύστημα για ελεγχόμενη ενεργοποίηση ηλεκτροβάνας και παρακολούθηση φυσικών μεγεθών. Η υλοποίηση χωρίζεται σε δύο ανεξάρτητα υποσυστήματα που λειτουργούν στην ίδια υδραυλική διαδρομή, χωρίς άμεση ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ τους. Το πρώτο βασίζεται στον PIC16F1825 και αναλαμβάνει τον χρονισμό της ηλεκτροβάνας, την ανάγνωση τεσσάρων πλήκτρων, την απεικόνιση σε γραφική LCD 128×64 και την οδήγηση ρελέ και ενδεικτικών LED. Το δεύτερο βασίζεται σε ESP32 και χρησιμοποιεί αισθητήρα ροής YF-S201, αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20, LCD 16×2, πλήκτρο και buzzer. Το firmware υπολογίζει τη στιγμιαία παροχή και τον συνολικό όγκο και αποθηκεύει τα δεδομένα σε μνήμη NVS. Εξετάζονται επίσης η τροφοδοσία από 230 V AC, η γαλβανική απομόνωση, οι βαθμίδες ρύθμισης τάσης, η σχεδίαση PCB, τα μηχανικά αρχεία STL και βασικοί ηλεκτρικοί υπολογισμοί. Τα schematics, τα fabrication layers, τα μηχανικά αρχεία STL, το firmware, τα προγράμματα και οι φωτογραφίες που παρουσιάζονται αφορούν την κατασκευή της εργασίας. Τέλος, εξετάζονται η αξιοπιστία, οι περιορισμοί και η ηλεκτρική ασφάλεια, ενώ προτείνεται ως μελλοντική βελτίωση η χρήση της μέτρησης ροής σε κλειστό βρόχο δοσομέτρησης νερού.

Λέξεις-κλειδιά: αυτόματος ηλεκτρονικός χρονοδιακόπτης, εκχύλιση νερού, δοσομέτρηση νερού, ενσωματωμένα συστήματα, PIC16F1825, ESP32, firmware, αυτοματισμός, ηλεκτροβάνα, YF-S201, μέτρηση ροής, μέτρηση όγκου, DS18B20, μέτρηση θερμοκρασίας, 1-Wire, PCB, LCD, ICSP, ηλεκτρική ασφάλεια.

Automatic Electronic Water Dispensing Timer with Temperature and Volume Measurement

Abstract

This thesis describes the design and technical documentation of an automatic electronic water dispensing timer with temperature and volume measurement. The prototype was built as an embedded system for timed control of a water solenoid valve and for monitoring physical quantities. It is divided into two separate subsystems that operate on the same hydraulic path without a direct digital connection. The first uses a PIC16F1825 and handles solenoid timing, analog decoding of four push-buttons, a 128×64 graphical LCD, the relay and the indicator LEDs. The second uses an ESP32 together with a YF-S201 flow sensor, a DS18B20 temperature sensor, a 16×2 LCD, a push-button and a buzzer. Its firmware calculates instantaneous flow rate and accumulated volume and stores data in NVS memory. The thesis also examines the 230 V AC power stage, galvanic isolation, voltage regulation, PCB design, STL files and basic electrical calculations. The schematics, fabrication layers, mechanical STL files, firmware, software files and photographs presented refer to the prototype developed for this thesis. Finally, reliability, limitations and electrical safety are discussed, and closed-loop water dosing based on measured flow is proposed as a future improvement.

Keywords: automatic electronic timer, water dispensing, water dosing, embedded systems, PIC16F1825, ESP32, firmware, automation, solenoid valve, YF-S201, flow measurement, volume measurement, DS18B20, temperature measurement, 1-Wire, PCB design, LCD, ICSP, electrical safety.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή για την καθοδήγηση και τις παρατηρήσεις του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης την οικογένεια και τους ανθρώπους που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και της τεχνικής υλοποίησης.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Automatic Electronic Water Dispensing Timer with Temperature and Volume Measurement / Abstract	5
Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων	12
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	13
1.1 Τεχνολογικό πλαίσιο αυτοματισμού και ηλεκτρονικού ελέγχου	14
1.2 Πρόβλημα, κίνητρο και στόχοι της εργασίας	16
1.3 Λειτουργικές απαιτήσεις και συνολική αρχιτεκτονική	17
1.4 Μεθοδολογία, πεδίο εφαρμογής και περιορισμοί	19
1.5 Συνεισφορά και δομή της εργασίας	20
Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Τεχνολογιών Ελεγχόμενης Ροής και Παρόμοιων Συστημάτων	22
2.1 Ενσωματωμένος έλεγχος σε συστήματα εκχύλισης και δοσομέτρησης νερού	23
2.2 Χρονικός έλεγχος ηλεκτροβάνας και δοσομέτρηση	24
2.3 Μέτρηση παροχής και όγκου με αισθητήρα Hall	25
2.4 Μέτρηση θερμοκρασίας και τοπική διεπαφή	26
2.5 Συναφείς εφαρμογές αυτοματοποιημένης διανομής υγρών και παρακολούθησης κατάστασης	27
2.6 Συγκριτική αποτίμηση και σχεδιαστικές επιλογές	29
Κεφάλαιο 3ο: Υλικό, Λογισμικό και Τεχνολογίες Υλοποίησης	32
3.1 Συνολική αρχιτεκτονική υλικού	33
3.2 Τροφοδοσία, απομόνωση, ανόρθωση και εξομάλυνση	35
3.3 Ρύθμιση 3,3 V και τροφοδοσία backlight	40
3.4 Μικροελεγκτής PIC16F1825, I/O, ADC και χρονισμός	44
3.5 Ρελέ, ηλεκτροβάνες, τρανζίστορ και flyback προστασία	48
3.6 Γραφική LCD 128×64, πλήκτρα, LED και ICSP	52
3.7 Υποσύστημα ESP32 και κατανομή GPIO	57

3.8	Αισθητήρας ροής YF-S201 και φαινόμενο Hall.....	60
3.9	DS18B20, LCD 16×2, πλήκτρο και buzzer.....	62
3.10	Σχεδίαση PCB και τρισδιάστατα αρχεία flowmeter.....	65
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση, Λειτουργία και Τεχνική Αποτίμηση.....		69
4.1	Διαγράμματα ροής και ακολουθία λειτουργίας του συστήματος	70
4.2	Πρακτική λειτουργία της πλακέτας PIC16F1825	74
4.3	Αρχιτεκτονική firmware του ESP32	80
4.4	Υπολογισμός παροχής, όγκου και αποθήκευση NVS	81
4.5	Θερμοκρασία, LCD, πλήκτρο και ηχητική ανάδραση	83
4.6	Ανάλυση PCB fabrication layers	84
4.7	Πρακτική διασύνδεση του ESP32 με αισθητήρες και περιφερειακά	89
4.8	Ηλεκτρικοί και αριθμητικοί υπολογισμοί.....	91
4.9	Δοκιμές, σφάλματα, αξιοπιστία και περιορισμοί.....	94
4.10	Ηλεκτρική ασφάλεια και σχεδιαστικοί έλεγχοι	95
Κεφάλαιο 5ο: Αξιολόγηση, Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης.....		97
5.1	Αποτίμηση επίτευξης των τεχνικών στόχων της κατασκευής.....	98
5.2	Περιορισμοί και εμπειρίες από την υλοποίηση	99
5.3	Άμεσες προτάσεις βελτίωσης	100
5.4	Μελλοντική εξέλιξη του χρονοδιακόπτη και τελικό συμπέρασμα	101
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Συνοπτικός Πίνακας Εξαρτημάτων.....		105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - Βασικά Τμήματα Κώδικα ESP32.....		106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Σχέδια και Μηχανικά Αρχεία.....		110
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - Πηγαίος Κώδικας C του PIC16F1825		114

Οι εικόνες της πραγματικής κατασκευής και τα σχεδιαστικά αρχεία χρησιμοποιούνται ως οπτική τεκμηρίωση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τεκμηριώνονται από τις αντίστοιχες αριθμημένες πηγές.

Κατάλογος Εικόνων

Οι εικόνες περιλαμβάνουν διαγράμματα, schematics, φωτογραφίες, PCB/fabrication απεικονίσεις και τρισδιάστατα renders.

Εικόνα 1.1: Συνολική λειτουργική αρχιτεκτονική των δύο υποσυστημάτων της κατασκευής...	16
Εικόνα 3.1: Συνολικό ηλεκτρονικό σχηματικό της πλακέτας PIC16F1825.....	31
Εικόνα 3.2: Απόσπασμα του schematic για MYRRA 44158 (230 V / 9 V, 2,3 VA).....	32
Εικόνα 3.3: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	32
Εικόνα 3.4: Ενδεικτική απεικόνιση μετασχηματιστή PCB της MYRRA, παρόμοιας κατασκευαστικής μορφής.....	32
Εικόνα 3.5: Απόσπασμα του schematic για DF1506S - γέφυρα πλήρους ανόρθωσης.....	33
Εικόνα 3.6: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	33
Εικόνα 3.7: Λεπτομέρεια της σχεδιασμένης πλακέτας στην περιοχή τροφοδοσίας, μετασχηματιστή και ρελέ.....	36
Εικόνα 3.8: Απόσπασμα του schematic για 78L33A / L78L33A, 3,3 V.....	37
Εικόνα 3.9: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	37
Εικόνα 3.10: Ενδεικτική φωτογραφία ρυθμιστή 78L33A σε SMD συσκευασία.....	37
Εικόνα 3.11: Απόσπασμα του schematic για LM317L ως πηγή σταθερού ρεύματος backlight.....	39
Εικόνα 3.12: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	39
Εικόνα 3.13: Ενδεικτική φωτογραφία ολοκληρωμένου LM317L σε SMD συσκευασία.....	39
Εικόνα 3.14: Ενδεικτική διάταξη ακροδεκτών του LM317L σε 8-pin package.....	40

Εικόνα 3.15: Απόσπασμα του schematic για PIC16F1825.....	41
Εικόνα 3.16: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	41
Εικόνα 3.17: Ενδεικτική απεικόνιση του PIC16F1825 σε 14-pin through-hole package.....	41
Εικόνα 3.18: Διάγραμμα ακροδεκτών του PIC16F1825 (14-pin).....	42
Εικόνα 3.19: Απόσπασμα του schematic για Omron G2RL-1A-E, 12 VDC, SPST-NO.....	45
Εικόνα 3.20: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	45
Εικόνα 3.21: Απόσπασμα του schematic για BC847B - driver χαμηλής πλευράς.....	46
Εικόνα 3.22: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	46
Εικόνα 3.23: Απόσπασμα του schematic για LL4148 - flyback προστασία πηνίου.....	47
Εικόνα 3.24: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	47
Εικόνα 3.25: Η ηλεκτροβάννα της κατασκευής χρησιμοποιεί πηνίο SIRAI ZA32A, με σήμανση 220–230 V / 50 Hz, 208–240 V / 60 Hz, Class F και ED 100% [37].....	48
Εικόνα 3.26: Απόσπασμα του schematic για SIRAI ZA32A - πηνίο ηλεκτροβάννας.....	48
Εικόνα 3.27: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	48
Εικόνα 3.28: Απόσπασμα του schematic για Winstar WO12864A1, COG 128×64.....	49
Εικόνα 3.29: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	49
Εικόνα 3.30: Απόσπασμα του schematic για FSM4JSMATR - tactile switches.....	51
Εικόνα 3.31: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	51
Εικόνα 3.32: Απόσπασμα του schematic για VLMW1301-GS08 - λευκά SMD LED ενδείξεων....	52
Εικόνα 3.33: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	52
Εικόνα 3.34: Σχηματικό διασύνδεσης της γραφικής LCD 128×64.....	53
Εικόνα 3.35: Απόσπασμα του schematic για ESP32 30-pin / ESP-WROOM-32.....	54
Εικόνα 3.36: Ενδεικτική πλακέτα ανάπτυξης ESP32 με module ESP32-WROOM-32E· η φυσική διάταξη ακροδεκτών μπορεί να διαφέρει ανά board.....	55
Εικόνα 3.37: Σχηματικό του υποσυστήματος ESP32 για ροή, θερμοκρασία και LCD.....	56
Εικόνα 3.38: Απόσπασμα του schematic για YF-S201 - αισθητήρας ροής.....	57
Εικόνα 3.39: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	57
Εικόνα 3.40: Ο αισθητήρας ροής όπως έχει ενσωματωθεί στην πραγματική διάταξη μέτρησης παροχής και όγκου νερού.....	58
Εικόνα 3.41: Απόσπασμα του schematic για DS18B20 σε μεταλλική probe.....	59
Εικόνα 3.42: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	59
Εικόνα 3.43: Απόσπασμα του schematic για CMC216L01YBN - LCD 16×2.....	60
Εικόνα 3.44: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	60
Εικόνα 3.45: Απόσπασμα του schematic για KPEG110 + BC817 driver.....	61
Εικόνα 3.46: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.....	61
Εικόνα 3.47: Ο μεταλλικός αισθητήρας θερμοκρασίας της πραγματικής κατασκευής, συνδεδεμένος με το υποσύστημα μέτρησης.....	61

Εικόνα 3.48: Συνοπτική απεικόνιση των fabrication layers της πρωτότυπης πλακέτας.....	64
Εικόνα 3.49: Ισομετρική απόδοση του FLOWMETER_BOTTOM_001.STL.....	65
Εικόνα 3.50: Ισομετρική απόδοση του FLOWMETER_002_V2.STL.....	65
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής της βασικής λειτουργίας του PIC και της ηλεκτροβάνας.....	69
Εικόνα 4.2: Διάγραμμα ροής του κύριου βρόχου του ESP32.....	69
Εικόνα 4.3: Εσωτερική άποψη του αυτόματου ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη με ηλεκτροβάνα, καλωδίωση και πλακέτα ελέγχου.....	76
Εικόνα 4.4: Πλακέτα ελέγχου με μικροελεγκτή PIC16F1825.....	76
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ροής του υπολογισμού παροχής και της αποθήκευσης συνολικού όγκου...	78
Εικόνα 4.6: Top silkscreen της πλακέτας.....	84
Εικόνα 4.7: Bottom silkscreen και θέσεις χειριστηρίων.....	84
Εικόνα 4.8: Top solder mask.....	84
Εικόνα 4.9: Bottom solder mask.....	84
Εικόνα 4.10: Top solder paste.....	85
Εικόνα 4.11: Bottom solder paste.....	85
Εικόνα 4.12: Board outline και μηχανικές εγκοπές.....	85
Εικόνα 4.13: NPTH drill και οπές στερέωσης.....	85
Εικόνα 4.14: Λεπτομερής αναφορά στο schematic της μονάδας ESP32.....	87
Εικόνα Γ.1: Παράρτημα - πλήρες schematic κύριας πλακέτας PIC.....	107
Εικόνα Γ.2: Παράρτημα - πλήρες schematic ESP32 flow/temperature.....	108
Εικόνα Γ.3: Παράρτημα - συνολικό fabrication set PCB.....	109
Εικόνα Γ.4: Παράρτημα - FLOWMETER_BOTTOM_001.STL.....	110
Εικόνα Γ.5: Παράρτημα - FLOWMETER_002_V2.STL.....	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Συγκριτική εικόνα τεχνολογιών και σχετικών συστημάτων ελεγχόμενης ροής	27
Πίνακας 3.1: Βασικές τιμές της κύριας τροφοδοσίας	35
Πίνακας 3.2: Κύριες γραμμές του PIC16F1825	43
Πίνακας 3.3: Κατανομή GPIO του υποσυστήματος ESP32	55
Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικοί υπολογισμοί του συστήματος	89
Πίνακας A.1: Βασικά εξαρτήματα και αρχεία της κατασκευής	102

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται το τεχνικό πρόβλημα, οι βασικοί στόχοι και οι απαιτήσεις της κατασκευής. Η περιγραφή ξεκινά από τη λειτουργία που πρέπει να έχει η συσκευή και καταλήγει στα ηλεκτρονικά και στο firmware που χρειάζονται για τον έλεγχο της παροχής και την παρακολούθηση του νερού.

Η εργασία συνδυάζει ηλεκτρονικά, ενσωματωμένα συστήματα και πρακτικό αυτοματισμό. Η κατασκευή είναι ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα ελέγχου της παροχής νερού, όπου η ηλεκτρονική μονάδα συνεργάζεται με φορτία διαφορετικής τάσης, με τη διεπαφή χρήστη και με αισθητήρες. Γι' αυτό η μελέτη δεν περιορίζεται μόνο στον μικροελεγκτή ή στον κώδικα, αλλά εξετάζει όλη τη διαδρομή από την τροφοδοσία και την οδήγηση της ηλεκτροβάνας μέχρι την απεικόνιση πληροφοριών και την καταγραφή ροής, όγκου και θερμοκρασίας.

Η τεκμηρίωση βασίζεται στα πραγματικά σχέδια και στις φωτογραφίες της κατασκευής. Εξετάζονται οι τάσεις τροφοδοσίας, οι βαθμίδες οδήγησης, οι συνδέσεις των μικροελεγκτών και τα αρχεία PCB, ενώ οι εξωτερικές πηγές χρησιμοποιούνται για το θεωρητικό μέρος, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων και τα σχετικά πρότυπα. Το πρόσθετο υποσύστημα ESP32 μετρά ροή και θερμοκρασία χωρίς άμεση ψηφιακή σύνδεση με την πλακέτα PIC. Έτσι ξεχωρίζουν καθαρά όσα έχουν υλοποιηθεί, όσα προκύπτουν από υπολογισμούς και όσα προτείνονται για μελλοντική βελτίωση.

Η κατασκευή αναπτύχθηκε σε δύο ξεχωριστά υποσυστήματα. Αρχικά υλοποιήθηκε ο χρονισμένος έλεγχος της ηλεκτροβάνας και αργότερα προστέθηκε ανεξάρτητη μονάδα για ένδειξη ποσότητας νερού και θερμοκρασίας. Η αρχική πλακέτα έμεινε χωρίς τροποποίηση και η λειτουργία μέτρησης προστέθηκε ως ξεχωριστό υποσύστημα.

Οι δύο μονάδες παρουσιάζονται με βάση την τελική μορφή της κατασκευής. Η κύρια πλακέτα PIC ελέγχει την ηλεκτροβάνα, ενώ η ανεξάρτητη μονάδα ESP32 μετρά τα φυσικά μεγέθη. Η πιθανή ενοποίησή τους εξετάζεται μόνο ως μελλοντική επέκταση.

1.1 Τεχνολογικό πλαίσιο αυτοματισμού και ηλεκτρονικού ελέγχου

Ο χρονισμένος έλεγχος ενός ενεργοποιητή είναι μια συνηθισμένη εφαρμογή ενσωματωμένου συστήματος. Ο μικροελεγκτής δέχεται εντολές από τον χρήστη, εκτελεί τη λογική του προγράμματος και οδηγεί το φορτίο με προβλέψιμο τρόπο. Στον έλεγχο παροχής νερού, ο συνδυασμός ηλεκτροβάνας, χρονισμού, τοπικής διεπαφής και αισθητήρων αυτοματοποιεί μια διαδικασία που διαφορετικά θα γινόταν χειροκίνητα. Για σωστή λειτουργία απαιτούνται σαφής διαχωρισμός λογικής και ισχύος, σωστή οδήγηση φορτίων και επαρκής προστασία των ηλεκτρονικών βαθμίδων [22], [23].

Στην κατασκευή ο PIC16F1825 είναι ο βασικός ελεγκτής χρονισμού. Διαβάζει τις αναλογικές στάθμες των τεσσάρων πλήκτρων, εκτελεί τον χρονισμό, ενημερώνει τη γραφική LCD και αλλάζει την κατάσταση του ρελέ. Πρόκειται για μια απλή εφαρμογή embedded control, όπου ο μικροελεγκτής εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες μέσα στον χρονοδιακόπτη εκχύλισης. Η λύση αυτή είναι κατάλληλη όταν ζητούνται χαμηλό κόστος, μικρές διαστάσεις και σταθερή συμπεριφορά.

Σε ένα σύστημα ελεγχόμενης εκχύλισης ή δοσομέτρησης νερού, ο χρόνος που μένει ανοικτή η ηλεκτροβάνα είναι ένας απλός τρόπος ρύθμισης της ποσότητας, εφόσον η παροχή παραμένει σχετικά σταθερή. Ο χρήστης ορίζει τη διάρκεια λειτουργίας και ο ηλεκτρονικός χρονισμός διακόπτει αυτόματα τη ροή στο τέλος του κύκλου. Η λύση είναι οικονομική και εύκολη στην υλοποίηση, αλλά δεν λαμβάνει από μόνη της υπόψη μεταβολές στην πίεση ή στην παροχή. Για αυτό προστέθηκε και ανεξάρτητη μέτρηση ροής.

Ο μικροελεγκτής είναι κατάλληλος για τον χρονισμό, επειδή μπορεί να χρησιμοποιεί hardware timers ενώ το λογισμικό ενημερώνει παράλληλα την οθόνη και τις ενδείξεις. Σε σχέση με έναν απλό μηχανικό χρονοδιακόπτη, οι παράμετροι αλλάζουν πιο εύκολα και μπορούν να προστεθούν νέες λειτουργίες στο firmware. Στο κύκλωμα η ηλεκτροβάνα δεν οδηγείται απευθείας από τον PIC, αλλά μέσω τρανζίστορ και ρελέ. Ο διαχωρισμός λογικής και ισχύος είναι βασική αρχή σχεδίασης ηλεκτρονικών συστημάτων [22], [23].

Στόχος της εργασίας δεν είναι η δικτύωση της συσκευής, αλλά η αξιόπιστη και επαναλαμβανόμενη αυτοματοποίηση της εκχύλισης νερού. Οι βασικές λειτουργίες είναι ο χρονισμός της ηλεκτροβάνας, η τοπική ρύθμιση, η απεικόνιση της κατάστασης, η μέτρηση ροής και θερμοκρασίας και η διατήρηση του συνολικού όγκου. Έτσι το πρωτότυπο δεν λειτουργεί απλώς ως διακόπτης ON/OFF, αλλά ως embedded σύστημα που εκτελεί έναν προκαθορισμένο κύκλο και ταυτόχρονα δίνει πληροφορίες για τη φυσική διαδικασία.

Η αρχική πλακέτα PIC16F1825 έχει σχεδιαστεί για τον έλεγχο του ρελέ, της ηλεκτροβάνας και της γραφικής LCD. Το νεότερο υποσύστημα ESP32 λειτουργεί ανεξάρτητα ως μονάδα μέτρησης, με διαφορετικές ανάγκες σε interrupts, 1-Wire, αποθήκευση Flash και απεικόνιση. Αυτός ο διαχωρισμός

επιτρέπει να δοκιμάζονται χωριστά οι δύο μονάδες. Για να ενωθούν σε μία κοινή λειτουργία θα χρειαστεί νέα σχεδίαση hardware και firmware.

1.2 Πρόβλημα, κίνητρο και στόχοι της εργασίας

Το βασικό τεχνικό πρόβλημα είναι να μετατρέπεται με αξιόπιστο τρόπο η επιλογή του χρήστη σε χρονισμένη λειτουργία της ηλεκτροβάνας. Ο μικροελεγκτής λειτουργεί στα 3,3 V, ενώ στην πλακέτα υπάρχει γραμμή περίπου 13,5 V και ταυτόχρονα γίνεται μεταγωγή της φάσης 230 V AC μέσω των επαφών του ρελέ. Άρα η σχεδίαση πρέπει να διαχειριστεί διαφορετικά επίπεδα τάσης, θόρυβο από επαγωγικό φορτίο, θερμικές απώλειες και τον περιορισμένο αριθμό ακροδεκτών του PIC.

Η διεπαφή πρέπει επίσης να παραμένει απλή, παρότι οι διαθέσιμοι ακροδέκτες είναι λίγοι. Τα τέσσερα πλήκτρα κωδικοποιούνται σε δύο αναλογικές εισόδους, ενώ η LCD χρησιμοποιεί αρκετές γραμμές επικοινωνίας και δύο ακροδέκτες μοιράζονται λειτουργίες με το ICSP. Για αυτό χρειάζεται προσεκτική κατανομή I/O, ασφαλής διασύνδεση και ορισμένοι τεχνικοί συμβιβασμοί.

Κύριος σκοπός είναι η μελέτη και η υλοποίηση ενός αυτόματου ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη που επιτρέπει στον χρήστη να ρυθμίζει και να εκτελεί χρονισμένη λειτουργία της ηλεκτροβάνας νερού. Παράλληλα μετρώνται η θερμοκρασία, η στιγμιαία παροχή και ο συνολικός όγκος. Η τεχνική ανάλυση ακολουθεί όλη τη διαδρομή, από την τροφοδοσία και την είσοδο του χρήστη μέχρι την απόφαση του firmware και την ενεργοποίηση του φορτίου.

Οι επιμέρους στόχοι είναι η ανάλυση της τροφοδοσίας 230/9 V και της γραμμής DC, η αιτιολόγηση της χρήσης των 78L33A και LM317L, η παρουσίαση του οδηγού ρελέ με BC847B και LL4148, η μελέτη των ακροδεκτών του PIC16F1825, η λειτουργία της LCD 128×64 και η αναλογική κωδικοποίηση των πλήκτρων. Εξετάζονται επίσης η διαδικασία ICSP και το PCB μέσα από τα κατασκευαστικά layers της πρωτότυπης πλακέτας. Τέλος, καταγράφονται τα σημεία που χρειάζονται έλεγχο ή βελτίωση σε επόμενη έκδοση.

Το αρχικό πρόβλημα είναι ο αξιόπιστος έλεγχος της ποσότητας νερού που περνά από την έξοδο εκχύλισης. Ο χρονικός έλεγχος της ηλεκτροβάνας είναι απλή και οικονομική λύση, αλλά προϋποθέτει σχετικά σταθερή παροχή. Με την προσθήκη flowmeter μπορεί να μετρηθεί η πραγματική ροή και να συγκριθεί με τον θεωρητικό χρονισμό. Η μέτρηση θερμοκρασίας προσθέτει μία ακόμη χρήσιμη πληροφορία για τον χειριστή και για μελλοντικούς ελέγχους λειτουργίας.

Οι στόχοι χωρίστηκαν σε τρία επίπεδα. Πρώτον, η βασική πλακέτα πρέπει να ελέγχει σωστά και επαναλαμβανόμενα την ηλεκτροβάνα. Δεύτερον, η ανεξάρτητη μονάδα μέτρησης πρέπει να δίνει κατανοητές τιμές και να διατηρεί τον συνολικό όγκο μετά από διακοπή τροφοδοσίας. Τρίτον, η κατασκευή πρέπει να τεκμηριώνεται σε επίπεδο schematic, PCB, firmware, υπολογισμών και μηχανικών αρχείων, ώστε να είναι ξεκάθαρη η λειτουργία της και τα σημεία που χρειάζονται προσοχή.

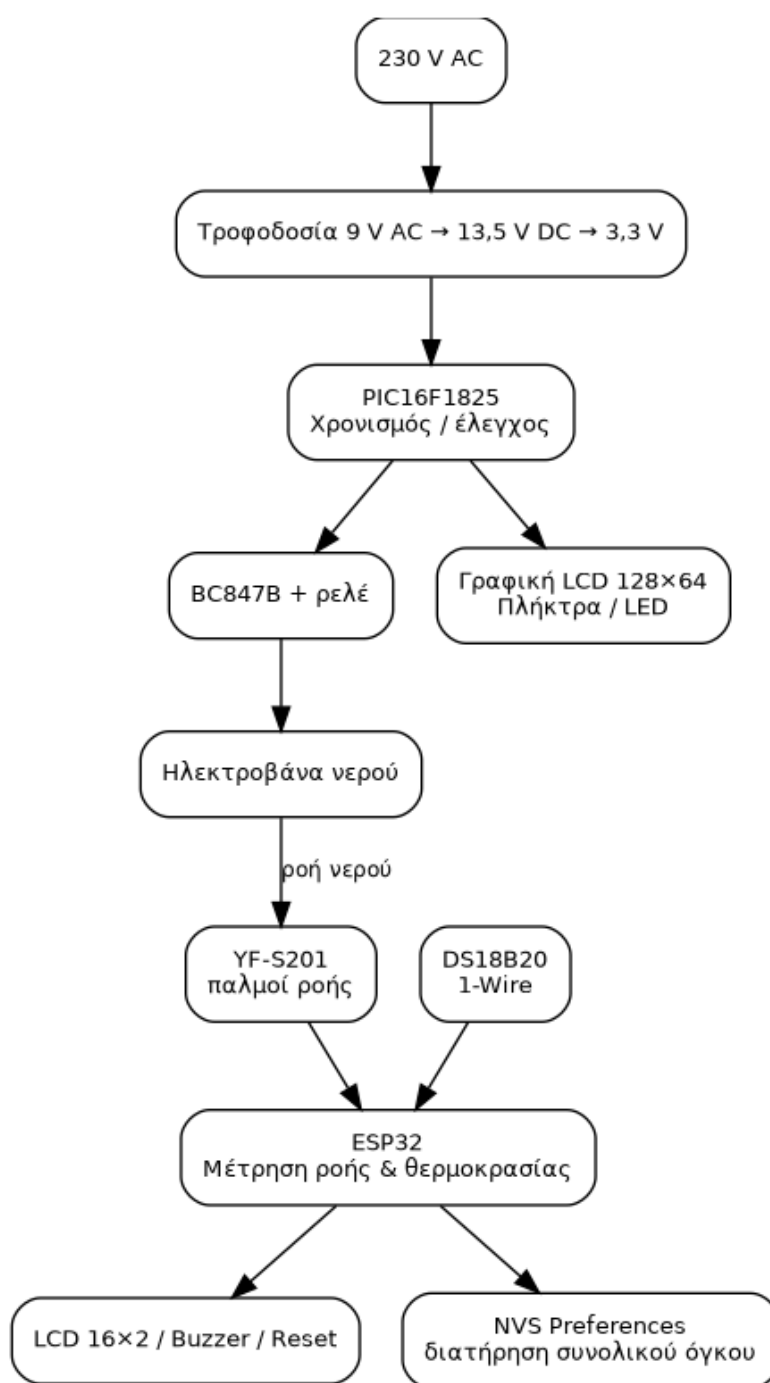
1.3 Λειτουργικές απαιτήσεις και συνολική αρχιτεκτονική

Οι λειτουργικές απαιτήσεις προκύπτουν από το κύκλωμα και τον τρόπο χρήσης του. Το σύστημα πρέπει να ξεκινά σε γνωστή κατάσταση, να εμφανίζει πληροφορίες στην LCD, να αναγνωρίζει τα πλήκτρα UP, DOWN, 1 και 2, να διαχειρίζεται τους επιλεγμένους χρόνους και να ελέγχει το ρελέ χωρίς να υπερφορτώνει τις εξόδους του PIC. Οι ενδείξεις UP/DOWN πρέπει να οδηγούνται χωρίς να επιβαρύνουν άμεσα τον μικροελεγκτή.

Στις μη λειτουργικές απαιτήσεις περιλαμβάνονται η ηλεκτρική απομόνωση της λογικής από το δίκτυο, η σταθερή τροφοδοσία 3,3 V, η προστασία από την επαγωγική αιχμή του πηνίου του ρελέ, η αποσύζευξη των ψηφιακών κυκλωμάτων και ο προγραμματισμός πάνω στην πλακέτα. Επειδή οι επαφές του ρελέ μεταφέρουν τάση δικτύου, η διάταξη του PCB και οι αποστάσεις ανάμεσα στις περιοχές χαμηλής και υψηλής τάσης επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια και δεν είναι απλώς θέμα εμφάνισης [19]-[21].

- Η βασική πλακέτα πρέπει να λειτουργεί από το δίκτυο με γαλβανική απομόνωση της χαμηλής τάσης, να παράγει 3,3 V για τη λογική και να οδηγεί με ασφάλεια το ρελέ.
- Ο PIC16F1825 πρέπει να διαβάζει τα πλήκτρα, να χειρίζεται χρονισμό, LCD και ενδείξεις και να υποστηρίζει προγραμματισμό ICSP χωρίς αφαίρεση από το PCB.
- Το ESP32 πρέπει να μετρά παλμούς ροής χωρίς απώλειες, να διαβάζει τον DS18B20, να ενημερώνει LCD 16×2 και να αποθηκεύει τον συνολικό όγκο σε NVS.
- Η διεπαφή χρήστη πρέπει να παραμένει τοπική και λειτουργική ακόμη και χωρίς σύνδεση δικτύου. Σε αυτή την έκδοση δεν υλοποιείται Wi-Fi έλεγχος, παρότι το ESP32 έχει αντίστοιχη δυνατότητα [27].
- Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί πρέπει να παρουσιάζονται μαζί με τους περιορισμούς τους και να μην χρησιμοποιούνται ως εργαστηριακή πιστοποίηση ακριβείας.

Συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος εκχύλισης νερού



Εικόνα 1.1: Συνολική λειτουργική αρχιτεκτονική των δύο υποσυστημάτων της κατασκευής.

Η Εικόνα 1.1 δείχνει τον διαχωρισμό της κατασκευής σε έλεγχο ενεργοποιητή και μέτρηση φυσικών μεγεθών. Η σχέση των δύο υποσυστημάτων είναι κυρίως λειτουργική: η ηλεκτροβάννα ανοίγει ή διακόπτει τη ροή και ο YF-S201 μετρά το αποτέλεσμα. Σε μελλοντική έκδοση αυτή η πληροφορία θα μπορούσε να επιστρέφει στον κύριο ελεγκτή ώστε να δημιουργηθεί κλειστός βρόχος δοσομέτρησης. Η λειτουργία αυτή δεν υπάρχει στο σημερινό firmware και αναφέρεται μόνο ως πιθανή επέκταση.

1.4 Μεθοδολογία, πεδίο εφαρμογής και περιορισμοί

Η εργασία εστιάζει στον αυτόματο ηλεκτρονικό χρονισμό της ηλεκτροβάνας και στη μέτρηση ροής, όγκου και θερμοκρασίας. Δεν εξετάζει πλήρως τη θερμοδυναμική ή τη μηχανολογική πλευρά ενός συστήματος θέρμανσης, αντλίας ή ολόκληρης υδραυλικής εγκατάστασης. Η τεκμηρίωση αφορά την ίδια την κατασκευή του ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη και της μονάδας μέτρησης, μαζί με τα σημεία σύνδεσής τους στη διαδρομή νερού. Τα υπόλοιπα μηχανικά ή θερμικά υποσυστήματα αναφέρονται μόνο ως πιθανό περιβάλλον εφαρμογής και δεν αποτελούν μέρος της υλοποίησης που εξετάζεται.

Η εργασία περιλαμβάνει τον πλήρη πηγαίο κώδικα C της πλακέτας PIC16F1825 στο Παράρτημα Δ. Με αυτόν τον κώδικα μπορούν να ελεγχθούν η αρχικοποίηση του μικροελεγκτή, τα configuration bits, η ανάγνωση των πλήκτρων μέσω ADC, οι προκαθορισμένοι χρόνοι μονής και διπλής δόσης, ο χρονισμός μέσω Timer2, η οδήγηση του ρελέ και η ενημέρωση της γραφικής LCD.

Η μεθοδολογία βασίζεται στην ανάλυση του schematic, στη μελέτη των datasheets, στον έλεγχο βασικών υπολογισμών και στην εξέταση των αρχείων PCB. Το κύκλωμα χωρίζεται πρώτα σε λειτουργικές βαθμίδες: είσοδος δικτύου και μετασχηματισμός, ανόρθωση και εξομάλυνση, τροφοδοσία λογικής, τροφοδοσία backlight, μικροελεγκτής, διεπαφή, οδηγοί LED και ρελέ. Στη συνέχεια εξετάζεται ο ρόλος κάθε βαθμίδας μέσα στο σύστημα.

Για τα βασικά εξαρτήματα γίνεται έλεγχος με τα αντίστοιχα τεχνικά φυλλάδια: PIC16F1825 [1], 78L33A [5], LM317L [6], BC847B [7], LL4148 [8], μετασχηματιστής MYRRA 44158 [9] και ρελέ G2RL-1A-E [10]. Ο έλεγχος δεν μένει μόνο στο αν λειτουργεί το κύκλωμα, αλλά εξετάζει τα περιθώρια τάσης, τη θερμική φόρτιση, την κυμάτωση, τα ρεύματα LED και τη συμπεριφορά σε reset. Η ίδια προσέγγιση χρησιμοποιείται και για το PCB, όπου τα screenshots των layers αποτελούν άμεσο υλικό ελέγχου της σχεδίασης.

Η ανάλυση έγινε σταδιακά πάνω στην πραγματική κατασκευή. Αρχικά μελετήθηκαν τα schematics και τα datasheets των εξαρτημάτων, ώστε να καθοριστεί ο ρόλος κάθε βαθμίδας. Στη συνέχεια ελέγχθηκαν οι υπολογισμοί τροφοδοσίας, ρευμάτων και διαιρετών τάσης. Για την πλακέτα PIC16F1825 εξετάστηκε ο πλήρης κώδικας C/XC8 και αντιστοιχίστηκαν τα I/O, ο ADC, ο Timer2, ο έλεγχος του ρελέ και η LCD με το schematic. Για το υποσύστημα ESP32 εξετάστηκε γραμμή προς γραμμή το αρχείο ESP_FLOW_TEMP.ino και συγκρίθηκε με το αντίστοιχο schematic. Τέλος, τα STL του flowmeter ελέγχθηκαν ως τρισδιάστατα meshes ως προς τις διαστάσεις και τη γεωμετρία τους, χωρίς να τους αποδίδονται χαρακτηριστικά που δεν προκύπτουν από τη σχεδίαση.

1.5 Συνεισφορά και δομή της εργασίας

Η τεχνική συνεισφορά της εργασίας βρίσκεται στη σχεδίαση, την υλοποίηση και την τεκμηρίωση ενός πρωτότυπου αυτόματου ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη εκχύλισης νερού με μέτρηση θερμοκρασίας και όγκου, σε επίπεδο ηλεκτρονικών, firmware, PCB και μηχανικών αρχείων. Σημαντικό σημείο είναι η συνεργασία βαθμίδων που συχνά εξετάζονται χωριστά. Για παράδειγμα, η μη σταθεροποιημένη γραμμή τροφοδοσίας επηρεάζει τα LED, τον γραμμικό ρυθμιστή 3,3 V και το διαθέσιμο περιθώριο του LM317L. Έτσι η τεκμηρίωση δεν δείχνει μόνο το τελικό κύκλωμα, αλλά και τις βασικές τεχνικές σχέσεις μεταξύ των υποσυστημάτων.

Καταγράφονται επίσης σημεία της σχεδίασης που χρειάζονται νέο έλεγχο: μεγαλύτερη ονομαστική τάση στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές, έλεγχος του ρεύματος των λευκών LED, θερμικός έλεγχος του 78L33A και επιβεβαίωση της ασφαλούς κατάστασης της ηλεκτροβάνας. Τα σημεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για επανασχεδιασμό και βελτίωση της αξιοπιστίας.

Μετά την εισαγωγή ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση τεχνολογιών και συναφών συστημάτων ελεγχόμενης παροχής υγρών. Εξετάζονται ο χρονικός έλεγχος ηλεκτροβανών, η μέτρηση παροχής και όγκου, η μέτρηση θερμοκρασίας και η τοπική διεπαφή χρήστη. Επίσης παρουσιάζονται παραδείγματα από αυτοματοποιημένα συστήματα διανομής ροφημάτων, επειδή χρησιμοποιούν παρόμοιες αρχές αισθητήρων, ενεργοποιητών και διάγνωσης. Στόχος είναι να φανούν οι χρήσιμες αρχιτεκτονικές επιλογές και οι διαφορές της συγκεκριμένης κατασκευής.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει το υλικό και τις τεχνολογίες της κατασκευής: τροφοδοσία, ρυθμιστές, ρελέ, τρανζίστορ, PIC16F1825, γραφική LCD, πλήκτρα και ICSP, καθώς και το υποσύστημα ESP32 με YF-S201, DS18B20, LCD 16×2, buzzer και μη πτητική μνήμη NVS. Παρουσιάζονται ακόμη τα fabrication layers του PCB και τα τρισδιάστατα αρχεία του flowmeter. Το τέταρτο κεφάλαιο είναι το πρακτικό μέρος και περιγράφει τη ροή λειτουργίας, το firmware του ESP32, τους υπολογισμούς, τα PCB layers, τις δοκιμές και τους περιορισμούς. Το πέμπτο κεφάλαιο συγκεντρώνει τα συμπεράσματα και τις προτάσεις βελτίωσης. Στο τέλος ακολουθούν η βιβλιογραφία και τα παραρτήματα με βασικά εξαρτήματα, αποσπάσματα κώδικα ESP32, schematics και μηχανικά αρχεία.

Η εργασία καταλήγει σε ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρομηχανικό πρωτότυπο που συνδυάζει τροφοδοτικά χαμηλής ισχύος, τρανζίστορ ως διακόπτες, προστασία επαγωγικών φορτίων, μικροελεγκτές, ADC, interrupts, σειριακά πρωτόκολλα, μη πτητική μνήμη, HMI, σχεδίαση PCB και τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Η τεχνική τεκμηρίωση του πρωτοτύπου επιτρέπει να ελεγχθούν οι επιλογές της σχεδίασης και να εντοπιστούν συγκεκριμένα σημεία για βελτίωση σε επόμενη έκδοση.

Για τον ορθογραφικό έλεγχο και τη βελτίωση της ροής του κειμένου χρησιμοποιήθηκε το ChatGPT ως βοηθητικό εργαλείο. Ο σχεδιασμός, η υλοποίηση, οι μετρήσεις και τα τεχνικά αποτελέσματα της εργασίας αποτελούν αποτέλεσμα της προσωπικής μου προσπάθειας.

Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Τεχνολογιών Ελεγχόμενης Ροής και Παρόμοιων Συστημάτων

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση εξετάζει τις τεχνολογίες που συνδέονται άμεσα με τον αυτόματο ηλεκτρονικό χρονοδιακόπτη εκχύλισης νερού: χρονικό έλεγχο ηλεκτροβάνας, μέτρηση παροχής και όγκου, μέτρηση θερμοκρασίας, τοπική διεπαφή χρήστη, αποθήκευση δεδομένων και τεχνική διάγνωση. Στόχος δεν είναι να συγκριθεί η κατασκευή με μία μόνο εμπορική συσκευή, αλλά να παρουσιαστούν οι βασικές τεχνικές λύσεις που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ελεγχόμενης διανομής υγρών.

Η ανασκόπηση συγκρίνει διαφορετικές αρχιτεκτονικές embedded ελέγχου. Εξετάζονται λύσεις ανοικτού βρόχου που βασίζονται στον χρόνο, λύσεις με αισθητήρες ροής για πραγματική δοσομέτρηση, ψηφιακοί αισθητήρες θερμοκρασίας και συστήματα όπου η δικτύωση ή η τηλεμετρία λειτουργούν συμπληρωματικά. Μέσα από αυτή τη σύγκριση φαίνεται η θέση της κατασκευής, η οποία συνδυάζει τοπικό χρονισμό της ηλεκτροβάνας με ανεξάρτητη μέτρηση ροής, όγκου και θερμοκρασίας.

Ένα ακόμη κριτήριο είναι το πόσο ανοιχτή είναι η σχεδίαση και η λειτουργία του συστήματος. Στις έτοιμες εμπορικές συσκευές ο χρήστης αξιοποιεί προκαθορισμένες λειτουργίες, ενώ εδώ το ενδιαφέρον βρίσκεται στη σχεδίαση των ηλεκτρονικών βαθμίδων, στην επεξεργασία των σημάτων, στο firmware, στο PCB και στη μηχανική ενσωμάτωση. Για αυτό η βιβλιογραφική σύγκριση χρησιμοποιείται κυρίως για να αιτιολογηθούν τεχνικές επιλογές και όχι για να κριθεί το πρωτότυπο ως εμπορικό προϊόν.

Η βιβλιογραφία χρησιμοποιείται επίσης για να ελεγχθούν οι προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης. Δείχνει ότι λειτουργίες όπως κλειστός βρόχος δοσομέτρησης, απομακρυσμένη εποπτεία και καταγραφή δεδομένων είναι τεχνικά εφικτές, αλλά απαιτούν νέο σχεδιασμό hardware και firmware. Έτσι οι προτάσεις του Κεφαλαίου 5 συνδέονται με πραγματικές ανάγκες της κατασκευής, όπως η βαθμονόμηση του YF-S201, η ασφαλής κατάσταση της ηλεκτροβάνας και η πιθανή χρήση του μετρούμενου όγκου ως ανάδραση.

2.1 Ενσωματωμένος έλεγχος σε συστήματα εκχύλισης και δοσομέτρησης νερού

Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα διαχείρισης νερού μπορεί να διαχωριστεί σε διακριτά λειτουργικά επίπεδα. Στο φυσικό επίπεδο βρίσκονται η ηλεκτροβάννα, οι σωληνώσεις και οι αισθητήρες. Στο επίπεδο ελέγχου βρίσκεται ο μικροελεγκτής, ο οποίος εκτελεί χρονοισμό, επεξεργάζεται εισόδους και δημιουργεί εντολές προς τους ενεργοποιητές. Η διεπαφή χρήστη παρέχει ρυθμίσεις και ενδείξεις, ενώ ένα προαιρετικό επίπεδο επικοινωνίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καταγραφή ή απομακρυσμένη εποπτεία [18]. Η διάκριση αυτή είναι χρήσιμη επειδή επιτρέπει να αξιολογείται κάθε λειτουργία ανεξάρτητα.

Η κατασκευή καλύπτει κυρίως το φυσικό επίπεδο, τον τοπικό έλεγχο και τη διεπαφή χρήστη. Η ηλεκτροβάννα ενεργοποιείται μέσω ρελέ, ο PIC16F1825 εκτελεί τον χρονοισμό και η γραφική LCD με τα πλήκτρα είναι το βασικό HMI. Επίσης, το ανεξάρτητο υποσύστημα ESP32 προσθέτει αισθητηριακή παρακολούθηση μέσω YF-S201 και DS18B20. Δεν υλοποιείται δικτυακό επίπεδο στην τρέχουσα έκδοση, παρότι το ESP32 έχει ενσωματωμένες δυνατότητες Wi-Fi και Bluetooth [27].

Σε τέτοιες εφαρμογές ο τοπικός έλεγχος έχει προτεραιότητα επειδή η λειτουργία του ενεργοποιητή δεν πρέπει να εξαρτάται από σύνδεση δικτύου. Η ασφαλής κατάσταση σε reset, η προστασία του driver, η σταθερή τροφοδοσία και η σωστή αποκωδικοποίηση των εντολών του χρήστη είναι πιο θεμελιώδη ζητήματα από την απομακρυσμένη πρόσβαση. Η εργασία ακολουθεί αυτή τη λογική και αξιολογεί πρώτα την ποιότητα της φυσικής λειτουργίας και των μετρήσεων.

Τεχνικά, η δοσομέτρηση νερού μπορεί να υλοποιηθεί με ανοικτό βρόχο, χρησιμοποιώντας μόνο τον χρόνο ενεργοποίησης, ή με κλειστό βρόχο, χρησιμοποιώντας αισθητήρα ροής ή όγκου ως ανάδραση. Η πρώτη προσέγγιση είναι απλούστερη και επαρκεί όταν η παροχή είναι σταθερή. Η δεύτερη είναι ακριβέστερη όταν οι υδραυλικές συνθήκες μεταβάλλονται, επειδή η εντολή τερματισμού μπορεί να βασιστεί στον πραγματικά μετρημένο όγκο. Το πρωτότυπο περιλαμβάνει τα επιμέρους στοιχεία και των δύο προσεγγίσεων, χωρίς όμως να τα έχει ακόμη ενώσει σε κλειστό βρόχο.

2.2 Χρονικός έλεγχος ηλεκτροβάνας και δοσομέτρηση

Η ηλεκτροβάνα είναι το βασικό στοιχείο ενεργοποίησης της ροής. Επειδή το πηνίο του ρελέ απαιτεί μεγαλύτερο ρεύμα από αυτό που μπορεί να παρέχει ένας ακροδέκτης μικροελεγκτή, η εντολή του PIC μεταφέρεται μέσω βαθμίδας οδήγησης με NPN τρανζίστορ. Η χρήση ξεχωριστού driver προστατεύει τη λογική και επιτρέπει στο ρελέ να μεταγάγει το φορτίο με σαφή ηλεκτρικό διαχωρισμό. Η δίοδος flyback περιορίζει την επαγωγική αιχμή του πηνίου όταν το ρελέ απενεργοποιείται [7], [8].

Ο χρονικός έλεγχος είναι κατάλληλος για μικροελεγκτή επειδή μπορεί να εκτελείται επαναλαμβανόμενα και να μεταβάλλεται από το firmware χωρίς αλλαγή του κυκλώματος. Στην παρούσα πλακέτα ο χρήστης επιλέγει παραμέτρους από φυσικά πλήκτρα και παρακολουθεί την κατάσταση στη γραφική LCD. Η λογική αυτή επιτρέπει τοπική λειτουργία και δεν απαιτεί εξωτερική εφαρμογή ή σύνδεση δικτύου.

Η αδυναμία του αποκλειστικά χρονικού ελέγχου είναι ότι ο χρόνος δεν ταυτίζεται πάντα με τον όγκο. Αν η παροχή αλλάξει λόγω πίεσης, αντίστασης στη σωλήνωση ή μεταβολής των υδραυλικών συνθηκών, ο ίδιος χρόνος ανοίγματος μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική ποσότητα νερού. Για αυτό η μέτρηση ροής έχει συμπληρωματικό ρόλο και βοηθά να ελεγχθεί στην πράξη αν ο χρονισμός παραμένει επαναλήψιμος.

Η επιλογή μηχανικού ρελέ προσφέρει ηλεκτρικό διαχωρισμό μεταξύ της χαμηλής τάσης ελέγχου και του κυκλώματος του φορτίου, όμως συνοδεύεται από μηχανική φθορά, χρόνο μεταγωγής και ανάγκη σωστής προστασίας του πηνίου. Ο PIC δεν τροφοδοτεί απευθείας το πηνίο. Το BC847B αναλαμβάνει τη μεταγωγή και η LL4148 τη διαχείριση της επαγωγικής αιχμής, σύμφωνα με τη βασική πρακτική οδήγησης επαγωγικών φορτίων [7], [8], [22], [23].

Αυτή η αρχιτεκτονική επιλέχθηκε επειδή είναι εύκολη στην κατανόηση, στη μέτρηση και στη διάγνωση. Ο χειριστής μπορεί να επαληθεύσει την επιλογή χρόνου από την οθόνη, ο τεχνικός μπορεί να μετρήσει την κατάσταση του relay driver και ο προγραμματιστής μπορεί να αλλάξει τον αλγόριθμο χρονισμού χωρίς να τροποποιήσει το βασικό power stage. Αυτή η σαφής διαίρεση μεταξύ λογικής και ενεργοποιητή είναι βασικό χαρακτηριστικό της παρούσας κατασκευής.

2.3 Μέτρηση παροχής και όγκου με αισθητήρα Hall

Για την άμεση παρακολούθηση της ροής χρησιμοποιείται ο YF-S201. Ο αισθητήρας περιλαμβάνει πτερωτή και στοιχείο Hall και παράγει παλμούς με συχνότητα που συσχετίζεται με την παροχή. Η έξοδος χρησιμοποιείται ως ψηφιακό σήμα και στο ESP32 συνδέεται σε είσοδο που εξυπηρετεί interrupt, ώστε οι παλμοί να καταμετρώνται ακόμη και όταν ο κύριος βρόχος εκτελεί άλλες λειτουργίες [31].

Η χρήση παλμών είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για υπολογισμό όγκου, επειδή το πλήθος τους μπορεί να ολοκληρωθεί στον χρόνο. Στο firmware χρησιμοποιείται calibration factor 7,5, σύμφωνα με την αρχική σχέση που συνοδεύει τον συγκεκριμένο τύπο αισθητήρα, ώστε η συχνότητα να μετατρέπεται σε L/min [31]. Η σχέση αυτή αποτελεί αρχική βαθμονόμηση και όχι πιστοποιημένη καμπύλη για κάθε μεμονωμένο αισθητήρα.

Από τη στιγμιαία παροχή υπολογίζεται ο συνολικός όγκος. Για μεγαλύτερη ακρίβεια σε επόμενη έκδοση, η ολοκλήρωση μπορεί να χρησιμοποιεί τον πραγματικό χρόνο Δt κάθε κύκλου, ώστε καθυστερήσεις του firmware να μην θεωρούνται υποχρεωτικά ίσες με ένα δευτερόλεπτο. Επίσης, η πρακτική βαθμονόμηση με γνωστό όγκο νερού θα επιτρέψει να προσαρμοστεί ο συντελεστής του YF-S201 στη συγκεκριμένη υδραυλική εγκατάσταση.

Η μέτρηση ροής εκτελείται σε ανεξάρτητη μονάδα ESP32 και δεν χρησιμοποιείται ακόμη για να κλείσει την ηλεκτροβάννα. Η επιλογή αυτή διατηρεί σαφή τον διαχωρισμό μεταξύ actuation και sensing. Στην τρέχουσα έκδοση ο PIC εκτελεί τον χρονισμό και το ESP32 παρατηρεί το αποτέλεσμα. Μελλοντικά οι δύο λειτουργίες μπορούν να ενοποιηθούν ή να επικοινωνούν, ώστε να δημιουργηθεί κλειστός βρόχος δοσομέτρησης βάσει πραγματικού όγκου.

Η προσθήκη του flowmeter μετατρέπει το σύστημα από απλό χρονοδιακόπτη σε διάταξη που μπορεί να συγκρίνει την εντολή με το φυσικό αποτέλεσμα. Ακόμη και χωρίς κλειστό βρόχο, η ένδειξη παροχής και συνολικού όγκου είναι χρήσιμη για δοκιμές, βαθμονόμηση και εντοπισμό αποκλίσεων. Αν η ηλεκτροβάννα ενεργοποιηθεί αλλά ο YF-S201 δεν παράγει παλμούς, δημιουργείται τουλάχιστον μία σαφής ένδειξη ότι η αναμενόμενη ροή δεν γίνεται.

2.4 Μέτρηση θερμοκρασίας και τοπική διεπαφή

Η θερμοκρασία μετράται με τον ψηφιακό αισθητήρα DS18B20, ο οποίος χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 1-Wire και μπορεί να λειτουργήσει με ανάλυση έως 12 bit [28]. Η επιλογή ψηφιακού αισθητήρα μειώνει την ανάγκη για αναλογική ενίσχυση και ADC στο ESP32, ενώ η μοναδική γραμμή δεδομένων περιορίζει την καλωδίωση προς τον αισθητήρα.

Σε αυτή την έκδοση η θερμοκρασία αποτελεί πληροφορία παρακολούθησης και δεν χρησιμοποιείται ως συνθήκη ενεργοποίησης ή διακοπής της ηλεκτροβάνας. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική: το σύστημα μετρά τη θερμοκρασία, αλλά δεν υλοποιεί θερμοστατικό έλεγχο. Σε επόμενη έκδοση η τιμή θα μπορούσε να συνδυαστεί με τη ροή και τον επιθυμητό όγκο για πιο σύνθετη λογική λειτουργίας.

Η τοπική διεπαφή του ESP32 βασίζεται σε LCD 16×2, πλήκτρο και buzzer. Η LCD εμφανίζει τις μετρήσεις χωρίς ανάγκη υπολογιστή ή smartphone, ενώ το πλήκτρο χρησιμοποιείται για εναλλαγή οθόνης και για reset του συνολικού όγκου μέσω παρατεταμένου πατήματος. Το buzzer παρέχει απλή ηχητική επιβεβαίωση χειρισμού. Η επιλογή αυτή διατηρεί το υποσύστημα πλήρως λειτουργικό ως αυτόνομη μονάδα μέτρησης [32].

Για τη διατήρηση του συνολικού όγκου χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη Preferences του ESP32, η οποία αποθηκεύει δεδομένα στη μη πτητική μνήμη NVS [29]. Έτσι μία διακοπή τροφοδοσίας δεν μηδενίζει υποχρεωτικά το ιστορικό μέτρησης. Η συχνότητα εγγραφών πρέπει να επιλέγεται με ισορροπία ανάμεσα στην πιθανή απώλεια τελευταίων δεδομένων και στον αριθμό εγγραφών στη Flash.

Η αρχιτεκτονική παραμένει τοπική. Το ESP32 έχει δικτυακές δυνατότητες [27], αλλά το firmware της εργασίας δεν τις χρησιμοποιεί. Η επιλογή αυτή επιτρέπει ο έλεγχος να επικεντρωθεί στην ποιότητα των μετρήσεων, στη σταθερότητα του κώδικα και στη σωστή διασύνδεση των αισθητήρων πριν προστεθεί οποιαδήποτε απομακρυσμένη υπηρεσία.

Ο συνδυασμός flowmeter, θερμοκρασίας, LCD και μη πτητικής μνήμης δημιουργεί μία ανεξάρτητη μονάδα παρακολούθησης του υδραυλικού κύκλου. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο κατά τη χρήση όσο και κατά τις δοκιμές της κατασκευής. Η αξία τους δεν βρίσκεται μόνο στην εμφάνιση αριθμών, αλλά στη δυνατότητα να συγκριθεί ο επιλεγμένος χρόνος με τον πραγματικό όγκο και να εντοπιστούν μεταβολές στη συμπεριφορά της ροής.

2.5 Συναφείς εφαρμογές αυτοματοποιημένης διανομής υγρών και παρακολούθησης κατάστασης

Στη σχετική βιβλιογραφία υπάρχουν συστήματα διανομής ροφημάτων που συνδυάζουν αισθητήρες, ενεργοποιητές και ψηφιακή εποπτεία. Οι Kim κ.ά. παρουσίασαν σύστημα vending machine με sensor and actuator network και επικοινωνία Bluetooth [15], ενώ οι Pongswatd, Smerpitak και Therpmanee εξέτασαν την επέκταση vending machine με IoT αρχιτεκτονική και απομακρυσμένη παρακολούθηση [16]. Παρότι οι εργασίες αυτές έχουν διαφορετικό τελικό προϊόν, είναι χρήσιμες ως παραδείγματα ενοποίησης φυσικών μετρήσεων και ηλεκτρονικού ελέγχου.

Μία διαφορετική προσέγγιση παρουσιάζεται από τους Ishii κ.ά., οι οποίοι χρησιμοποίησαν κυματομορφές ηλεκτρικού ρεύματος για αναγνώριση ανωμαλιών σε μηχανή υγρού καφέ [17]. Η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται στην κατασκευή, όμως δείχνει ότι η παρακολούθηση ενός ηλεκτρομηχανικού συστήματος μπορεί να βασιστεί σε μετρήσιμα φυσικά μεγέθη και όχι μόνο στην κατάσταση ενός GPIO. Αντίστοιχα, στην εργασία η ροή και η θερμοκρασία μπορούν να λειτουργήσουν ως πρακτικοί δείκτες κατάστασης.

Ως δευτερεύοντα σημεία αναφοράς χρησιμοποιούνται εμπορικές και ερευνητικές εφαρμογές αυτοματοποιημένης διανομής υγρών και ροφημάτων [12]-[17]. Οι εφαρμογές αυτές δεν αποτελούν πρότυπο ούτε ταυτότητα της παρούσας ιδιοκατασκευής. Εξετάζονται αποκλειστικά επειδή χρησιμοποιούν συναφείς τεχνικές αρχές, όπως ενεργοποιητές, αισθητήρες, τοπική ένδειξη, τηλεμετρία και ανίχνευση κατάστασης. Η σύγκριση αξιοποιείται μόνο για να αναδειχθούν εναλλακτικές αρχιτεκτονικές και πιθανά βήματα εξέλιξης του αυτόματου ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη εκχύλισης νερού.

Η απομακρυσμένη λειτουργία δεν αποτελεί στόχο του παρόντος πρωτοτύπου. Για μία διάταξη που ελέγχει ροή νερού, μεγαλύτερη προτεραιότητα έχουν η προβλέψιμη κατάσταση της ηλεκτροβάνας, η πραγματική μέτρηση παροχής, η σωστή θερμοκρασιακή ένδειξη και η ηλεκτρική ασφάλεια. Η δικτύωση μπορεί να προστεθεί αργότερα μόνο εφόσον ο τοπικός κύκλος έχει ήδη ελεγχθεί και βαθμονομηθεί.

Οι σχετικές εφαρμογές της βιβλιογραφίας αναδεικνύουν κοινές σχεδιαστικές αρχές: παρακολούθηση αισθητήρων, διάγνωση πραγματικού φορτίου, διατήρηση τοπικής λειτουργίας και δυνατότητα καταγραφής δεδομένων. Στο συγκεκριμένο σύστημα εφαρμόζονται οι αρχές του τοπικού embedded control και του sensing χωρίς απαίτηση απομακρυσμένης λειτουργίας.

Από αυτή τη σύγκριση προκύπτει μία σαφής μελλοντική κατεύθυνση: η μέτρηση ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πραγματική ανάδραση προς τον έλεγχο της ηλεκτροβάνας, ενώ η θερμοκρασία μπορεί να λειτουργήσει ως πρόσθετη συνθήκη ή όριο λειτουργίας. Η μετάβαση αυτή θα αυξήσει την ακρίβεια της δοσομέτρησης χωρίς να απαιτεί απαραίτητα cloud ή απομακρυσμένη εφαρμογή. Άρα η

εξέλιξη της κατασκευής μπορεί να παραμείνει προσανατολισμένη στη φυσική διαδικασία της εκχύλισης νερού.

2.6 Συγκριτική αποτίμηση και σχεδιαστικές επιλογές

Η σύγκριση των σχετικών συστημάτων μπορεί να γίνει ως προς τέσσερα βασικά κριτήρια: τρόπο ενεργοποίησης της ροής, μέθοδο δοσομέτρησης, παρουσία αισθητήρων και βαθμό εξάρτησης από εξωτερικές υπηρεσίες. Ο χρονικός έλεγχος προσφέρει απλότητα, ενώ η μέτρηση παροχής επιτρέπει ακριβέστερη ανάδραση. Τα connected προϊόντα και τα ερευνητικά vending systems προσθέτουν δικτύωση και τηλεμετρία [12]-[18], όμως αυτά τα χαρακτηριστικά δεν είναι απαραίτητα για τη βασική λειτουργία του παρόντος πρωτοτύπου.

Η κατασκευή ανήκει στην κατηγορία του τοπικού προγραμματιζόμενου ελέγχου με ανεξάρτητη αισθητηριακή παρακολούθηση. Η κύρια πλακέτα PIC16F1825 εκτελεί τον χρονισμό και τον έλεγχο της ηλεκτροβάνας. Το υποσύστημα ESP32 με YF-S201 και DS18B20 μετρά ροή, όγκο και θερμοκρασία χωρίς άμεση ψηφιακή διασύνδεση με τον PIC σε αυτή την έκδοση. Η αρχιτεκτονική είναι αρθρωτή και επιτρέπει πειραματική εξέλιξη κάθε υποσυστήματος χωριστά.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ανεξαρτησία από εξωτερικές υπηρεσίες. Η επιλογή χρόνου γίνεται από φυσικά πλήκτρα, η κατάσταση εμφανίζεται στην LCD και η εντολή προς την ηλεκτροβάνα παράγεται τοπικά από τον PIC16F1825. Αντίστοιχα, οι μετρήσεις του ESP32 εμφανίζονται στην τοπική LCD και ο συνολικός όγκος αποθηκεύεται σε NVS. Η βασική λειτουργία άρα δεν εξαρτάται από Internet, εφαρμογή κινητού ή λογαριασμό χρήστη.

Τα schematics, το PCB, τα STL, το firmware, τα pinouts και οι φωτογραφίες επιτρέπουν κάθε λειτουργία να συσχετιστεί με συγκεκριμένο ηλεκτρονικό ή μηχανικό στοιχείο. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να ελεγχθούν οι επιμέρους βαθμίδες, να εντοπιστούν σχεδιαστικοί περιορισμοί και να τεκμηριωθούν μελλοντικές αλλαγές.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση φαίνεται ότι η αξιοπιστία του τοπικού κύκλου πρέπει να προηγείται των πρόσθετων λειτουργιών. Η LCD παρέχει άμεση πληροφόρηση, τα πλήκτρα επιτρέπουν ρύθμιση χωρίς εξωτερική συσκευή και ο PIC μπορεί να εκτελεί τον χρονισμό ανεξάρτητα από δίκτυο. Επίσης, το ESP32 μπορεί να παρακολουθεί τη φυσική ροή και τη θερμοκρασία χωρίς να μεταβάλλει τον βασικό έλεγχο.

Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός βοηθά να αναλυθούν ανεξάρτητα η μετάβαση από τα 230 V στη χαμηλή τάση, η οδήγηση ρελέ, η προστασία από flyback, η χρήση ADC, η καταμέτρηση παλμών με interrupt και η επικοινωνία 1-Wire. Σε επόμενη έκδοση, η δικτύωση μπορεί να προστεθεί χωρίς να αφαιρεθεί η τοπική διεπαφή, αφού προηγουμένως σταθεροποιηθούν οι βασικές λειτουργίες ελέγχου και μέτρησης.

Η επιλογή τοπικού ελέγχου επηρεάζει και την ιεράρχηση των απαιτήσεων. Πρώτη απαίτηση είναι η προβλέψιμη συμπεριφορά της ηλεκτροβάνας, δεύτερη η σαφής αλληλεπίδραση με τον χειριστή, τρίτη η αξιόπιστη μέτρηση ροής και θερμοκρασίας και τέταρτη η δυνατότητα συντήρησης ή

επαναπρογραμματισμού. Γι' αυτό η αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί μικροελεγκτές, φυσικά πλήκτρα, ανεξάρτητες LCD και σαφή σημεία προγραμματισμού. Ο τεχνικός μπορεί να ελέγξει βήμα προς βήμα τόσο τις γραμμές τροφοδοσίας όσο και τα σήματα των αισθητήρων.

Η βιβλιογραφία για αυτοματισμούς εκχύλισης και διανομής υγρών περιλαμβάνει embedded systems, αισθητήρες, ενεργοποιητές, διεπαφές χρήστη και, σε ορισμένες περιπτώσεις, τηλεμετρία [12]-[18]. Στην κατασκευή οι ίδιες βασικές τεχνολογίες εφαρμόζονται σε συγκεκριμένο τεχνικό πρόβλημα: χρονισμένη εκχύλιση νερού με παράλληλη μέτρηση ροής, όγκου και θερμοκρασίας.

Σε σχέση με πιο σύνθετες λύσεις, το σύστημα έχει περιορισμένο λειτουργικό εύρος και συγκεκριμένο τεχνικό στόχο. Ο έλεγχος επικεντρώνεται στην τροφοδοσία, στην οδήγηση της ηλεκτροβάνας, στη σχέση χρόνου και πραγματικής παροχής, στη μέτρηση θερμοκρασίας και στην τεχνική τεκμηρίωση του πρωτοτύπου. Πιθανές επεκτάσεις είναι η κλειστή δοσομέτρηση βάσει όγκου, η βαθμονόμηση αισθητήρων, η παρακολούθηση ρεύματος και η προαιρετική ασύρματη επικοινωνία.

Πίνακας 2.1: Συγκριτική εικόνα τεχνολογιών και σχετικών συστημάτων ελεγχόμενης ροής

Προσέγγιση / σύστημα	Έλεγχος ροής	Ανάδραση / μέτρηση	Δικτύωση	Κύρια έμφαση
Χρονικός έλεγχος ηλεκτροβάνας	Τοπικός, ανοικτού βρόχου	Έμμεση δοσομέτρηση μέσω χρόνου	Δεν απαιτείται	Απλότητα και επαναληψιμότητα
YF-S201 / Hall flow sensing [31]	Παρακολούθηση παλμών	Παροχή και υπολογισμός όγκου	Δεν απαιτείται	Πραγματική μέτρηση ροής
DS18B20 temperature sensing [28]	Παθητική μέτρηση	Θερμοκρασία 1-Wire	Δεν απαιτείται	Τοπική θερμοκρασιακή ένδειξη
Συναφή ερευνητικά συστήματα διανομής υγρών [15]-[17]	Αισθητήρες και ενεργοποιητές	Κατάσταση / διάγνωση	Bluetooth / IoT ανά περίπτωση	Αισθητήρες, ενεργοποιητές και τεχνική παρακολούθηση
Παρούσα εργασία	Χρονισμός PIC + ηλεκτροβάνα	Ροή, όγκος, θερμοκρασία	Δεν υλοποιείται	Ελεγχόμενη εκχύλιση και

		μέσω ESP32		μετρήσεις
--	--	------------	--	-----------

Η σύγκριση αναδεικνύει τη σημασία της τεχνικής διαφάνειας του πρωτοτύπου. Τα schematics, τα GPIO, οι αλγόριθμοι μέτρησης, τα PCB layers, τα STL και το firmware επιτρέπουν την αιτιολόγηση των σχεδιαστικών επιλογών και τον εντοπισμό αδυναμιών σε επίπεδο κυκλώματος, λογισμικού και μηχανικής ενσωμάτωσης.

Από τη βιβλιογραφική σύγκριση φαίνεται ότι η προσθήκη περισσότερων τεχνολογιών δεν είναι από μόνη της βελτίωση. Μια web εφαρμογή ή σύνδεση cloud θα αύξανε το λειτουργικό εύρος, αλλά δεν θα έλυνε το βασικό τεχνικό ζήτημα της αξιόπιστης δοσομέτρησης. Γι' αυτό η ανάπτυξη προχωρά από τα φυσικά μεγέθη προς το λογισμικό: πρώτα ελέγχεται η ηλεκτροβάννα, στη συνέχεια μετράται η πραγματική ροή και η θερμοκρασία και μόνο αφού σταθεροποιηθούν αυτές οι λειτουργίες έχει νόημα να εξεταστεί απομακρυσμένη πρόσβαση.

Επίσης, η σύγκριση με εμπορικά συστήματα δείχνει τη σημασία της τοπικής διεπαφής. Τόσο η κύρια πλακέτα PIC όσο και το υποσύστημα ESP32 μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς smartphone. Η γραφική LCD 128×64, η LCD 16×2, τα πλήκτρα και οι ενδεικτικές λυχνίες δίνουν άμεση πληροφόρηση στον χρήστη. Αυτό μειώνει τις εξαρτήσεις από εξωτερικές υπηρεσίες και διευκολύνει τη διάγνωση κατά την ανάπτυξη. Σε επόμενη έκδοση η δικτύωση μπορεί να προστεθεί ως επιπλέον επίπεδο και όχι ως προϋπόθεση για τη βασική λειτουργία.

Κεφάλαιο 3ο: Υλικό, Λογισμικό και Τεχνολογίες Υλοποίησης

Οι εικόνες των εξαρτημάτων που ακολουθούν προέρχονται από τα πραγματικά schematics και από φωτογραφίες της κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση γενικών εικόνων που μπορεί να παραπέμπουν σε διαφορετικά εξαρτήματα ή packages. Όπου χρησιμοποιείται ενδεικτική εικόνα, αυτό αναφέρεται καθαρά στη λεζάντα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα εξαρτήματα και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή. Η περιγραφή δεν μένει μόνο στα γενικά χαρακτηριστικά των datasheets, αλλά συνδέει κάθε εξάρτημα με τη θέση και τον ρόλο του στο κύκλωμα. Για να είναι πιο ξεκάθαρη η παρουσίαση, η πλακέτα PIC και το υποσύστημα ESP32 εξετάζονται χωριστά.

Παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία της κατασκευής και εξηγείται ο ρόλος τους στο πραγματικό κύκλωμα. Στόχος δεν είναι να παρατεθούν απλώς τα χαρακτηριστικά κάθε εξαρτήματος, αλλά να φανεί γιατί χρησιμοποιήθηκε και πώς επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος. Η ίδια λογική ακολουθείται για την τροφοδοσία, τον μικροελεγκτή, το ρελέ, την οθόνη, τα πλήκτρα και τις βαθμίδες οδήγησης.

Με την ίδια λογική εξετάζεται και το υποσύστημα ESP32. Ο YF-S201 λειτουργεί ως πηγή παλμών και χρειάζεται αξιόπιστη ψηφιακή είσοδο, ο DS18B20 επικοινωνεί μέσω 1-Wire με συγκεκριμένους χρονικούς περιορισμούς και η LCD 16×2 λειτουργεί ως απλή τοπική διεπαφή. Το ESP32 έχει περισσότερους πόρους από τον PIC και έτσι μπορεί να αναλάβει τις πρόσθετες λειτουργίες μέτρησης και αποθήκευσης.

Κάθε εξάρτημα εξετάζεται με βάση τον ρόλο που έχει στο κύκλωμα. Ο μετασχηματιστής, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για υποβιβασμό και απομόνωση, ο 78L33A για τη λογική τάση 3,3 V, ο LM317L για το ρεύμα του backlight, ο BC847B ως διακόπτης και η LL4148 για την προστασία από το flyback του πηνίου. Έτσι η περιγραφή συνδέεται άμεσα με το schematic και με τις πραγματικές συνδέσεις της πλακέτας.

Τα datasheets χρησιμοποιούνται για τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργία του κυκλώματος. Για τον PIC εξετάζονται οι εναλλακτικές λειτουργίες των pins και ο ADC, για τον 78L33A το ρεύμα και η θερμική συμπεριφορά, για το ρελέ το πηνίο και οι επαφές και για τους αισθητήρες οι ηλεκτρικές απαιτήσεις και η έξοδος δεδομένων. Η έμφαση παραμένει στα στοιχεία που χρειάζονται για να κατανοηθεί και να ελεγχθεί η συγκεκριμένη κατασκευή.

3.1 Συνολική αρχιτεκτονική υλικού

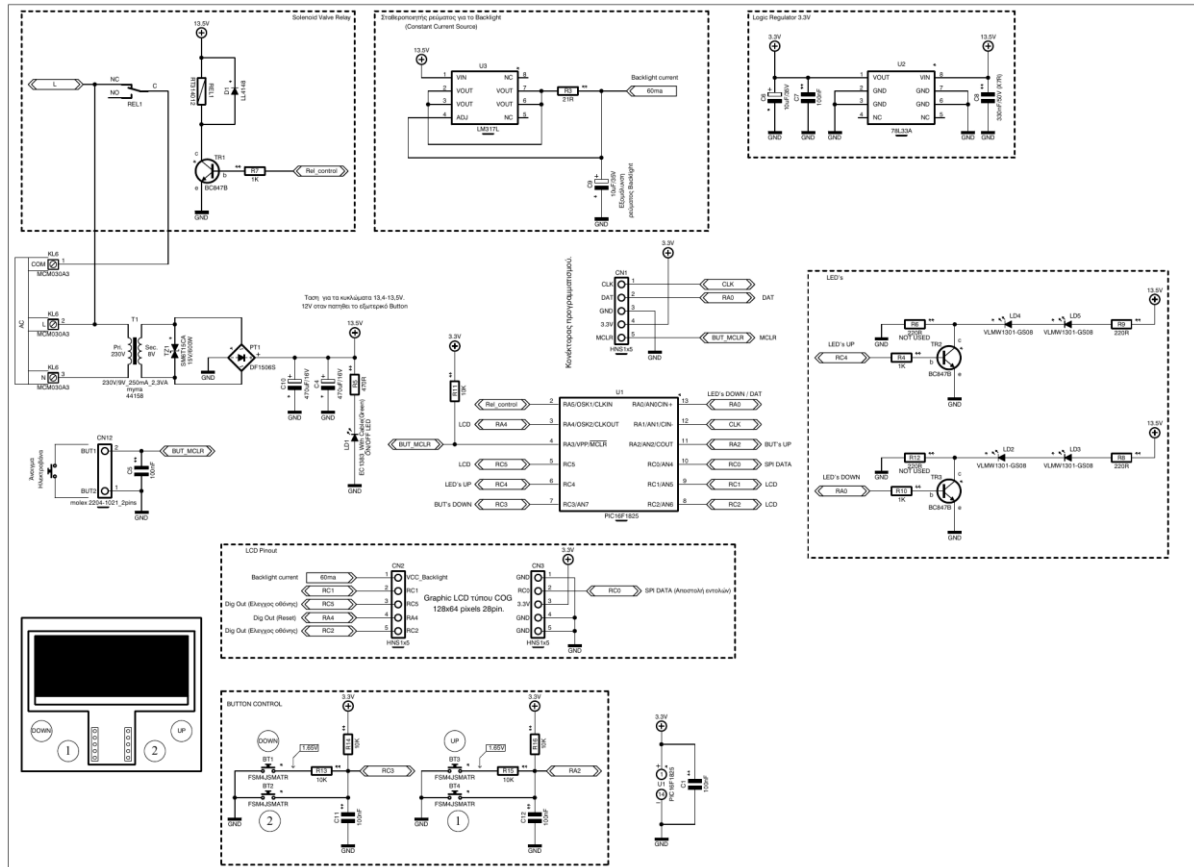
Η λειτουργική αρχιτεκτονική χωρίζεται σε τρεις βασικές διαδρομές. Η πρώτη είναι η διαδρομή ισχύος: 230 V AC, μετασχηματισμός, ανόρθωση, γραμμή 13,5 V, ρελέ και backlight. Η δεύτερη είναι η διαδρομή λογικής: 13,5 V προς 78L33A, 3,3 V προς PIC και LCD. Η τρίτη είναι η διαδρομή σημάτων: πλήκτρα προς ADC, σήματα ελέγχου προς LCD, LED και ρελέ.

Αυτός ο διαχωρισμός διευκολύνει τη διάγνωση. Αν η LCD δεν λειτουργεί, ελέγχεται πρώτα η 3,3 V και μετά οι γραμμές RC0/RC1/RC2/RC5/RA4. Αν το ρελέ δεν αλλάζει κατάσταση, εξετάζονται Rel_control, R7, TR1 και πηνίο. Η λογική των ανεξάρτητων βαθμίδων είναι σύμφωνη με τη συνήθη πρακτική σχεδίασης ενσωματωμένων συστημάτων [22], [23].

Η λειτουργική διάταξη της πλακέτας ελέγχου συνοψίζεται στις τρεις παραπάνω διαδρομές ισχύος, λογικής και σημάτων.

Η αρχική πλακέτα αποτελεί αυτόνομο controller ηλεκτροβάνας. Έχει δική της τροφοδοσία από το δίκτυο, PIC16F1825, ρελέ, LCD, πλήκτρα και LED. Το ESP32 module δεν τροφοδοτεί ή ελέγχει απευθείας αυτή την πλακέτα σύμφωνα με τα schematics της κατασκευής. Αντίθετα, δημιουργεί ξεχωριστή μονάδα μέτρησης με αισθητήρες ροής και θερμοκρασίας. Η διάκριση αυτή πρέπει να είναι σαφής, επειδή διαφορετικά θα μπορούσε να δημιουργηθεί λανθασμένη εντύπωση ότι το ESP32 αντικάνει τον PIC ή ελέγχει το ρελέ.

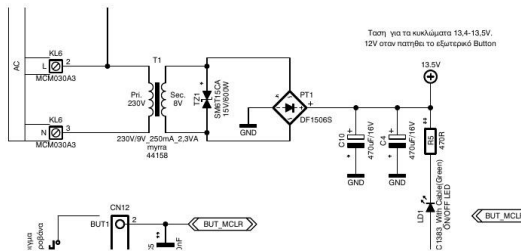
Η σχεδίαση δύο υποσυστημάτων έχει πρακτικό πλεονέκτημα κατά τις δοκιμές. Η πλακέτα όπου υπάρχουν επαφές 230 V και ρελέ μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα, ενώ η μονάδα ESP32 λειτουργεί σε χαμηλή τάση και μπορεί να προγραμματίζεται στον πάγκο χωρίς σύνδεση στο δίκτυο. Με αυτόν τον διαχωρισμό απομονώνονται ευκολότερα τα σφάλματα και ελέγχονται ξεχωριστά οι αλγόριθμοι μέτρησης.



Εικόνα 3.1: Συνολικό ηλεκτρονικό σχηματικό της πλακέτας PIC16F1825.

3.2 Τροφοδοσία, απομόνωση, ανόρθωση και εξομάλυνση

Ο μετασχηματιστής T1 είναι MYRRA 44158, ισχύος 2,3 VA, με ονομαστική είσοδο 230 V και δευτερεύουσα τάση 9 V [9]. Το datasheet δίνει ρεύμα δευτερεύοντος 256 mA και σημαντικά υψηλότερη τάση χωρίς φορτίο. Η γαλβανική απομόνωση είναι κρίσιμη, επειδή επιτρέπει στο τμήμα ελέγχου να έχει δικό του σημείο αναφοράς GND χωρίς άμεση αγωγή με το δίκτυο.



Εικόνα 3.2: Απόσπασμα του schematic για MYRRA 44158 (230 V / 9 V, 2,3 VA).

Εικόνα 3.3: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Φωτογραφία ακριβούς MYRRA 44158 (TME) | Επίσημο datasheet / μηχανική διάταξη και pinout MYRRA 44158

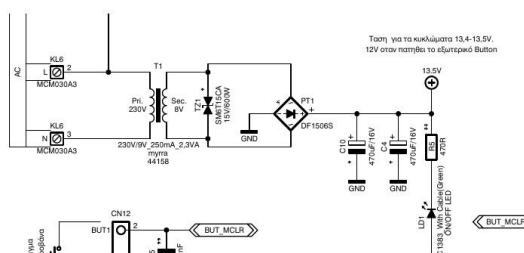


Εικόνα 3.4: Ενδεικτική απεικόνιση μετασχηματιστή PCB της MYRRA, παρόμοιας κατασκευαστικής μορφής.

Πηγή εικόνας: TME (ενδεικτική απεικόνιση του MYRRA 44158).

Η επιλογή μετασχηματιστή αντί για μη απομονωμένο capacitive dropper είναι σωστή για συσκευή με πλήκτρα και οθόνη που είναι προσβάσιμα από τον χρήστη. Ο μετασχηματιστής φέρει επίσης

Μετά τον μετασχηματιστή χρησιμοποιείται γέφυρα πλήρους ανόρθωσης DF1506S. Σε κάθε ημιπερίοδο του AC άγουν δύο από τις τέσσερις διόδους, με αποτέλεσμα η πολικότητα στην έξοδο να παραμένει σταθερή. Σε δίκτυο 50 Hz η συχνότητα της κυμάτωσης μετά από πλήρη ανόρθωση είναι 100 Hz.



Εικόνα 3.6: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Οι C4 και C10 είναι ηλεκτρολυτικοί 470 $\mu\text{F}/16\text{ V}$ και συνδέονται παράλληλα. Η συνολική χωρητικότητα είναι περίπου 940 μF . Οι πυκνωτές φορτίζονται όταν η ανορθωμένη τάση πλησιάζει στην κορυφή και αποδίδουν ενέργεια στο φορτίο στο ενδιαμέσο χρονικό διάστημα. Η απλή

προσέγγιση για το ripple είναι $\Delta V \approx I/(fC)$, όπου $f=100$ Hz. Η συγκεκριμένη βαθμίδα είναι μη σταθεροποιημένη, άρα η έξοδος μεταβάλλεται με το φορτίο και την πραγματική τάση του δευτερεύοντος.

$$C_{ολ} = 470 \mu F + 470 \mu F = 940 \mu F \quad (3.1)$$

$$\Delta V \approx I / (100 \cdot C_{ολ}) \quad (3.2)$$

Στο δευτερεύον υπάρχει TVS για περιορισμό μεταβατικών υπερτάσεων. Η TVS δεν λειτουργεί σαν κανονικός σταθεροποιητής: υπό φυσιολογική τάση παρουσιάζει πολύ υψηλή αντίσταση και άγει όταν εμφανιστεί αιχμή πάνω από το χαρακτηριστικό όριό της. Έτσι προστατεύει την ανορθωτική γέφυρα και τα επόμενα στοιχεία από σύντομα transients.

Η γραμμή που προκύπτει χαρακτηρίζεται στο σχέδιο ως 13,5 V. Τροφοδοτεί το πηνίο του ρελέ, τις εξωτερικές ενδείξεις LED, την πηγή σταθερού ρεύματος του backlight και τον 78L33A. Επειδή τόσα διαφορετικά φορτία εξαρτώνται από αυτή, η μεταβολή της επηρεάζει ολόκληρο το σύστημα. Η πράσινη ένδειξη LD1 με $R5=470 \Omega$ επιβεβαιώνει ότι υπάρχει τάση, όχι όμως ότι το ripple ή η μέγιστη τιμή είναι εντός επιθυμητών ορίων.

Κατά τις δοκιμές καταγράφηκε μέτρηση περίπου 13,5-14 V στην ανορθωμένη γραμμή και πτώση προς περίπου 12 V όταν εφαρμόζεται φορτίο. Η μεταβολή αυτή είναι αναμενόμενη σε τροφοδοσία με μικρό μετασχηματιστή και πυκνωτικό φίλτρο. Το datasheet του MYRRA 44158 δείχνει επίσης ότι η δευτερεύουσα τάση χωρίς φορτίο είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική [9].

Αυτές οι μετρήσεις είναι πιο χρήσιμες από έναν ιδανικό υπολογισμό με 9 V RMS, επειδή η πραγματική τάση δευτερεύοντος εξαρτάται από το φορτίο και τη ρύθμιση του μετασχηματιστή. Για την αξιολόγηση των πυκνωτών, των LED και του 78L33A πρέπει να εξετάζεται η μέγιστη πραγματική τάση και όχι μόνο η ονομαστική. Το υλικό αναφέρει επίσης ripple περίπου 1,4 V για συνολικό φορτίο κοντά στα 140 mA, τιμή που είναι συμβατή με τάξη μεγέθους που δίνει η σχέση της προηγούμενης ενότητας.

Η διαφορά μεταξύ της ονομαστικής τάσης του μετασχηματιστή και της τάσης που παρατηρείται μετά την ανόρθωση είναι ένα σημείο που χρειάζεται προσεκτική ερμηνεία. Τα 9 V του δευτερεύοντος είναι ενεργός τιμή εναλλασσόμενης τάσης υπό τις συνθήκες που ορίζει ο κατασκευαστής, ενώ μετά τη γέφυρα και τους πυκνωτές η DC γραμμή φορτίζεται κοντά στην κορυφή του ημιτονοειδούς. Επιπλέον, ο MYRRA 44158 εμφανίζει υψηλότερη τάση χωρίς φορτίο από την ονομαστική τιμή του [9]. Έτσι, η παρατήρηση 13,5-14 V δεν πρέπει να θεωρηθεί σφάλμα μέτρησης αλλά φυσική συνέπεια της συγκεκριμένης τροφοδοσίας. Όταν αυξάνεται το φορτίο, η τάση πέφτει, επειδή αυξάνεται η πτώση στον μετασχηματιστή και οι πυκνωτές εκφορτίζονται περισσότερο ανάμεσα στις κορυφές της ανορθωμένης κυματομορφής.

Αυτή η συμπεριφορά έχει πρακτική σημασία σε τρία σημεία. Πρώτον, οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές C4 και C10 των 16 V λειτουργούν με μικρότερο περιθώριο από όσο θα ήταν επιθυμητό

όταν η γραμμή πλησιάζει τα 14 V. Δεύτερον, ο γραμμικός 78L33A πρέπει να αποβάλλει ως θερμότητα τη διαφορά μεταξύ της εισόδου και των 3,3 V. Τρίτον, οι κλάδοι LED που τροφοδοτούνται από τη μη σταθεροποιημένη γραμμή επηρεάζονται άμεσα από τη στιγμιαία τάση. Για αυτό στην τεχνική αποτίμηση δεν αρκεί μία μόνο μέτρηση με πολύμετρο. Χρήσιμος έλεγχος σε επόμενη φάση θα ήταν η παρατήρηση της κυμάτωσης με παλμογράφο, τόσο χωρίς φορτίο όσο και με ενεργό ρελέ και backlight, ώστε να αποτυπωθούν η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση τάση του πραγματικού κύκλου λειτουργίας.

Ο MYRRA 44158 έχει ονομαστικό δευτερεύον 9 V και ισχύ 2,3 VA, με ονομαστικό ρεύμα περίπου 256 mA [9]. Το γεγονός ότι μετά την ανόρθωση μετρήθηκαν 13,5-14 V χωρίς ισχυρό φορτίο δεν είναι παράδοξο. Η ονομαστική τάση του μετασχηματιστή αναφέρεται σε συγκεκριμένο φορτίο και η τάση χωρίς φορτίο είναι υψηλότερη. Επιπλέον, οι πυκνωτές φορτίζονται κοντά στην κορυφή της ανορθωμένης κυματομορφής. Αυτό εξηγεί γιατί η γραμμή μπορεί να πλησιάζει αρκετά την ονομαστική αντοχή των πυκνωτών 16 V.

Η γραμμή 13,5 V δεν είναι σταθεροποιημένη. Τροφοδοτεί φορτία για τα οποία μικρές μεταβολές είναι αποδεκτές, όπως το πηνίο του ρελέ και οι οδηγοί LED, και χρησιμοποιείται ως είσοδος για τους επόμενους ρυθμιστές. Το στοιχείο αυτό είναι σημαντικό στην ανάλυση βλαβών: μια ένδειξη LED τροφοδοσίας μπορεί να ανάβει ενώ η γραμμή εμφανίζει αυξημένο ripple ή πτώση υπό φορτίο. Για πλήρη έλεγχο θα χρειαζόταν μέτρηση με παλμογράφο σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας.

Πίνακας 3.1: Βασικές τιμές της κύριας τροφοδοσίας

Μέγεθος	Διαθέσιμη τιμή	Σχόλιο
DC με μικρό φορτίο	13,5-14 V	Πραγματική μέτρηση
DC με αυξημένο φορτίο	≈12 V	Πραγματική παρατήρηση πτώσης
C4+C10	940 μF	2 × 470 μF
Συνολικό ρεύμα	≈140 mA	Εκτίμηση από τα επιμέρους φορτία
Ripple	≈1,4 V	Εκτίμηση τεχνικού υλικού

Η παρατήρηση της πτώσης της κύριας DC γραμμής από περίπου 13,5-14 V προς τα 12 V όταν αυξάνεται το φορτίο είναι αναμενόμενη για μικρό μετασχηματιστή 2,3 VA και μη σταθεροποιημένη ανόρθωση. Για πιο πλήρη χαρακτηρισμό θα ήταν χρήσιμο να καταγραφούν τέσσερις καταστάσεις: μόνο τροφοδοσία, ενεργό backlight, ενεργό ρελέ και ταυτόχρονη λειτουργία ρελέ/LED/backlight. Για κάθε κατάσταση θα μετρώταν η μέση DC τάση, το peak-to-peak ripple και το συνολικό ρεύμα. Έτσι θα μπορούσε να αποσαφηνιστεί ποιο φορτίο προκαλεί τη μεγαλύτερη μεταβολή και αν το περιθώριο του LM317L παραμένει επαρκές σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας.

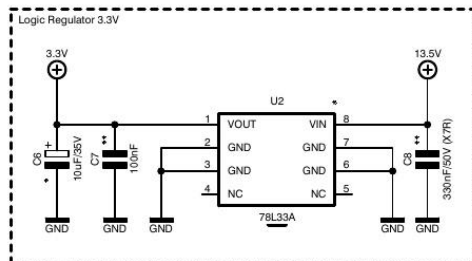
Ένας ακόμη έλεγχος αφορά την ονομαστική τάση των C4 και C10. Η τιμή των 16 V βρίσκεται σχετικά κοντά στη μέγιστη παρατηρούμενη τάση χωρίς φορτίο. Αν συνυπολογιστούν ανοχές δικτύου και μετασχηματιστή, μια έκδοση 25 V παρέχει πιο άνετο περιθώριο με μικρή μόνο επίδραση σε κόστος και διαστάσεις. Η αλλαγή αυτή αυξάνει το ηλεκτρικό περιθώριο χωρίς να μεταβάλλει τη λειτουργική αρχιτεκτονική.



Εικόνα 3.7: Λεπτομέρεια της σχεδιασμένης πλακέτας στην περιοχή τροφοδοσίας, μετασχηματιστή και ρελέ.

3.3 Ρύθμιση 3,3 V και τροφοδοσία backlight

Ο U2 είναι ρυθμιστής της οικογένειας L78L με σταθερή έξοδο 3,3 V. Η σειρά μπορεί να παρέχει έως 100 mA και έχει εσωτερικό περιορισμό ρεύματος και θερμική προστασία [5]. Στην πλακέτα χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του PIC και της λογικής της LCD. Οι C8, C7 και C6 λειτουργούν ως πυκνωτές εισόδου, υψηλής συχνότητας και αποθήκευσης στην έξοδο.



Εικόνα 3.8: Απόσπασμα του schematic για 78L33A / L78L33A, 3,3 V.

Εικόνα 3.9: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημη τεχνική αναφορά ST για οικογένεια L78L33



Εικόνα 3.10: Ενδεικτική φωτογραφία ρυθμιστή 78L33A σε SMD συσκευασία.

Πηγή εικόνας: STMicroelectronics (ενδεικτική απεικόνιση package).

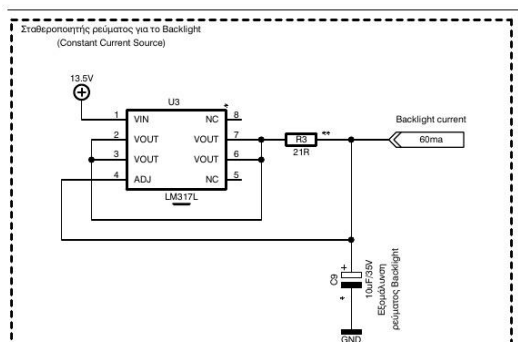
Η κύρια αδυναμία ενός γραμμικού ρυθμιστή είναι ότι η διαφορά τάσης μετατρέπεται σε θερμότητα. Με είσοδο 13,5 V και έξοδο 3,3 V, η πτώση είναι περίπου 10,2 V. Σε 30 mA η απώλεια είναι περίπου 0,31 W, ενώ σε 50 mA φθάνει περίπου 0,51 W. Η πραγματική θερμοκρασία πρέπει να μετρηθεί στην πλακέτα, επειδή εξαρτάται από το SO-8 footprint, την επιφάνεια χαλκού και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$$P_{78L33} = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_{OUT} \quad (3.3)$$

Η επιλογή του 78L33A είναι λογική όταν το ρεύμα της ψηφιακής λογικής παραμένει μικρό, επειδή απαιτεί ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα και προσφέρει ενσωματωμένο περιορισμό ρεύματος και θερμική προστασία [5]. Στην κατασκευή αυτό είναι πλεονέκτημα, καθώς μειώνει το πλήθος εξαρτημάτων γύρω από τον PIC και την LCD. Η απλότητα όμως συνοδεύεται από χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση. Για παράδειγμα, με 13,5 V στην είσοδο και 30 mA φορτίο, η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα είναι περίπου 0,31 W. Αν το ρεύμα αυξηθεί στα 50 mA, η απώλεια προσεγγίζει τα 0,51 W. Η τιμή αυτή δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο αριθμητικά: η θερμοκρασία εξαρτάται από το θερμικό μονοπάτι του SO-8 προς τον χαλκό, το διαθέσιμο copper area και τη θερμοκρασία μέσα στο περίβλημα της συσκευής.

Η μελέτη του ρυθμιστή δείχνει επίσης γιατί μία πιθανή μελλοντική βελτίωση με επιπλέον αισθητήρες ή ασύρματο module δεν μπορεί να γίνει χωρίς νέο έλεγχο ισχύος. Αν προστεθεί σημαντικό φορτίο στα 3,3 V, το ρεύμα του L78L πλησιάζει το όριο της οικογένειας και ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμική απώλεια. Σε τέτοια περίπτωση ένας buck converter, όπως συζητείται στις προτάσεις βελτίωσης, θα είχε καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά [26]. Για την παρούσα έκδοση, πάντως, ο γραμμικός ρυθμιστής διατηρεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα: η λειτουργία του είναι απλή, εύκολα μετρήσιμη και κατάλληλη για ένα μικρό embedded φορτίο.

Ο LM317L είναι ρυθμιζόμενος γραμμικός ρυθμιστής, όμως εδώ χρησιμοποιείται διαφορετικά: ως πηγή σταθερού ρεύματος για το backlight. Το ολοκληρωμένο διατηρεί περίπου 1,25 V μεταξύ VOUT και ADJ [6]. Τοποθετώντας $R_3=21 \Omega$ μεταξύ αυτών των ακροδεκτών, το ρεύμα καθορίζεται περίπου από τη σχέση $I=1,25/R$.



Εικόνα 3.11: Απόσπασμα του schematic για LM317L ως πηγή σταθερού ρεύματος backlight.

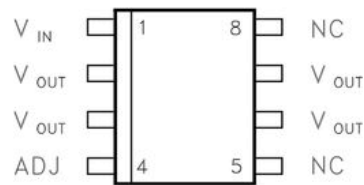
Εικόνα 3.12: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημη σελίδα LM317L - εικόνα/package και τεχνικά στοιχεία | Επίσημο datasheet LM317L - εσωτερικό/τυπικό κύκλωμα εφαρμογής



Εικόνα 3.13: Ενδεικτική φωτογραφία ολοκληρωμένου LM317L σε SMD συσκευασία.

Πηγή εικόνας: STMicroelectronics (ενδεικτική απεικόνιση package).



Εικόνα 3.14: Ενδεικτική διάταξη ακροδεκτών του LM317L σε 8-pin package.

Πηγή: STMicroelectronics, datasheet LM317L [6].

Το αποτέλεσμα είναι περίπου 59,5 mA, δηλαδή πρακτικά 60 mA. Η λύση είναι κατάλληλη για backlight LED επειδή διατηρεί τη φωτεινότητα σχετικά σταθερή ακόμη και όταν η γραμμή 13,5 V πέσει προς 12 V. Ο C9=10 μF/35 V συμβάλλει στη σταθερότητα και στη μείωση θορύβου. Στις σημειώσεις αναφέρεται τάση περίπου 3,7 V στην οθόνη, όμως το σημαντικό μέγεθος για το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι το ρυθμιζόμενο ρεύμα και το διαθέσιμο voltage headroom.

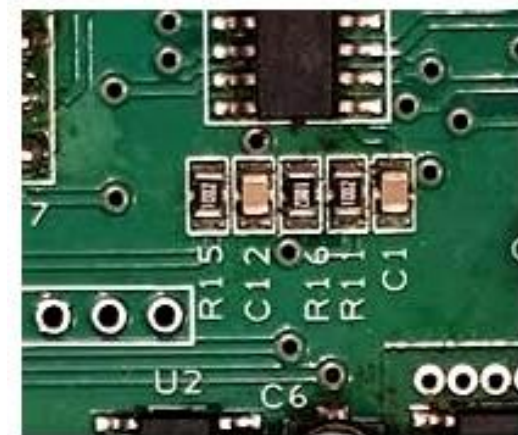
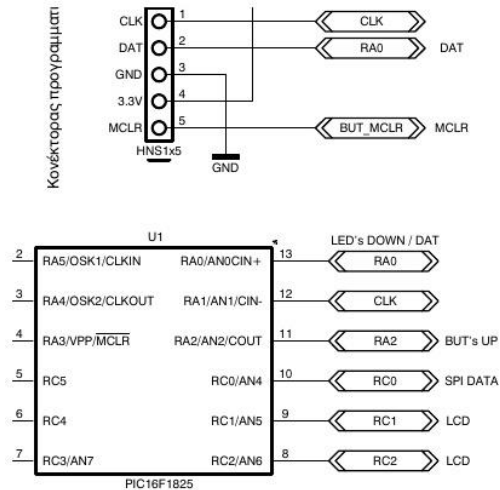
$$I_{\text{backlight}} = 1,25 \text{ V} / 21 \Omega \approx 59,5 \text{ mA} \quad (3.4)$$

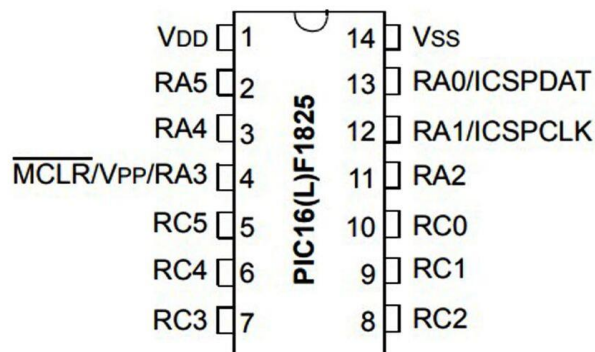
Οι δύο ρυθμιστές εκτελούν διαφορετική λειτουργία. Ο 78L33A είναι πηγή σταθερής τάσης για τη λογική, ενώ ο LM317L έχει συνδεθεί ως πηγή σταθερού ρεύματος. Η διάκριση είναι σημαντική επειδή το backlight αποτελεί φορτίο LED, όπου ο έλεγχος ρεύματος είναι καταλληλότερος από μια απλή εφαρμογή σταθερής τάσης. Με R3=21 Ω και αναφορά περίπου 1,25 V, το θεωρητικό ρεύμα είναι 59,5 mA.

Στον 78L33A το βασικό θέμα είναι η θερμική απώλεια. Για 50 mA και πτώση 10,2 V, η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα προσεγγίζει 0,51 W. Η τιμή αυτή δεν σημαίνει αυτόματα ότι ο ρυθμιστής αποτυγχάνει, αλλά δείχνει ότι η θερμοκρασία του package πρέπει να ελεγχθεί στην πραγματική πλακέτα. Αν το ESP32 ή άλλοι μεγαλύτεροι καταναλωτές συνδέονταν στην ίδια γραμμή, ο γραμμικός ρυθμιστής δεν θα ήταν κατάλληλη επιλογή. Στο υπάρχον σχέδιο το ESP32 αποτελεί ξεχωριστό υποσύστημα και δεν επιβαρύνει τον 78L33A.

3.4 Μικροελεγκτής PIC16F1825, I/O, ADC και χρονισμός

Ο PIC16F1825 είναι 14-pin Flash microcontroller της Microchip με αρχιτεκτονική RISC, εσωτερικό oscillator έως 32 MHz και περιφερειακά που περιλαμβάνουν ADC, timers και ψηφιακές θύρες [1], [24]. Η ύπαρξη εσωτερικού ταλαντωτή επιτρέπει να μην υπάρχει εξωτερικός κρύσταλλος στο PCB, εξοικονομώντας χώρο και δύο εξαρτήματα.





Εικόνα 3.18: Διάγραμμα ακροδεκτών του PIC16F1825 (14-pin).

Πηγή: Microchip, datasheet PIC16F1825 [1].

Στην παρούσα πλακέτα ο PIC είναι ο κεντρικός ελεγκτής. Διαβάζει τις αναλογικές εισόδους RC3/AN7 και RA2/AN2, χειρίζεται την LCD μέσω RC0, RC1, RC2, RC5 και RA4, ελέγχει το ρελέ από την RA5 και οδηγεί τα LED μέσω RC4 και RA0. Η RA0 και η RA1 χρησιμοποιούνται παράλληλα ως γραμμές ICSPDAT και ICSPCLK. Αυτή η κοινή χρήση είναι εφικτή αλλά απαιτεί το εξωτερικό κύκλωμα να μην φορτώνει υπερβολικά τις γραμμές κατά τον προγραμματισμό.

Η επιλογή του PIC16F1825 είναι συμβατή με μία εφαρμογή στην οποία το βασικό πρόβλημα δεν είναι η υψηλή υπολογιστική ισχύς αλλά ο αξιόπιστος χρονισμός και η διαχείριση αρκετών εισόδων και εξόδων. Το datasheet περιγράφει λειτουργία έως 32 MHz, μνήμη Flash, ADC, timers και δυνατότητες interrupt [1]. Στην πλακέτα αυτά τα χαρακτηριστικά αξιοποιούνται με πρακτικό τρόπο: οι αναλογικές εισόδους αποκωδικοποιούν τα πλήκτρα, οι ψηφιακές εξοδοι οδηγούν ενδείξεις και ρελέ, ενώ οι γραμμές προς την LCD μεταφέρουν τις πληροφορίες που χρειάζεται η διεπαφή χρήστη. Η ύπαρξη εσωτερικού oscillator περιορίζει το πλήθος εξωτερικών εξαρτημάτων και απελευθερώνει χώρο στο PCB.

Για τη σταθερότητα του συστήματος σημαντικό ρόλο έχει η αρχικοποίηση. Μετά την εφαρμογή της 3,3 V ο PIC πρέπει να θέσει τις εξόδους σε γνωστές καταστάσεις πριν αρχίσει η κανονική λειτουργία, να διαμορφώσει τον ADC, να αρχικοποιήσει τον χρονιστή και να εκκινήσει την LCD. Σε επόμενη έκδοση θα ήταν σκόπιμο να αξιοποιηθούν watchdog και brown-out reset, ώστε μία προσωρινή πτώση τάσης ή μία εμπλοκή του firmware να μην αφήσει το Rel_control σε απροσδιόριστη κατάσταση. Οι δυνατότητες αυτές είναι μέρος της λογικής ασφαλούς embedded σχεδίασης και συνδέονται άμεσα με το γεγονός ότι το software ελέγχει ένα πραγματικό ηλεκτρομηχανικό φορτίο.

Η αντιστοίχιση ακροδεκτών είναι κρίσιμη επειδή κάθε pin του PIC μπορεί να έχει πολλές εναλλακτικές λειτουργίες. Το firmware πρέπει να ρυθμίσει σωστά τα ANSEL, TRIS και τις περιφερειακές λειτουργίες. Για παράδειγμα, οι RC3 και RA2 πρέπει να λειτουργούν αναλογικά όταν γίνεται ανάγνωση των πλήκτρων, ενώ οι γραμμές της LCD πρέπει να είναι ψηφιακές έξοδοι.

Ο πίνακας αποτυπώνει τη λειτουργία όπως φαίνεται από το σχηματικό και το τεχνικό υλικό. Η αντιστοίχιση αυτή χρησιμοποιείται σε όλη την υπόλοιπη ανάλυση.

Η χρήση ADC επιτρέπει σε δύο pins να διαβάζουν τέσσερα πλήκτρα. Το firmware δεν χρειάζεται να γνωρίζει τη φυσική αντίσταση κάθε στιγμής, αλλά μόνο να μετατρέπει την ADC τιμή σε μία από τρεις περιοχές τάσης: περίπου 0 V, 1,65 V ή 3,3 V. Η Microchip παρέχει 10-bit ADC στην οικογένεια, άρα σε αναφορά 3,3 V οι ιδανικές τιμές αντιστοιχούν περίπου σε 0, 512 και 1023 [1].

Ο χρονισμός της ηλεκτροβάνας υλοποιείται στο πραγματικό firmware με τον Timer2. Ο PIC λειτουργεί από τον εσωτερικό ταλαντωτή στα 8 MHz χωρίς PLL, ενώ ο Timer2 χρησιμοποιεί prescaler 1:16 και PR2=124. Με αυτές τις ρυθμίσεις παράγεται interrupt ανά 1,00 ms και η μεταβλητή msec αυξάνεται στην ISR. Η συνάρτηση get_msec() επιστρέφει με ατομικό τρόπο την τρέχουσα τιμή, απενεργοποιώντας προσωρινά τα interrupts κατά την αντιγραφή της μεταβλητής. Η διάρκεια ενεργοποίησης του ρελέ συγκρίνεται άρα με πραγματικό μετρητή χιλιοστών του δευτερολέπτου και όχι με ακολουθία μεγάλων blocking delays.

Ο PIC16F1825 είναι 14-pin Flash microcontroller της Microchip με εσωτερικό oscillator έως 32 MHz και περιφερειακά που επαρκούν για την εφαρμογή [1]. Ο περιορισμένος αριθμός ακροδεκτών οδηγεί σε κοινή χρήση ορισμένων γραμμών. Η RA0, για παράδειγμα, συμμετέχει στον ICSP και παράλληλα στην οδήγηση της ένδειξης DOWN. Η κοινή χρήση εξοικονομεί pins αλλά απαιτεί το εξωτερικό κύκλωμα να μην επηρεάζει τον προγραμματισμό.

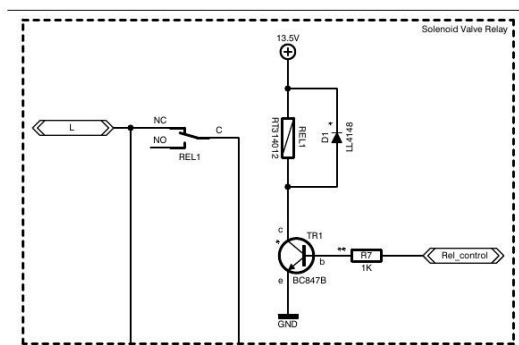
Πίνακας 3.2: Κύριες γραμμές του PIC16F1825

Pin	Σήμα/Net	Χρήση
1	VDD	Τροφοδοσία 3,3 V
2	RA5	Rel_control
4	RA3/MCLR/VPP	Reset και ICSP VPP
6	RC4	LED UP
7	RC3/AN7	Buttons DOWN/2
10	RC0/AN4	LCD serial data
11	RA2/AN2	Buttons UP/1
12	RA1	ICSPCLK
13	RA0	ICSPDAT / LED DOWN
14	VSS	GND

Η χρήση ADC για πλήκτρα είναι ενδιαφέρουσα επειδή επιτρέπει σε δύο αναλογικές εισόδους να αναγνωρίζουν τέσσερα πλήκτρα. Οι τρεις αναμενόμενες στάθμες κάθε γραμμής είναι περίπου 3,3 V, 1,65 V και 0 V. Το firmware δεν πρέπει να συγκρίνει μία μοναδική τιμή, αλλά να χρησιμοποιεί περιοχές τιμών ώστε ανοχές αντιστάσεων και θόρυβος να μην προκαλούν λανθασμένες εντολές. Αυτή είναι μια απλή αλλά χρήσιμη εφαρμογή αναλογικής μέτρησης σε κατά τα άλλα ψηφιακό interface.

3.5 Ρελέ, ηλεκτροβάννα, τρανζίστορ και flyback προστασία

Στην υλοποιημένη πλακέτα έχει τοποθετηθεί ρελέ Omron G2RL-1A-E με πηνίο 12 VDC. Η συγκεκριμένη έκδοση είναι υψηλής ικανότητας, με επαφή SPST-NO (1 Form A) και ονομαστική ικανότητα 16 A στα 250 VAC για ωμικό φορτίο [10]. Για πηνίο 12 V το datasheet δίνει ονομαστικό ρεύμα 33,3 mA και αντίσταση περίπου 360 Ω, τιμές συμβατές με την εκτίμηση κατανάλωσης του κυκλώματος.



Εικόνα 3.19: Απόσπασμα του schematic για Omron G2RL-1A-E, 12 VDC, SPST-NO.

Εικόνα 3.20: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

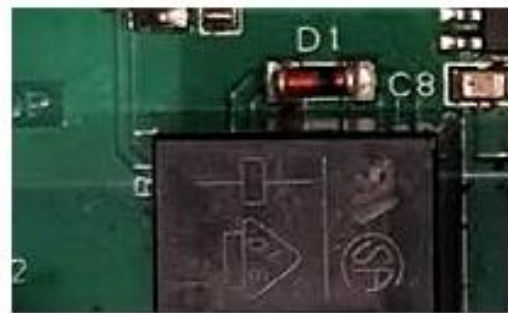
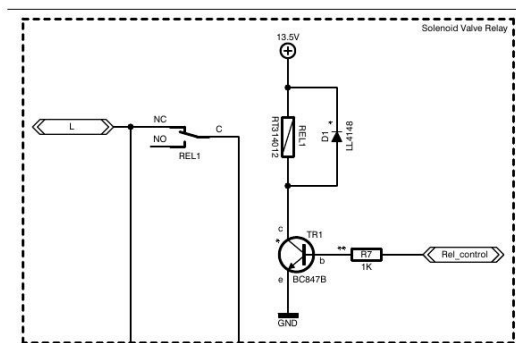
Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημο Omron G2RL datasheet - ακριβής έκδοση G2RL-1A-E και διάγραμμα επαφών

Η φυσικά τοποθετημένη έκδοση G2RL-1A-E έχει μία κανονικά ανοικτή επαφή (SPST-NO) και όχι μεταγωγική SPDT. Άρα η τελική ανάλυση της κατάστασης ON/OFF βασίζεται στο πραγματικό relay part number και στην καλωδίωση της κατασκευής. Το γενικό σύμβολο μεταγωγικής επαφής που εμφανίζεται σε παλαιότερη απεικόνιση του schematic δεν αντιστοιχεί στην επαφή ισχύος του εξαρτήματος που τοποθετήθηκε.

Το μηχανικό ρελέ λειτουργεί ως στοιχείο ισχύος και ηλεκτρικού διαχωρισμού μεταξύ του μικροελεγκτή και της ελεγχόμενης γραμμής. Ο PIC ελέγχει μόνο τη βαθμίδα βάσης του TR1, το οποίο τροφοδοτεί ή διακόπτει το πηνίο. Η μεταγωγή της φάσης γίνεται στη μηχανική επαφή του REL1. Για διάγνωση ελέγχονται διαδοχικά το Rel_control, η τάση στη βάση του BC847B, το ρεύμα του πηνίου και η συνέχεια της επαφής του ρελέ.

Η ασφαλής κατάσταση δεν πρέπει να συναχθεί μόνο από το σύμβολο του schematic. Με το πραγματικό G2RL-1A-E η επαφή είναι κανονικά ανοικτή, άρα σε απενεργοποιημένο πηνίο η επαφή ισχύος παραμένει ανοικτή. Η τελική συμπεριφορά της ηλεκτροβάννας εξακολουθεί να πρέπει να επιβεβαιώνεται στην πλήρη καλωδίωση, ιδιαίτερα για καταστάσεις reset, απώλειας 3,3 V ή βλάβης του driver.

Ο BC847B είναι NPN τρανζίστορ γενικής χρήσης σε SMD συσκευασία, κατάλληλο για switching και ενίσχυση μικρών σημάτων [7]. Στην πλακέτα χρησιμοποιούνται τρία: TR1 για το πηνίο του ρελέ και TR2/TR3 για τις ενδείξεις UP/DOWN. Όλα λειτουργούν ως low-side switches, δηλαδή ο εκπομπός βρίσκεται στο GND και το φορτίο συνδέεται μεταξύ θετικής τάσης και συλλέκτη.



Εικόνα 3.21: Απόσπασμα του schematic για BC847B - driver χαμηλής πλευράς.

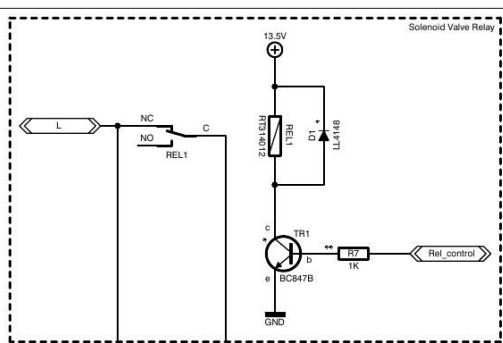
Εικόνα 3.22: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημη σελίδα Nexperia BC847B - εικόνα SOT23 και package

Η χρήση τρανζίστορ προστατεύει τον PIC από ρεύματα που δεν πρέπει να περάσουν απευθείας από GPIO. Για το TR1 η βάση οδηγείται μέσω $R7=1\text{ k}\Omega$. Με λογική τάση 3,3 V και προσεγγιστική $V_{BE}=0,7\text{ V}$, το ρεύμα βάσης είναι περίπου 2,6 mA. Η τιμή είναι αρκετά μικρή για GPIO και ταυτόχρονα επιτρέπει έντονο κόρο για πηνίο περίπου 33-35 mA. Παρόμοια λογική εφαρμόζεται στις R4 και R10 για τα LED.

$$I_B \approx (3,3 - 0,7)\text{ V} / 1\text{ k}\Omega \approx 2,6\text{ mA} \quad (3.5)$$

Η LL4148 είναι δίοδος μικρού σήματος με μέγιστη επαναλαμβανόμενη ανάστροφη τάση 100 V και μέσο ανορθωμένο ρεύμα 200 mA [8]. Στην πλακέτα η D1 τοποθετείται ανάστροφα παράλληλα στο πηνίο του ρελέ. Κατά τη φυσιολογική τροφοδοσία είναι reverse-biased και δεν επηρεάζει το κύκλωμα.



Εικόνα 3.23: Απόσπασμα του schematic για LL4148 - flyback προστασία πηνίου.

Εικόνα 3.24: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημο Vishay datasheet LL4148 - package MiniMELF και χαρακτηριστικά

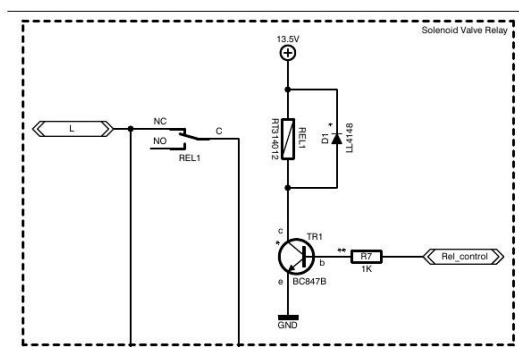
Όταν όμως το TR1 διακόψει απότομα το ρεύμα, η αποθηκευμένη ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου δημιουργεί τάση αντίθετης πολικότητας. Χωρίς δίοδο η τάση αυτή μπορεί να ξεπεράσει το ασφαλές VCE του τρανζίστορ. Η D1 δημιουργεί κλειστό βρόχο εκτόνωσης του ρεύματος και περιορίζει το transient. Η χρήση flyback diode είναι κλασική πρακτική σε DC coils [22]. Σε μελλοντικό redesign μπορεί να χρησιμοποιηθεί και 1N4148W ή άλλη κατάλληλη δίοδος, εφόσον ελεγχθούν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και footprint.

Η οδήγηση του πηνίου μέσω BC847B απομονώνει λειτουργικά το GPIO από το ρεύμα του ρελέ. Με αντίσταση βάσης 1 kΩ, το ρεύμα βάσης εκτιμάται περίπου στα 2,6 mA. Η τιμή είναι αρκετά μικρή για τον μικροελεγκτή και ταυτόχρονα επιτρέπει στο τρανζίστορ να λειτουργεί ως διακόπτης, με την προϋπόθεση ότι το ρεύμα του πηνίου παραμένει μέσα στα όρια του εξαρτήματος [7].

Η LL4148 τοποθετείται ανάστροφα παράλληλα στο πηνίο ώστε να παρέχει διαδρομή στο ρεύμα όταν το τρανζίστορ διακόψει. Χωρίς αυτή τη δίοδο, η απότομη μεταβολή του ρεύματος του πηνίου θα μπορούσε να δημιουργήσει υψηλή τάση στον συλλέκτη του TR1. Η χρήση flyback diode είναι τυπική πρακτική σε DC coils και αποτελεί καλό παράδειγμα του πώς ένα μικρό διακριτό εξάρτημα προστατεύει ένα ολόκληρο στάδιο οδήγησης.



Εικόνα 3.25: Η ηλεκτροβάννα της κατασκευής χρησιμοποιεί πηνίο SIRAI ZA32A, με σήμανση 220–230 V / 50 Hz, 208–240 V / 60 Hz, Class F και ED 100% [37].



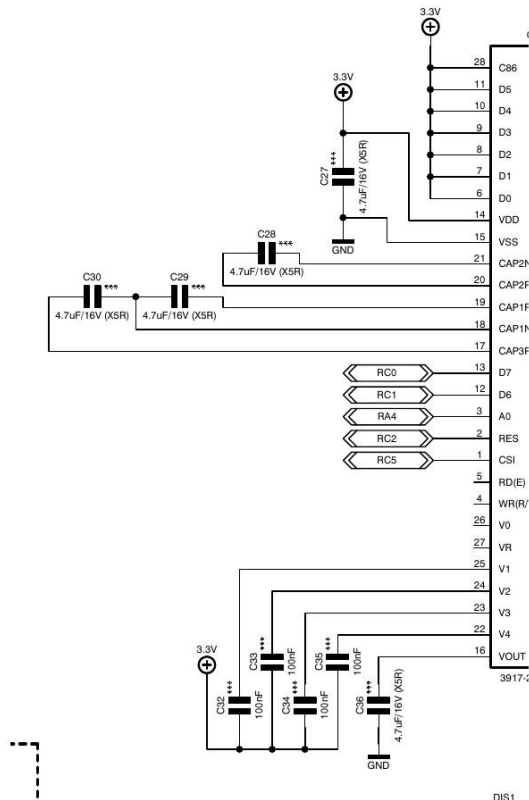
Εικόνα 3.26: Απόσπασμα του schematic για SIRAI ZA32A - πηνίο ηλεκτροβάννας.

Εικόνα 3.27: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: SIRAI, τεχνικό έγγραφο για το πηνίο ZA32A [37].

3.6 Γραφική LCD 128×64, πλήκτρα, LED και ICSP

Η γραφική οθόνη της κύριας μονάδας αντιστοιχεί στο Winstar WO12864A1, 128×64 pixels τύπου COG (Chip On Glass), με controller ST7565P και τροφοδοσία λογικής 3,3 V [33]. Το schematic δείχνει 28-pin σύνδεση με γραμμές δεδομένων, ελέγχου, charge-pump capacitors και ξεχωριστές επαφές backlight.



Εικόνα 3.28: Απόσπασμα του schematic για Winstar WO12864A1, COG 128×64.

Εικόνα 3.29: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημη Winstar WO12864A1 - πραγματικές φωτογραφίες και μηχανικό σχέδιο

Η λογική της LCD τροφοδοτείται από 3,3 V, ενώ ο φωτισμός έχει ανεξάρτητη πηγή σταθερού ρεύματος. Ο διαχωρισμός είναι σημαντικός: η ψηφιακή κατανάλωση του controller είναι διαφορετικής φύσης από τα περίπου 60 mA του backlight. Οι πολλαπλές συνδέσεις GND μειώνουν την αντίσταση επιστροφής και βοηθούν στη σταθερότητα σημάτων. Η οθόνη είναι το βασικό μέσο πληροφόρησης του χρήστη και επιτρέπει να εμφανίζονται χρόνοι, επιλογές και κατάσταση λειτουργίας.

Η επιλογή γραφικής οθόνης αντί για απλά αριθμητικά ψηφία επιτρέπει στο ίδιο hardware να υποστηρίξει περισσότερες καταστάσεις χρήσης. Σε μία βασική έκδοση μπορεί να εμφανίζεται χρόνος ή επιλογή δόσης, ενώ σε μελλοντικό firmware θα μπορούσαν να προστεθούν μηνύματα κατάστασης, προειδοποιήσεις ή οθόνες ρυθμίσεων χωρίς αλλαγή της πλακέτας. Η COG κατασκευή μειώνει τον

εξωτερικό όγκο, αλλά κάνει απαραίτητη τη σωστή διαχείριση των σημάτων και των εξωτερικών πυκνωτών του charge pump. Από το schematic φαίνεται ότι η οθόνη δεν είναι ένα απλό περιφερειακό δύο καλωδίων· έχει γραμμές clock, data, chip select, register select, reset και ξεχωριστή τροφοδοσία backlight.

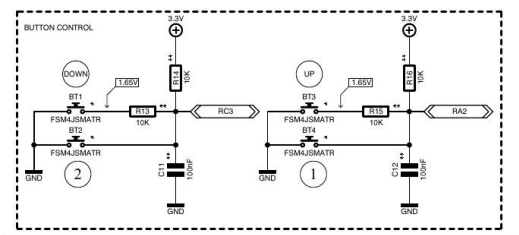
Σύμφωνα με το σχέδιο, η LCD χρησιμοποιεί σειριακή επικοινωνία με γραμμές που λειτουργούν ως clock και data. Η RC1 αντιστοιχεί στο serial clock και η RC0 στη σειριακή αποστολή δεδομένων. Η RA4 λειτουργεί ως A0/Register Select, η RC5 ως Chip Select και η RC2 χρησιμοποιείται για reset ή έλεγχο της οθόνης.

Η σειριακή διεπαφή μειώνει τον αριθμό pins σε σχέση με παράλληλη μεταφορά οκτώ bit. Αυτό είναι σημαντικό στον 14-pin PIC, όπου αρκετά pins είναι ήδη δεσμευμένα από ρελέ, LEDs, πλήκτρα και ICSP. Το firmware αποστέλλει άλλοτε εντολές και άλλοτε δεδομένα pixels. Η γραμμή A0 επιτρέπει στον controller της LCD να διακρίνει τα δύο είδη. Η ακριβής μορφή των εντολών εξαρτάται από τον controller της οθόνης και πρέπει να ακολουθεί το αντίστοιχο datasheet.

Το LCD schematic περιλαμβάνει πυκνωτές C27-C30 των 4,7 μF καθώς και επιπλέον πυκνωτές αποσύζευξης. Οι πυκνωτές αυτοί σχετίζονται με το εσωτερικό charge pump του controller, το οποίο δημιουργεί τις απαιτούμενες τάσεις πόλωσης των υγρών κρυστάλλων. Η λειτουργία αυτή είναι ξεχωριστή από το LED backlight.

Το backlight τροφοδοτείται από τον LM317L ως constant-current source. Αυτός ο σχεδιασμός είναι προτιμότερος από απλή αντίσταση όταν η τάση τροφοδοσίας μεταβάλλεται αισθητά. Η ρύθμιση στα 60 mA εξασφαλίζει σταθερότερη φωτεινότητα, αλλά πρέπει να ελέγχεται η θερμική λειτουργία του LM317L και το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα του συγκεκριμένου backlight. Το πλεονέκτημα του ξεχωριστού κυκλώματος είναι ότι θόρυβος ή μεταβολές του φωτισμού δεν μεταφέρονται άμεσα στη λογική 3,3 V.

Τα τέσσερα πλήκτρα του χειριστηρίου είναι τύπου FSM4JSMATR [34] και κωδικοποιούνται σε δύο ADC εισόδους. Για την ομάδα RC3, μία αντίσταση 10 k Ω λειτουργεί ως pull-up προς 3,3 V. Το ένα πλήκτρο δημιουργεί διαιρέτη 10 k Ω /10 k Ω και άρα περίπου 1,65 V, ενώ το άλλο τραβά την είσοδο σχεδόν στο GND. Η ίδια λογική επαναλαμβάνεται στην RA2 για την ομάδα UP/1.



Εικόνα 3.30: Απόσπασμα του schematic για FSM4JSMATR - tactile switches.



Εικόνα 3.31: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημη TE Connectivity FSM4JSMATR - φωτογραφίες ακριβούς switch και product drawing | Εναλλακτική φωτογραφική αναφορά ακριβούς FSM4JSMATR (TME)

Η τεχνική εξοικονομεί δύο pins. Το τίμημα είναι ότι το firmware πρέπει να χρησιμοποιεί εύρη και όχι μία ακριβή ADC τιμή, επειδή υπάρχουν ανοχές αντιστάσεων, θόρυβος και μεταβολή της τροφοδοσίας. Οι C11 και C12 των 100 nF σχηματίζουν φίλτρο με τις αντιστάσεις 10 kΩ. Η χρονική σταθερά είναι περίπου 1 ms, αρκετή για γρήγορες παρεμβολές, ενώ το μηχανικό bounce αντιμετωπίζεται καλύτερα και με software debounce.

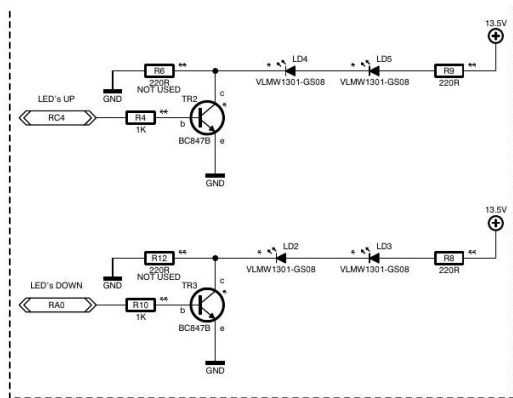
$$V_{\text{μεσαίο}} = 3,3 \text{ V} \cdot 10 \text{ k}\Omega / (10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega) = 1,65 \text{ V} \quad (3.6)$$

$$\tau = R \cdot C = 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ nF} = 1 \text{ ms} \quad (3.7)$$

Για την αξιοπιστία της αποκωδικοποίησης δεν αρκεί ο θεωρητικός υπολογισμός των 0 V, 1,65 V και 3,3 V. Στην πράξη οι αντιστάσεις έχουν ανοχή, η τροφοδοσία μπορεί να μεταβάλλεται ελαφρά και τα μηχανικά πλήκτρα παράγουν αναπηδήσεις επαφής. Για αυτό το firmware είναι προτιμότερο να ορίζει περιοχές τιμών και όχι μία μοναδική τιμή ADC. Μία περιοχή κοντά στο μηδέν μπορεί να αντιστοιχεί στο πλήκτρο 1 ή 2, μία μεσαία περιοχή στην εντολή UP ή DOWN και μία υψηλή περιοχή στην κατάσταση χωρίς πάτημα. Μεταξύ των περιοχών μπορούν να υπάρχουν μικρά κενά ώστε ο θόρυβος να μη δημιουργεί συχνές εναλλαγές κατάστασης.

Οι C11 και C12 παρέχουν ένα πρώτο αναλογικό φιλτράρισμα με χρονική σταθερά περίπου 1 ms. Το φίλτρο αυτό περιορίζει πολύ γρήγορες αιχμές, αλλά δεν αντικάνει το software debounce, επειδή η αναπήδηση των μηχανικών επαφών μπορεί να διαρκέσει περισσότερο. Ένα απλό firmware μπορεί να απαιτεί η ίδια περιοχή ADC να παραμένει σταθερή για ορισμένα διαδοχικά δείγματα πριν αποδεχθεί το πάτημα. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν τα πλήκτρα αλλάζουν χρόνο δοσομέτρησης, επειδή ένα διπλό ή τριπλό ψευδές πάτημα θα άλλαζε τη ρύθμιση χωρίς πρόθεση του χρήστη.

Οι ενδείξεις UP και DOWN χρησιμοποιούν από δύο λευκά LED VLMW1301-GS08 [11] σε σειρά, τροφοδοτούμενα από τη γραμμή 13,5 V. Οι R8 και R9 των 220 Ω περιορίζουν το ρεύμα, ενώ οι TR2 και TR3 απομονώνουν το φορτίο από τον PIC. Η RC4 ελέγχει την ένδειξη UP και η RA0 την DOWN.



Εικόνα 3.32: Απόσπασμα του schematic για VLMW1301-GS08 - λευκά SMD LED ενδείξεων.

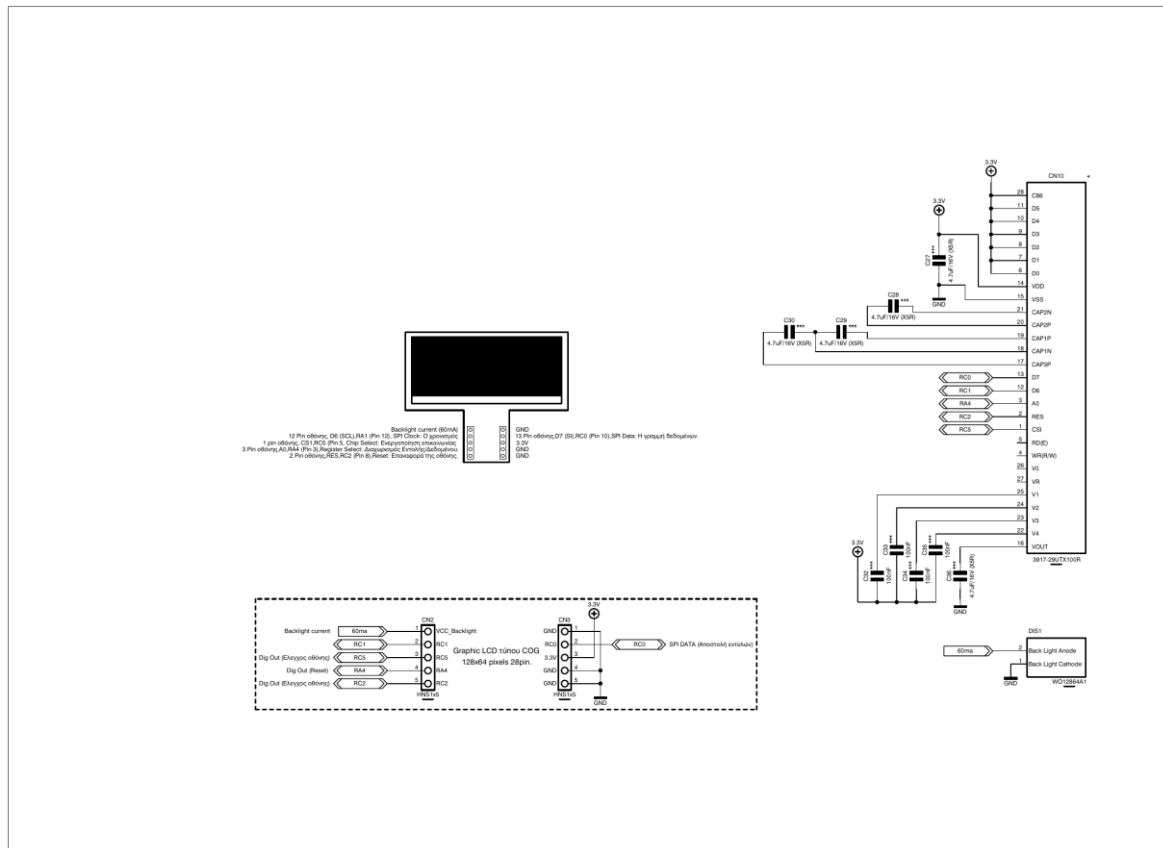
Εικόνα 3.33: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Φωτογραφία/τεχνική αναφορά ακριβούς VLMW1301-GS08 (DigiKey)

Στο σημείο αυτό προκύπτει ένας σχεδιαστικός περιορισμός. Με δύο LED περίπου 3 V και υψηλή στιγμιαία τιμή τροφοδοσίας, το ρεύμα μπορεί να ξεπεράσει τα 30 mA. Για μικρά SMD LED αυτό μπορεί να είναι πάνω από το επιθυμητό συνεχές ρεύμα [11]. Προτείνεται επανυπολογισμός των R8/R9, με πιθανές τιμές 390-470 Ω, ώστε το ρεύμα να κινηθεί κοντά στα 15-18 mA. Η τελική επιλογή πρέπει να γίνει από το πραγματικό VF και το datasheet του LED και όχι μόνο από ονομαστική εκτίμηση.

Το ICSP επιτρέπει την εγγραφή και τον έλεγχο του PIC χωρίς να αφαιρείται από το PCB [2], [3]. Ο CN1 έχει πέντε κρίσιμα σήματα: PGC/CLK, PGD/DAT, GND, VDD και MCLR/VPP. Η RA1 χρησιμοποιείται ως clock και η RA0 ως data, ενώ η RA3/MCLR δέχεται την τάση προγραμματισμού.

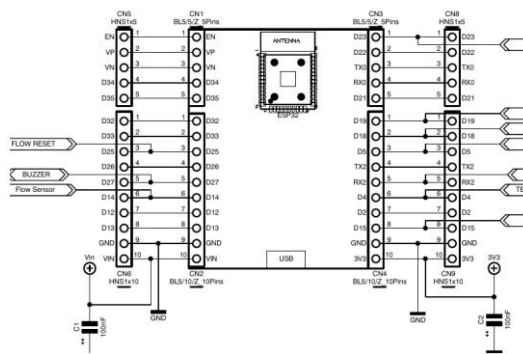
Η ασφαλέστερη διαδικασία είναι να μην υπάρχει ενεργό 230 V στην πλακέτα κατά τον προγραμματισμό. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί απομονωμένη τροφοδοσία στη χαμηλή τάση ή, μετά από έλεγχο backfeeding, τροφοδοσία στόχου από τον προγραμματιστή. Στο MPLAB IPE επιλέγεται PIC16F1825, συνδέεται το PICkit, φορτώνεται το HEX και εκτελείται Program/Verify [4]. Επειδή RA0 και RA1 έχουν και άλλες λειτουργίες, πρέπει να ελεγχθεί ότι τα εξωτερικά κυκλώματα δεν εμποδίζουν τα επίπεδα ICSP.



Η οθόνη COG τροφοδοτείται λογικά στα 3,3 V, ενώ το backlight έχει ανεξάρτητη τροφοδοσία σταθερού ρεύματος. Η επικοινωνία χρησιμοποιεί σειριακές γραμμές clock/data και πρόσθετα control signals όπως A0, reset και chip select. Η λύση μειώνει τον αριθμό των pins σε σχέση με πλήρη παράλληλη διασύνδεση και είναι συμβατή με τον περιορισμένο αριθμό ακροδεκτών του PIC.

3.7 Υποσύστημα ESP32 και κατανομή GPIO

Το νέο υποσύστημα μέτρησης βασίζεται σε development board ESP32 30-pin με module ESP-WROOM-32, όπως φαίνεται από τη διάταξη ακροδεκτών του schematic. Το ESP32 έχει επαρκή αριθμό GPIO, hardware interrupts, μνήμη Flash και υποστήριξη πολλών πρωτοκόλλων. Έχει επίσης Wi-Fi και Bluetooth [27], όμως στο συγκεκριμένο αρχείο ESP_FLOW_TEMP.ino δεν χρησιμοποιείται καμία δικτυακή βιβλιοθήκη. Σε αυτή την έκδοση λειτουργεί ως τοπικός μικροελεγκτής μέτρησης και όχι ως IoT gateway.



Εικόνα 3.35: Απόσπασμα του schematic για ESP32 30-pin / ESP-WROOM-32.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημο ESP32-WROOM-32 datasheet - module architecture, pinout και peripheral schematic | Φωτογραφία ακριβούς ESP32-WROOM-32 module



Εικόνα 3.36: Ενδεικτική πλακέτα ανάπτυξης ESP32 με module ESP32-WROOM-32E· η φυσική διάταξη ακροδεκτών μπορεί να διαφέρει ανά board.

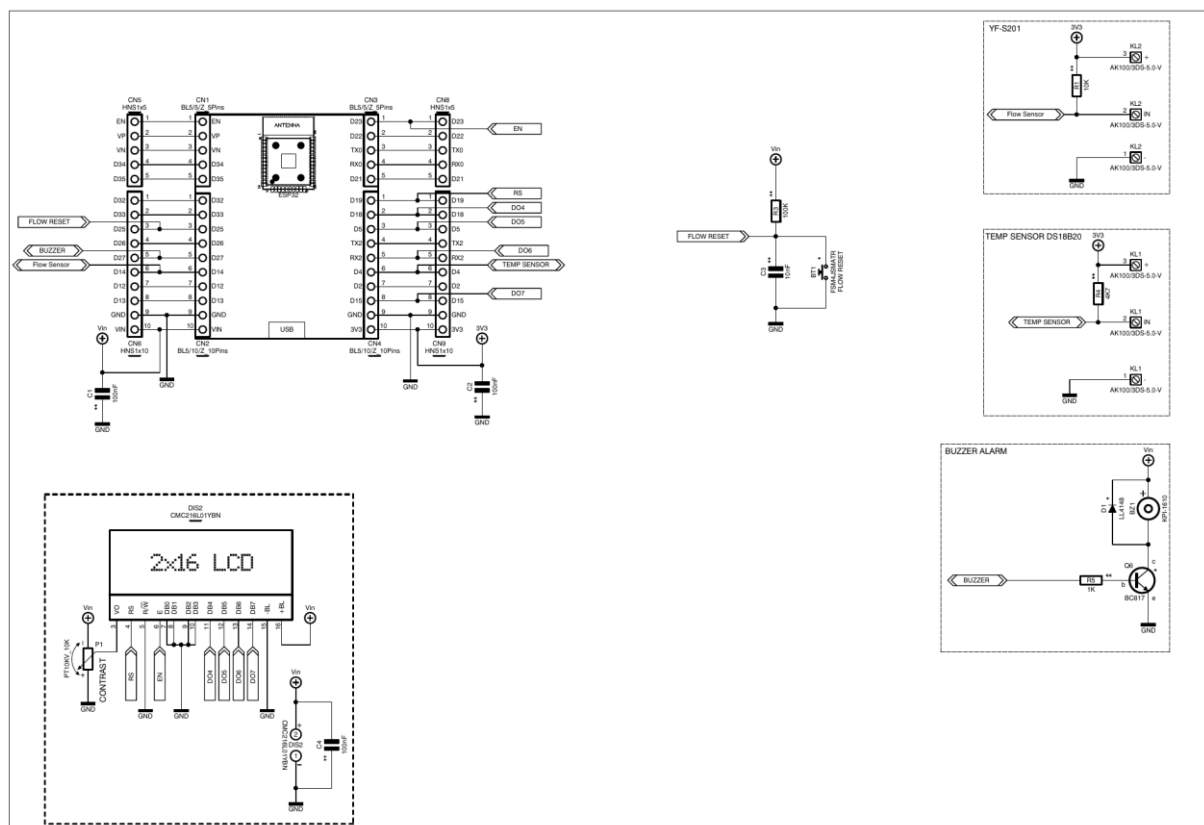
Πηγή εικόνας: ενδεικτική απεικόνιση development board με ESP32-WROOM-32E.

Η κατανομή των pins προκύπτει τόσο από το schematic όσο και από τον κώδικα. Ο YF-S201 συνδέεται στο GPIO14, ο DS18B20 στο GPIO4, το πλήκτρο στο GPIO25 και ο buzzer στο GPIO27. Η LCD 16×2 λειτουργεί σε 4-bit mode με RS=19, EN=23 και γραμμές D4=18, D5=5, D6=16, D7=15. Η επιλογή 4-bit mode μειώνει τον αριθμό GPIO που απαιτεί η οθόνη, με μικρό κόστος σε χρόνο μεταφοράς, το οποίο είναι αμελητέο για ανανέωση ανθρώπινης διεπαφής [32].

Πίνακας 3.3: Κατανομή GPIO του υποσυστήματος ESP32

Εξάρτημα	GPIO ESP32	Τύπος σήματος / ρόλος
YF-S201	14	Digital input, FALLING interrupt
DS18B20	4	1-Wire data
Reset/Menu button	25	Digital input, INPUT_PULLUP
KPEG110 piezo buzzer	27	Digital output προς driver BC817
LCD RS	19	Register Select
LCD EN	23	Enable

LCD D4	18	Data bit 4
LCD D5	5	Data bit 5
LCD D6	16	Data bit 6
LCD D7	15	Data bit 7

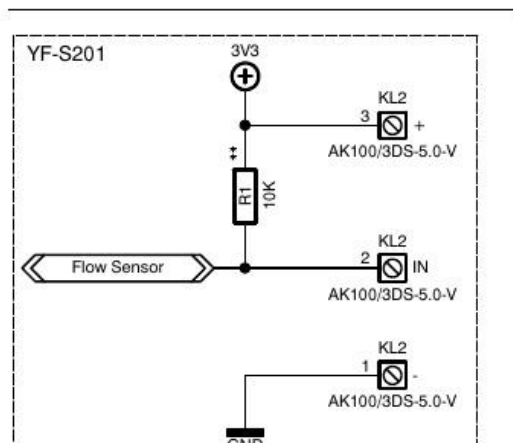


Εικόνα 3.37: Σχηματικό του υποσυστήματος ESP32 για ροή, θερμοκρασία και LCD.

Στο schematic του ESP32 είναι επίσης ορατός ο διαχωρισμός μεταξύ των connectors της development board και των εξωτερικών περιφερειακών. Η επιλογή headers διευκολύνει τις δοκιμές, επειδή το ESP32 μπορεί να αφαιρεθεί ή να αντικατασταθεί χωρίς επανακόλληση όλων των αισθητήρων. Για τελική κατασκευή πρέπει να ελεγχθούν η μηχανική συγκράτηση των connectors και η πολικότητα Vin/3V3/GND. Ειδικά κοντά σε σωληνώσεις νερού, οι αποσπώμενες συνδέσεις χρειάζονται σταθερή στήριξη ώστε κραδασμοί ή τράβηγμα καλωδίου να μην προκαλούν διακοπόμενες μετρήσεις.

3.8 Αισθητήρας ροής YF-S201 και φαινόμενο Hall

Ο YF-S201 είναι αισθητήρας ροής με εσωτερική φτερωτή και στοιχείο Hall. Η περιστροφή της φτερωτής μετατρέπεται σε ακολουθία ηλεκτρικών παλμών. Για τη συγκεκριμένη κατηγορία αισθητήρα δίνεται σχέση συχνότητας $F = 7,5 \cdot Q$, όπου F είναι η συχνότητα σε Hz και Q η παροχή σε L/min [31]. Άρα η στιγμιαία παροχή μπορεί να υπολογιστεί από τον αριθμό παλμών που παρατηρείται σε γνωστό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 3.38: Απόσπασμα του schematic για YF-S201 - αισθητήρας ροής.

Εικόνα 3.39: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Φωτογραφική αναφορά ακριβούς YF-S201

Στο τεχνικό υλικό η έξοδος χρησιμοποιείται ως open-collector. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται pull-up ώστε η γραμμή να έχει καθορισμένο HIGH όταν το εσωτερικό τρανζίστορ δεν άγει. Η σύνδεση pull-up προς 3,3 V προστατεύει το ESP32 από υψηλότερο λογικό επίπεδο. Στον κώδικα ενεργοποιείται επίσης INPUT_PULLUP. Επειδή το ακριβές ηλεκτρικό interface ενός συγκεκριμένου module πρέπει να επιβεβαιώνεται από το datasheet του, η τελική κατασκευή πρέπει να ελέγξει με παλμογράφο το επίπεδο HIGH/LOW και την ποιότητα των ακμών [31].

Για pull-up 10 kΩ προς 3,3 V, όταν η έξοδος τραβιέται στο GND το ρεύμα είναι περίπου 0,33 mA. Η τιμή αυτή είναι μικρή και δεν επιβαρύνει σημαντικά το κύκλωμα. Από πλευράς firmware, οι παλμοί μετρώνται με interrupt FALLING ώστε η κύρια loop να μην χρειάζεται να κάνει συνεχές polling. Η επίσημη τεκμηρίωση Arduino-ESP32 υποστηρίζει attachInterrupt σε GPIO με modes όπως FALLING και RISING [30].

Η ονομαστική σχέση 7,5 χρησιμοποιείται ως calibrationFactor στον κώδικα. Σε πραγματική εφαρμογή θα ήταν προτιμότερο να γίνει βαθμονόμηση με γνωστό όγκο νερού, επειδή η παροχή επηρεάζεται από πίεση, σωληνώσεις, βαλβίδες και ανοχές του αισθητήρα. Μια απλή διαδικασία είναι να περάσουν, για παράδειγμα, 1 ή 2 λίτρα που έχουν μετρηθεί με ογκομετρικό δοχείο και να

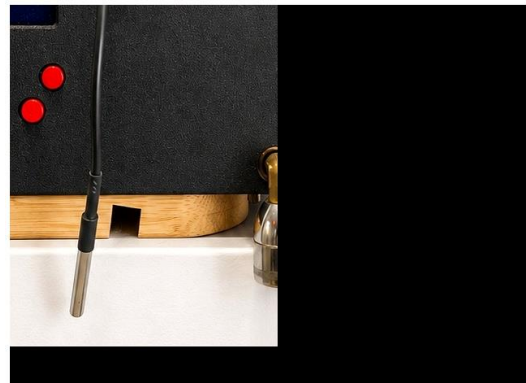
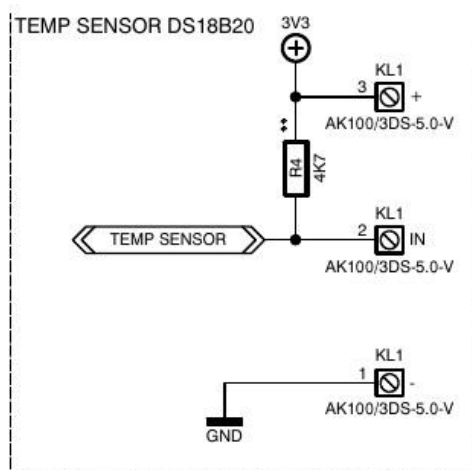
υπολογιστεί ο πραγματικός αριθμός παλμών ανά λίτρο. Έτσι ο calibrationFactor μετατρέπεται από γενική τιμή datasheet σε παράμετρο της συγκεκριμένης κατασκευής.



Εικόνα 3.40: Ο αισθητήρας ροής όπως έχει ενσωματωθεί στην πραγματική διάταξη μέτρησης παροχής και όγκου νερού.

3.9 DS18B20, LCD 16×2, πλήκτρο και buzzer

Ο DS18B20 είναι ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας με 1-Wire interface. Σύμφωνα με το datasheet, υποστηρίζει εύρος $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ακρίβεια $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ στην περιοχή $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ [28]. Η επικοινωνία 1-Wire επιτρέπει χρήση μίας μόνο γραμμής δεδομένων και στο schematic προβλέπεται pull-up $4,7\text{ k}\Omega$ προς $3,3\text{ V}$. Στο firmware χρησιμοποιούνται οι βιβλιοθήκες OneWire και DallasTemperature, ενώ η ανάγνωση γίνεται ανά δύο δευτερόλεπτα.

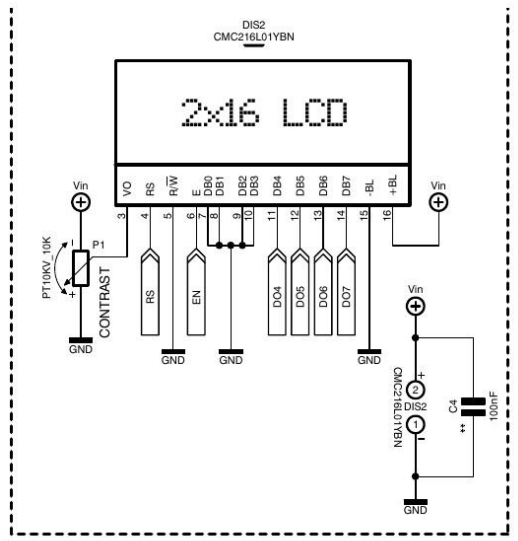


Εικόνα 3.41: Απόσπασμα του schematic για DS18B20 σε μεταλλική probe.

Εικόνα 3.42: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημο DS18B20 datasheet - block diagram και 1-Wire αρχιτεκτονική | Φωτογραφία DS18B20 σε αδιάβροχη μεταλλική probe

Η LCD 16×2 που αποτυπώνεται στο schematic είναι CMC216L01YBN [35] και οδηγείται σε 4-bit mode μέσω της βιβλιοθήκης LiquidCrystal [32]. Η οθόνη έχει δύο καταστάσεις: θερμοκρασία και ροή/συνολικό όγκο. Το πλήκτρο αλλάζει οθόνη με σύντομο πάτημα και μηδενίζει τον συνολικό όγκο με παρατεταμένο πάτημα άνω των τριών δευτερολέπτων. Η επιλογή αυτή επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα πλήκτρο για δύο λειτουργίες χωρίς σύνθετο menu.



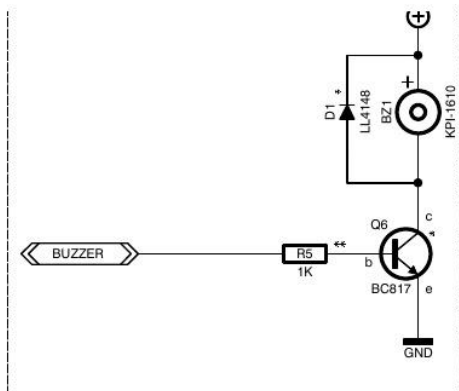
Εικόνα 3.43: Απόσπασμα του schematic για CMC216L01YBN - LCD 16×2.

Εικόνα 3.44: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Η ακριβής φωτογραφική τεκμηρίωση διατηρείται από την πραγματική κατασκευή· δεν προστέθηκε γενική 16×2 LCD.

Στο κύκλωμα του πλήκτρου υπάρχει RC φίλτρο με $R3=100\text{ k}\Omega$. Στο schematic η $C3$ αποτυπώνεται ως 10 nF , άρα $\tau \approx 1\text{ ms}$. Σε τεχνική σημείωση της ίδιας σχεδίασης αναφέρεται $C3=100\text{ nF}$ και $\tau \approx 10\text{ ms}$. Επειδή οι δύο καταγραφές διαφέρουν, στην εργασία θεωρείται πρωτεύον το schematic και η τελική τοποθετημένη τιμή πρέπει να επιβεβαιωθεί από το BOM ή την πλακέτα. Το firmware εφαρμόζει επιπλέον χρονική μέτρηση του πατήματος, οπότε η απόσβεση βασίζεται σε hardware και software debounce.

Ο buzzer KPEG110 [36] δεν οδηγείται απευθείας από το GPIO. Το BC817 λειτουργεί ως NPN switch και η $R5=1\text{ k}\Omega$ περιορίζει το ρεύμα βάσης. Με περίπου $3,3\text{ V}$ στην έξοδο και $V_{BE} \approx 0,7\text{ V}$, το ρεύμα βάσης εκτιμάται σε $2,6\text{ mA}$. Η LL4148 λειτουργεί ως διάδος προστασίας στη βαθμίδα οδήγησης. Οι συναρτήσεις `beep()` και `doubleBeep()` χρησιμοποιούνται ως ηχητική επιβεβαίωση αλλαγής οθόνης και reset.



Εικόνα 3.45: Απόσπασμα του schematic για KPEG110 + BC817 driver.

Εικόνα 3.46: Φωτογραφία του εξαρτήματος στην πραγματική κατασκευή.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημος κατάλογος Kingstate - KPEG110 | KPEG110 datasheet / appearance drawing | Φωτογραφία ακριβούς KPEG110



Εικόνα 3.47: Ο μεταλλικός αισθητήρας θερμοκρασίας της πραγματικής κατασκευής, συνδεδεμένος με το υποσύστημα μέτρησης.

3.10 Σχεδίαση PCB και τρισδιάστατα αρχεία flowmeter

Το PCB πρέπει να αντιμετωπίζεται ταυτόχρονα ως ηλεκτρικό και μηχανικό αντικείμενο. Οι διαδρομές μεταφέρουν ρεύμα, οι αποστάσεις καθορίζουν αντοχή σε τάση και οι οπές καθορίζουν πώς θα στερεωθεί η πλακέτα. Σε κύκλωμα που περιλαμβάνει 230 V AC, ο φυσικός διαχωρισμός της περιοχής δικτύου από τη χαμηλή τάση είναι σημαντικός. Το IPC-2221 παρέχει γενικές αρχές σχεδίασης printed boards [21], ενώ για οικιακές συσκευές η συνολική ασφάλεια συνδέεται και με IEC 60335 [19], [20].

Τα fabrication screenshots παρουσιάζουν τη σχεδίαση του PCB. Δεν εμφανίζουν ξεχωριστά τα copper routing layers, άρα δεν περιγράφεται η ακριβής πορεία των χαλκοδιαδρομών. Τα mask, silkscreen, paste, outline και drill layers αρκούν για αξιολόγηση χωροθέτησης και μηχανικής προετοιμασίας.

Η φυσική διάταξη της πλακέτας πρέπει να υποστηρίζει τον λειτουργικό διαχωρισμό του schematic. Η περιοχή του πρωτεύοντος και των επαφών δικτύου χρειάζεται να αντιμετωπίζεται διαφορετικά από την περιοχή 3,3 V του PIC. Η ύπαρξη μετασχηματιστή παρέχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, όμως η απομόνωση αυτή πρέπει να συνεχίζεται και στο PCB με κατάλληλη χωροθέτηση, αποστάσεις και μηχανική προστασία. Τα γενικά κριτήρια printed-board design περιγράφονται από το IPC-2221 [21], ενώ για τελικό οικιακό προϊόν η αξιολόγηση συνδέεται με τις απαιτήσεις IEC 60335 [19], [20]. Στην παρούσα εργασία αυτά τα πρότυπα χρησιμοποιούνται ως πλαίσιο τεχνικής συζήτησης και όχι ως δήλωση πιστοποίησης.

Τα fabrication screenshots βοηθούν να γίνει κατανοητή η μετάβαση από το ηλεκτρονικό σχέδιο στην πραγματική πλακέτα. Το silkscreen δείχνει πού τοποθετούνται τα εξαρτήματα και ποιες σημάνσεις θα είναι διαθέσιμες στον τεχνικό. Το solder mask καθορίζει πού ο χαλκός μένει εκτεθειμένος για συγκόλληση, ενώ το solder paste layer αφορά κυρίως τα SMD σημεία που θα δεχθούν πάστα κατά την παραγωγή. Τα PTH και NPTH drill files ξεχωρίζουν τις ηλεκτρικά επιμεταλλωμένες οπές από τις καθαρά μηχανικές. Ακόμη και χωρίς copper Gerbers, τα layers αυτά αποδεικνύουν ότι η σχεδίαση έχει φτάσει σε επίπεδο προετοιμασίας για κατασκευή και όχι μόνο σε θεωρητικό schematic [21].

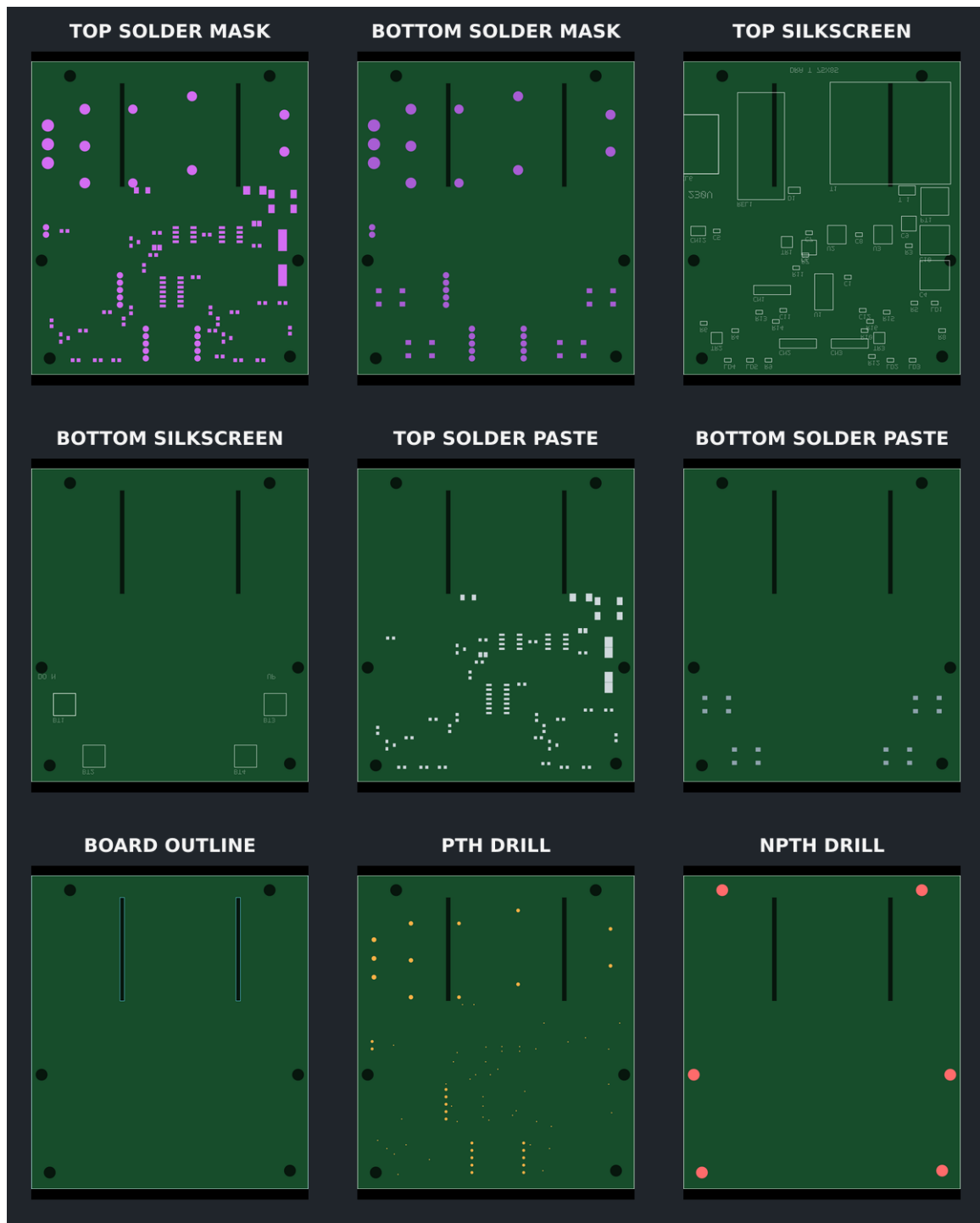
Τα fabrication layers έχουν διαφορετικό ρόλο. Το solder mask καθορίζει πού θα υπάρχει άνοιγμα στο προστατευτικό βερνίκι για pads. Το solder paste layer χρησιμοποιείται για το stencil συναρμολόγησης SMD και εμφανίζει τα σημεία όπου θα τοποθετηθεί πάστα κόλλησης. Το silkscreen περιέχει περιγράμματα, reference designators και πληροφορίες συναρμολόγησης.

Το board outline καθορίζει το τελικό μηχανικό σχήμα, ενώ τα PTH και NPTH drill files ξεχωρίζουν επιμεταλλωμένες και μη επιμεταλλωμένες οπές. Η διάκριση είναι ουσιαστική: ένα PTH μπορεί να είναι ηλεκτρική σύνδεση ή ακροδέκτης through-hole, ενώ ένα NPTH χρησιμοποιείται

κυρίως για μηχανική στερέωση ή οδηγό. Στο κεφάλαιο 4 τα συγκεκριμένα screenshots παρουσιάζονται ένα προς ένα και συνδέονται με το πραγματικό schematic.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά εξαρτήματα που προκύπτουν από το schematic και το τεχνικό υλικό. Ο πίνακας δεν είναι πλήρης BOM παραγωγής, αλλά λειτουργική καταγραφή των στοιχείων που είναι σημαντικά για την ανάλυση.

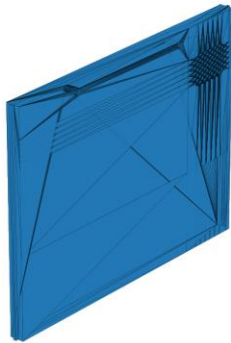
Το fabrication set περιλαμβάνει solder mask, silkscreen, solder paste, board outline και PTH/NPTH drill. Τα copper routing layers δεν παρουσιάζονται ξεχωριστά, άρα η αξιολόγηση περιορίζεται στη γεωμετρία, στη σήμανση και στις οπές χωρίς υποθέσεις για πλάτη ή αποστάσεις χαλκοδιαδρομών.



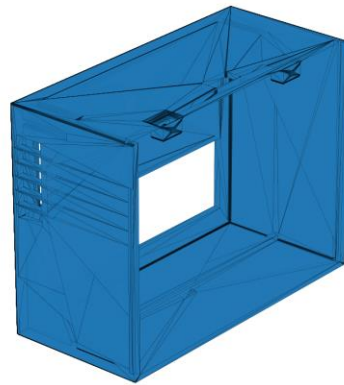
Εικόνα 3.48: Συνοπτική απεικόνιση των fabrication layers της πρωτότυπης πλακέτας.

Τα δύο αρχεία STL αφορούν μηχανικά μέρη του flowmeter. Η ανάλυση του mesh έδειξε εξωτερικές διαστάσεις περίπου 83,6×4×84 mm για το FLOWMETER_BOTTOM_001 και 86×40×86 mm για το FLOWMETER_002_V2. Οι διαστάσεις προκύπτουν απευθείας από τα μοντέλα. Από μόνα τους τα STL δεν περιγράφουν υλικό εκτύπωσης, ανοχές συναρμογής ή στεγανότητα, οπότε αυτές οι παράμετροι δεν θεωρούνται δεδομένες.

FLOWMETER BOTTOM



FLOWMETER BODY



*Εικόνα 3.49: Ισομετρική απόδοση του
FLOWMETER_BOTTOM_001.STL.*

*Εικόνα 3.50: Ισομετρική απόδοση του
FLOWMETER_002_V2.STL.*

Η 3D εκτύπωση κοντά σε κύκλωμα νερού απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Ένα τυπωμένο μέρος μπορεί να λειτουργεί ως βάση, κάλυμμα ή στήριξη, όμως δεν πρέπει να θεωρείται αυτόματα κατάλληλο για πίεση ή επαφή με πόσιμο νερό. Η τελική χρήση εξαρτάται από υλικό, μέθοδο εκτύπωσης, πάχος τοιχωμάτων, στεγανοποίηση και σχεδιαστική πρόθεση. Στην εργασία τα STL παρουσιάζονται ως μέρος της μηχανικής ανάπτυξης και όχι ως πιστοποιημένα υδραυλικά εξαρτήματα.

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση, Λειτουργία και Τεχνική Αποτίμηση

Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει πώς συνεργάζονται στην πράξη τα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής. Η θεωρία συνδέεται με τις πραγματικές ακολουθίες λειτουργίας, το firmware και τις μετρήσιμες σχέσεις. Παρουσιάζονται διαγράμματα ροής, αποσπάσματα του πραγματικού κώδικα, η λειτουργία των interfaces, τα fabrication layers και οι βασικοί έλεγχοι που χρειάζονται πριν προχωρήσουν οι δοκιμές του πρωτοτύπου.

Το κεφάλαιο αυτό είναι το κύριο πρακτικό μέρος της εργασίας. Οι θεωρητικές έννοιες συνδέονται με τις πραγματικές διαδρομές σημάτων και με την ακολουθία λειτουργίας. Για την πλακέτα PIC εξετάζεται τι συμβαίνει από την εφαρμογή της τροφοδοσίας μέχρι την ενεργοποίηση ή την απενεργοποίηση του ρελέ. Για τη μονάδα ESP32 παρουσιάζεται πώς οι παλμοί του flow sensor μετατρέπονται σε παροχή και όγκο, πώς διαβάζεται η θερμοκρασία και πώς οι πληροφορίες εμφανίζονται και αποθηκεύονται.

Παρουσιάζονται επίσης τα αρχεία PCB και οι βασικοί ηλεκτρικοί υπολογισμοί, ώστε η λειτουργία να ελέγχεται και με πραγματικά τεχνικά στοιχεία. Η ανάλυση καλύπτει σημεία όπως το περιθώριο τάσης των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, το ρεύμα των LED, η θερμική απώλεια του γραμμικού σταθεροποιητή και η σωστή αναφορά των GPIO του ESP32 στα 3,3 V. Αυτά τα σημεία δείχνουν πού χρειάζεται επιπλέον έλεγχος ή βελτίωση στο πρωτότυπο.

Η πρακτική αποτίμηση βασίζεται σε όσα μπορούν να ελεγχθούν άμεσα. Στην κύρια πλακέτα εξετάζονται οι τάσεις, οι λογικές στάθμες και η κατάσταση του ρελέ. Στο ESP32 μπορούν να ελεγχθούν οι παλμοί, οι τιμές της LCD και η αποθήκευση του totalLiters. Τα fabrication files και τα STL χρησιμοποιούνται ως στοιχεία της σχεδίασης και δεν υποκάνουν τις πραγματικές μετρήσεις. Έτσι γίνεται σαφής διάκριση ανάμεσα σε λειτουργικά αποτελέσματα και σε σχεδιαστικό υλικό.

4.1 Διαγράμματα ροής και ακολουθία λειτουργίας του συστήματος

Κατά την εφαρμογή της τροφοδοσίας, ο μετασχηματιστής δημιουργεί τη χαμηλή AC τάση, η γέφυρα και οι πυκνωτές σχηματίζουν τη γραμμή περίπου 13,5 V και ο 78L33A παρέχει 3,3 V. Ο PIC εξέρχεται από reset και πρέπει να ορίσει άμεσα τις εξόδους του σε γνωστή κατάσταση. Ακολουθεί αρχικοποίηση θυρών, ADC, χρονιστών και της LCD.

Η σειρά αυτή είναι σημαντική επειδή η έξοδος Rel_control επηρεάζει το πηνίο του ρελέ. Η ασφαλής αρχικοποίηση πρέπει να προηγείται των υπόλοιπων μη κρίσιμων λειτουργιών. Μετά την αρχικοποίηση η LCD μπορεί να εμφανίσει την αρχική επιλογή και το firmware να περάσει στον κύριο βρόχο ανάγνωσης πλήκτρων.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν συνοπτικά τη βασική λειτουργία του PIC και τον κύριο βρόχο του ESP32.

Ο κύριος βρόχος διαβάζει περιοδικά τις RC3 και RA2 μέσω του ADC. Τάση κοντά στα 3,3 V σημαίνει ότι κανένα πλήκτρο της αντίστοιχης ομάδας δεν πατήθηκε. Η ενδιάμεση τάση περίπου 1,65 V αντιστοιχεί στα UP ή DOWN, ενώ η τιμή κοντά στο μηδέν αντιστοιχεί στα πλήκτρα 1 ή 2.

Στην πράξη πρέπει να χρησιμοποιούνται ranges και debounce. Για παράδειγμα, η ενδιάμεση περιοχή μπορεί να οριστεί αρκετά πλατιά ώστε να καλύπτει ανοχές αντιστάσεων και θόρυβο. Μετά την επιβεβαίωση του πλήκτρου, το firmware αλλάζει χρόνο ή επιλογή και ενημερώνει την LCD.

Με την έναρξη δοσομέτρησης, το firmware θέτει το Rel_control σε ενεργή κατάσταση και τροφοδοτεί το πηνίο του ρελέ μέσω του TR1. Το πραγματικό G2RL-1A-E έχει επαφή SPST-NO, άρα η επαφή ισχύος κλείνει όταν ενεργοποιείται το πηνίο και ανοίγει όταν το πηνίο απενεργοποιείται. Η τελική αντιστοίχιση αυτής της επαφής με την ηλεκτροβάννα πρέπει να επιβεβαιώνεται από την πραγματική καλωδίωση της κατασκευής.

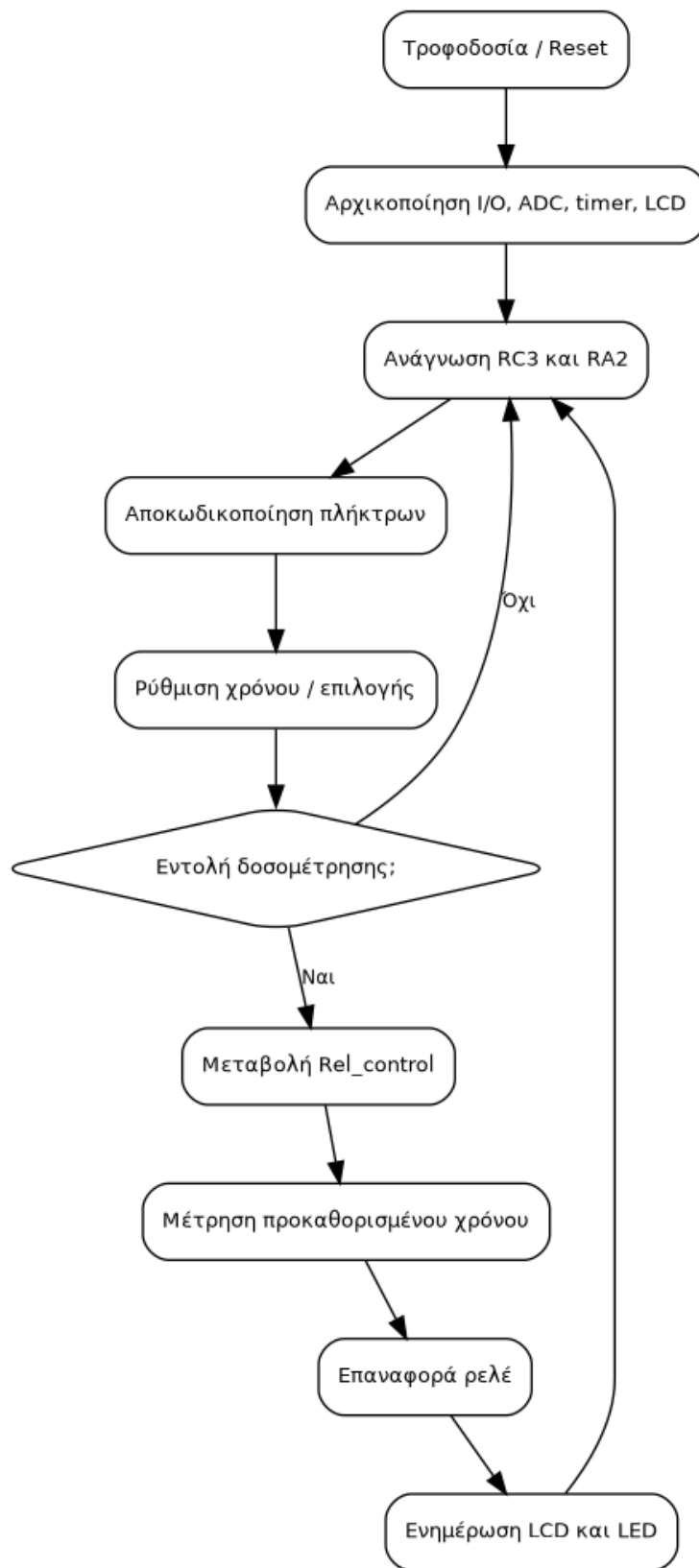
Ο timer μετρά τον επιλεγμένο χρόνο και το firmware μπορεί να ενημερώνει την LCD ή τα LEDs. Όταν ο χρόνος λήξει, η έξοδος επιστρέφει στην προβλεπόμενη κατάσταση. Η διαδικασία πρέπει να παραμένει σωστή ακόμη και αν ο χρήστης πατήσει reset ή αν προκύψει watchdog reset, γι' αυτό η ασφαλής κατάσταση του relay path πρέπει να καθορίζεται σε επίπεδο hardware και firmware.

Η διαδικασία ICSP αποτελεί μέρος της πρακτικής υλοποίησης, επειδή επιτρέπει αλλαγές του firmware χωρίς αποκόλληση του PIC. Η πλακέτα πρέπει να είναι αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο. Ο PICkit συνδέεται στον CN1 σύμφωνα με τα ονόματα σημάτων και όχι μόνο με τη γεωμετρική σειρά των καλωδίων.

Μετά την επιλογή του PIC16F1825 στο MPLAB IPE γίνεται έλεγχος τάσης στόχου, αναγνώριση του device ID, φόρτωση του HEX και Program/Verify [3], [4]. Η τελική δοκιμή προτείνεται πρώτα σε

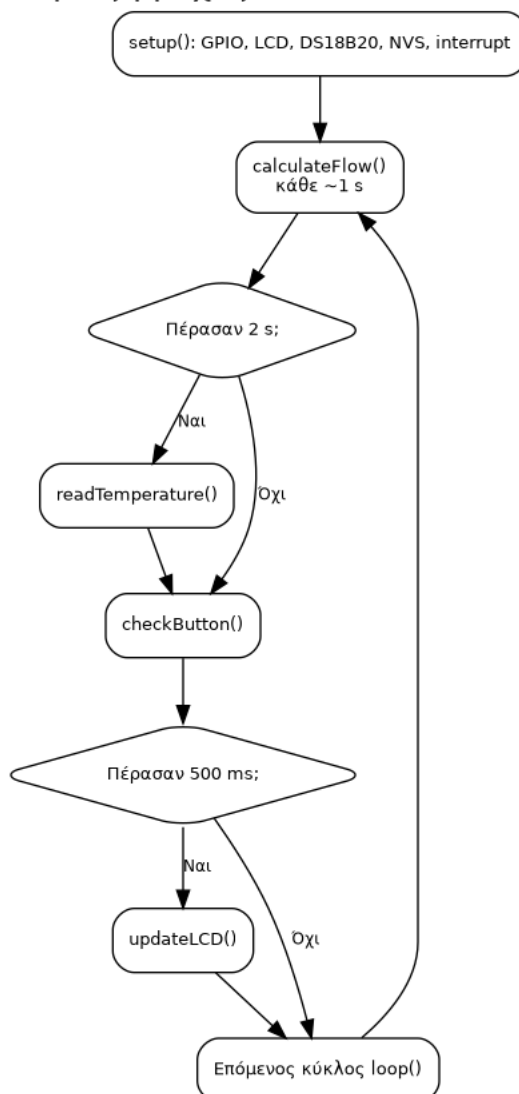
ασφαλή χαμηλή τάση. Η πρακτική αυτή μειώνει τον κίνδυνο κατά το debugging και βοηθά να ελεγχθεί η λογική πριν ενεργοποιηθεί το τμήμα δικτύου.

Λειτουργική ακολουθία ελεγκτή ηλεκτροβάνας



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής της βασικής λειτουργίας του PIC και της ηλεκτροβάνας.

Κύριος βρόχος firmware ESP32



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα ροής του κύριου βρόχου του ESP32.

Τα δύο διαγράμματα αναδεικνύουν διαφορετικό προγραμματιστικό μοντέλο. Στον PIC η λογική οργανώνεται γύρω από τις εντολές χρήστη και τον χρονισμό ενεργοποιητή. Στο ESP32 η loop εκτελεί πολλές περιοδικές εργασίες με διαφορετικά χρονικά διαστήματα: παροχή κάθε περίπου 1 s, θερμοκρασία κάθε 2 s και ανανέωση LCD κάθε 500 ms. Το πλήκτρο ελέγχεται συνεχώς ώστε να ανιχνεύεται και το παρατεταμένο πάτημα.

Ο βασικός χρονισμός του ESP32 χρησιμοποιεί διαφορές `millis()` αντί για εκτεταμένα `delay()`, ώστε οι εργασίες μέτρησης, χειρισμού πλήκτρου και ανανέωσης της LCD να προγραμματίζονται ανεξάρτητα. Υπάρχουν μικρά `delay()` στις ηχητικές ενδείξεις και στο μήνυμα reset. Επιπλέον, η κλήση `requestTemperatures()` της DallasTemperature στην τυπική σύγχρονη λειτουργία περιμένει την ολοκλήρωση της μετατροπής του DS18B20 και μπορεί να εισαγάγει αισθητό blocking χρόνο, ο οποίος στη μέγιστη ανάλυση του αισθητήρα μπορεί να φθάσει περίπου τα 750 ms [28]. Για μια πιο

απαιτητική έκδοση θα ήταν προτιμότερη ασύγχρονη μετατροπή θερμοκρασίας και πλήρως μη blocking ηχητικές ενδείξεις.

4.2 Πρακτική λειτουργία της πλακέτας PIC16F1825

Στο συνολικό schematic διακρίνονται ο PIC στο άνω αριστερό τμήμα, τα πλήκτρα και οι οδηγοί τρανζίστορ, η βαθμίδα μετασχηματιστή/γέφυρας/πυκνωτών, οι ρυθμιστές U2 και U3 και οι connectors προς LCD και ICSP. Οι ετικέτες net επιτρέπουν τη σύνδεση απομακρυσμένων σημείων χωρίς συνεχή γραμμή, κάτι που διατηρεί το σχέδιο αναγνώσιμο.

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη διάκριση COM και GND. Το COM του ρελέ είναι ελεγχόμενη έξοδος δικτύου και μπορεί να βρίσκεται στα 230 V AC, ενώ το GND είναι σημείο αναφοράς της χαμηλής τάσης. Η ομοιότητα των ονομάτων σε ένα γρήγορο οπτικό έλεγχο μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνη παρανόηση.

Το πλήρες ηλεκτρονικό schematic της πλακέτας παρουσιάζεται στο Εικόνα 3.34.1 και επαναλαμβάνεται σε μεγαλύτερη κλίμακα στο Παράρτημα Γ.

Η ανάγνωση του συνολικού σχεδίου γίνεται πιο εύκολη όταν χωριστεί σε ροές ενέργειας και ροές σημάτων. Η ενέργεια ξεκινά από L και N, υποβιβάζεται από τον T1, ανορθώνεται στην PT1 και διανέμεται στις γραμμές 13,5 V και 3,3 V. Τα σήματα, αντίθετα, ξεκινούν κυρίως από τα πλήκτρα και τον PIC: οι ADC είσοδοι μετατρέπουν τα πατήματα σε ψηφιακή πληροφορία, ο μικροελεγκτής ενημερώνει την LCD και παράγει τις εξόδους Rel_control, LED UP και LED DOWN. Η διάκριση αυτή βοηθά στη διάγνωση, επειδή ένα πρόβλημα τροφοδοσίας επηρεάζει πολλές λειτουργίες ταυτόχρονα, ενώ ένα πρόβλημα σε μία γραμμή ελέγχου μπορεί να περιορίζεται σε ένα μόνο υποσύστημα.

Η τροφοδοσία ξεκινά από την κλέμμα KL6. Οι L και N οδηγούν το πρωτεύον του T1, ενώ η γραμμή ισχύος προς την ηλεκτροβάννα μεταγωγίζεται μέσω της επαφής του REL1. Στο δευτερεύον η TVS περιορίζει transients και η PT1 ανορθώνει. Οι C4/C10 δημιουργούν τον κύριο ενεργειακό αποθηκευτή της γραμμής DC. Στην υλοποιημένη πλακέτα το REL1 είναι Omron G2RL-1A-E με επαφή SPST-NO.

Η σχεδίαση είναι απλή και ευκολότερη στην επισκευή από ένα switching supply, αλλά έχει δύο περιορισμούς. Πρώτον, η τάση DC μεταβάλλεται αισθητά με το φορτίο. Δεύτερον, οι μεγάλοι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν ονομαστική τάση 16 V, η οποία βρίσκεται σχετικά κοντά στη μετρούμενη τιμή έως 14 V. Για νέα έκδοση προτείνεται 25 V ώστε να υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο σε ανοχές και transients.

Από άποψη λειτουργικής ακολουθίας, η τροφοδοσία πρέπει να θεωρείται η πρώτη βαθμίδα που ελέγχεται κατά την εκκίνηση ή τη διάγνωση. Αν δεν υπάρχει σωστή γραμμή DC μετά την PT1, δεν έχει νόημα να εξετάζεται firmware ή LCD. Αφού επιβεβαιωθεί η ανορθωμένη τάση, ο επόμενος έλεγχος είναι η σταθερή έξοδος 3,3 V του U2 και στη συνέχεια το ρεύμα του κλάδου backlight μέσω

U3. Αυτή η σειρά δημιουργεί μία πρακτική διαδικασία troubleshooting: δίκτυο και μετασχηματιστής, ανόρθωση και φίλτρο, 13,5 V, 3,3 V, reset PIC και τέλος περιφερειακά.

Οι πυκνωτές C4 και C10 παίζουν διπλό ρόλο. Από τη μία μειώνουν την κυμάτωση, από την άλλη παρέχουν στιγμιαία ενέργεια όταν αλλάζει το φορτίο, για παράδειγμα όταν ενεργοποιείται το πηνίο του ρελέ ή μεταβάλλεται ο φωτισμός. Η συνολική χωρητικότητα είναι περίπου 940 μF . Με πλήρη ανόρθωση σε δίκτυο 50 Hz, η κυμάτωση επαναλαμβάνεται στα 100 Hz και η πρώτη εκτίμηση της μεταβολής τάσης δίνεται από τη σχέση $\Delta V \approx I/(fC)$. Η σχέση δεν αντικάνει τη μέτρηση, αλλά εξηγεί γιατί μεγαλύτερο ρεύμα φορτίου ή μικρότερη χωρητικότητα αυξάνει την πτώση ανάμεσα στις κορυφές. Αυτό συνδέεται άμεσα με τις μετρήσεις 13,5-14 V χωρίς σημαντικό φορτίο και περίπου 12 V όταν η κατανάλωση αυξάνεται.

Το Rel_control οδηγεί τη βάση του TR1 μέσω $R7=1\text{ k}\Omega$. Όταν το TR1 άγει, το πηνίο του Omron G2RL-1A-E 12 VDC τροφοδοτείται και η κανονικά ανοικτή επαφή του ρελέ κλείνει. Όταν το TR1 είναι off, το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα και η επαφή επιστρέφει στην ανοικτή κατάσταση. Η ακριβής διαδρομή του φορτίου επιβεβαιώνεται από την πραγματική καλωδίωση της πλακέτας.

Η ηλεκτροβάνα πρέπει να εξεταστεί ως προς την πραγματική ασφαλή κατάσταση της πλήρους καλωδίωσης. Σε reset του PIC ή απώλεια της 3,3 V, το ζητούμενο είναι η επαφή του ρελέ και η βαλβίδα να καταλήγουν σε προβλέψιμη κατάσταση. Η αξιολόγηση αυτή πρέπει να βασίζεται στο πραγματικό G2RL-1A-E και όχι σε γενικό σύμβολο SPDT.

Ο συνδυασμός PIC, R7, TR1, D1 και REL1 αποτελεί πλήρη αλυσίδα οδήγησης επαγωγικού φορτίου. Η έξοδος του PIC παρέχει μόνο ρεύμα βάσης της τάξης των 2,6 mA. Ο BC847B λειτουργεί ως low-side switch και αναλαμβάνει το ρεύμα του πηνίου, το οποίο για το G2RL-1A-E 12 VDC είναι ονομαστικά περίπου 33,3 mA [7], [10]. Όταν ο TR1 διακόψει, η LL4148 παρέχει διαδρομή εκτόνωσης για το επαγωγικό ρεύμα και περιορίζει την καταπόνηση του τρανζίστορ [8].

Η ύπαρξη της flyback διόδου είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα εξαρτήματος που δεν συμμετέχει στη «φυσιολογική» λειτουργία με προφανή τρόπο, αλλά είναι κρίσιμο για την αξιοπιστία. Όσο το πηνίο τροφοδοτείται, η D1 είναι ανάστροφα πολωμένη και ουσιαστικά αδρανής. Η χρησιμότητά της εμφανίζεται ακριβώς τη στιγμή της απενεργοποίησης. Το ίδιο ισχύει και για άλλα στοιχεία προστασίας της πλακέτας, όπως η TVS στο δευτερεύον: η σωστή σχεδίαση δεν εξετάζει μόνο τι συμβαίνει στην κανονική κατάσταση, αλλά και τι συμβαίνει στις μεταβάσεις, στα reset και στις στιγμιαίες υπερτάσεις.

Ο PIC βρίσκεται ανάμεσα στη διεπαφή χρήστη και στους ενεργοποιητές. Η RA5 οδηγεί το ρελέ, η RC4 την ένδειξη UP και η RA0 την DOWN. Οι RC3 και RA2 είναι αναλογικές είσοδοι. Η θόνη χρησιμοποιεί RC0, RC1, RC2, RC5 και RA4. Έτσι σχεδόν όλοι οι διαθέσιμοι ακροδέκτες έχουν αξιοποιηθεί.

Η υψηλή αξιοποίηση pins εξηγεί την επιλογή analog button encoding και την κοινή χρήση RA0/RA1 με ICSP. Το πλεονέκτημα είναι ο μικρός 14-pin controller και το χαμηλό κόστος. Το μειονέκτημα είναι ότι μια άμεση επέκταση της ίδιας πλακέτας, όπως η σύνδεση του YF-S201 απευθείας στον PIC ή η προσθήκη επιπλέον relay, θα απαιτούσε multiplexing, I/O expander ή μεγαλύτερο μικροελεγκτή. Στην κατασκευή αυτός είναι ένας από τους λόγους που το υποσύστημα μέτρησης υλοποιείται ξεχωριστά με ESP32.

Το ξεχωριστό schematic της LCD αποσαφηνίζει ότι η οθόνη έχει περισσότερες εσωτερικές γραμμές από όσες εμφανίζονται στον connector της κύριας πλακέτας. Οι D0-D7, οι γραμμές control και τα σημεία charge pump ανήκουν στον controller της LCD, ενώ η εφαρμογή χρησιμοποιεί σειριακή λειτουργία ώστε να περιορίσει τα απαιτούμενα pins.

Οι C27-C30 των 4,7 μF σχετίζονται με την εσωτερική παραγωγή τάσεων LCD και οι C32-C35 των 100 nF με αποσύζευξη. Η ύπαρξη ξεχωριστών backlight cathode/anode επιτρέπει στην πηγή 60 mA να λειτουργεί ανεξάρτητα από τη λογική.

Η διασύνδεση της γραφικής LCD 128×64 παρουσιάζεται στο Εικόνα 3.34.

Η διεπαφή της πλακέτας περιλαμβάνει γραφική LCD, τέσσερα αναλογικά κωδικοποιημένα πλήκτρα για επιλογή/ρύθμιση δόσης και ξεχωριστό πλήκτρο START στην RA3. Ο πραγματικός κώδικας επιβεβαιώνει ότι τα πλήκτρα 1 και 2 επιλέγουν αντίστοιχα τη μονή και τη διπλή δόση, ενώ τα UP και DOWN αυξάνουν ή μειώνουν τον επιλεγμένο χρόνο. Οι αρχικές τιμές είναι 1550 ms για τη μονή δόση και 4000 ms για τη διπλή. Ταυτόχρονο πάτημα των πλήκτρων επιλογής μονής και διπλής δόσης εναλλάσσει τη μεταβλητή lock_doses, ώστε να κλειδώνει ή να ξεκλειδώνει η δυνατότητα μεταβολής των χρόνων.

Η γραφική οθόνη προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία από μία απλή seven-segment ένδειξη. Μπορεί να εμφανίσει κείμενο, εικονίδια και διαφορετικές καταστάσεις χωρίς αλλαγή hardware. Το κόστος είναι πιο σύνθετο firmware και ανάγκη charge pump/backlight. Για μελλοντική έκδοση θα μπορούσε να αξιολογηθεί OLED 128×64, αλλά αυτό θα άλλαζε connector, τροφοδοσία και λογισμικό.

Για καλή εμπειρία χρήσης, η οθόνη πρέπει να επιβεβαιώνει άμεσα κάθε αποδεκτό πάτημα και να ξεχωρίζει καθαρά κατάσταση αναμονής, ρύθμισης και ενεργής δοσομέτρησης. Τα LED UP/DOWN μπορούν να λειτουργούν ως πρόσθετη οπτική ένδειξη, ιδιαίτερα όταν ο χρήστης δεν κοιτά συνεχώς την LCD. Έτσι δημιουργείται πλεονασμός πληροφόρησης: η οθόνη παρέχει λεπτομέρεια, ενώ τα LED δίνουν γρήγορη επιβεβαίωση της κατεύθυνσης ή της κατάστασης. Η ίδια φιλοσοφία μπορεί να διατηρηθεί και σε μελλοντική δικτυωμένη έκδοση, ώστε η τοπική διεπαφή να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και χωρίς σύνδεση.

Η λογική των τεσσάρων αναλογικών πλήκτρων είναι σαφώς ορισμένη στο firmware. Η είσοδος RC3/AN7 χρησιμοποιείται για το πλήκτρο διπλής δόσης και το DOWN, ενώ η RA2/AN2 για το πλήκτρο μονής δόσης και το UP. Τιμή ADC μικρότερη από 256 αναγνωρίζεται ως πάτημα του

πλήκτρου επιλογής της αντίστοιχης δόσης, ενώ τιμή από 256 έως 767 αναγνωρίζεται ως DOWN ή UP. Τιμές από 768 και πάνω χρησιμοποιούνται ως κατάσταση χωρίς ενεργό πλήκτρο στη συγκεκριμένη γραμμή.

Ο κύριος βρόχος του firmware δεν γίνεται ως γενική state machine. Εκτελεί επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία των δύο ADC καναλιών, ενημερώνει την επιλεγμένη δόση και τους χρόνους, ελέγχει το πλήκτρο START και ανανεώνει την LCD όταν απαιτείται. Στο τέλος κάθε επανάληψης εφαρμόζεται καθυστέρηση 20 ms. Με την ενεργοποίηση του START καλείται η συνάρτηση pump(), η οποία αναλαμβάνει αποκλειστικά τον κύκλο εκχύλισης για τη διάρκεια της επιλεγμένης δόσης.

Κατά τη διάρκεια της pump() το ρελέ τίθεται σε ενεργή κατάσταση και ο κώδικας παραμένει σε βρόχο έως ότου ο elapsed χρόνος φθάσει τη ζητούμενη διάρκεια. Μέσα στον ίδιο βρόχο ενημερώνονται η γραφική στάθμη πλήρωσης του αντίστοιχου κυπέλλου και η αντίστροφη μέτρηση στην LCD. Μετά την ολοκλήρωση, το ρελέ απενεργοποιείται και επαναφέρεται στην οθόνη ο αποθηκευμένος χρόνος της δόσης. Κατά τον συγκεκριμένο κύκλο δεν εκτελείται νέα ανάγνωση των πλήκτρων του κύριου βρόχου, άρα η υλοποίηση είναι σκόπιμα απλή και κατά τη δοσομέτρηση λειτουργεί blocking ως προς τη διεπαφή.

Τα thresholds του ADC είναι καθορισμένα απευθείας στον κώδικα ως 256 και 768 για μετατροπή 10 bit. Με αναφορά περίπου 3,3 V, τα όρια αντιστοιχούν θεωρητικά σε περίπου 0,83 V και 2,48 V. Η σχεδίαση τοποθετεί έτσι την ενδιάμεση στάθμη του διαιρέτη, περίπου 1,65 V, με μεγάλο περιθώριο ανάμεσα στα δύο thresholds, ώστε να αναγνωρίζεται αξιόπιστα ως διαφορετική εντολή από το άμεσο βραχυκύκλωμα προς GND.

Η βασική αντιμετώπιση της μηχανικής αναπήδησης των πλήκτρων γίνεται με την καθυστέρηση 20 ms του κύριου βρόχου. Επιπλέον, μετά την εναλλαγή του lock_doses εκτελείται καθυστέρηση 20 ms και ο βρόχος συνεχίζει από την αρχή. Δεν υλοποιείται στον συγκεκριμένο κώδικα πολυδειγματική ψηφιακή αποθορυβοποίηση ή hysteresis στα thresholds, γεγονός που μπορεί να εξεταστεί ως πιθανή βελτίωση αν οι πραγματικές μετρήσεις παρουσιάσουν αστάθεια.

Τα LED UP/DOWN αποτελούν ανεξάρτητη επιβεβαίωση της κατάστασης. Επειδή βρίσκονται στη γραμμή 13,5 V και χρησιμοποιούνται δύο σε σειρά, δεν μπορούν να οδηγηθούν απευθείας από 3,3 V. Οι TR2/TR3 αναλαμβάνουν τη μεταγωγή προς GND και οι R4/R10 περιορίζουν το ρεύμα βάσης.

Οι R6 και R12 εμφανίζονται ως NOT USED. Αν τοποθετούνταν, θα μπορούσαν να δημιουργήσουν διαφορετική συμπεριφορά ή μόνιμη διαδρομή προς GND ανάλογα με το layout. Η ύπαρξη μη τοποθετημένων footprints είναι συνηθισμένη σε PCB που υποστηρίζουν εκδόσεις παραγωγής. Στην τεκμηρίωση είναι σημαντικό να ξεχωρίζεται τι υπάρχει στο schematic από τι πραγματικά τοποθετείται στο BOM.

Σε embedded σύστημα που οδηγεί ρελέ, η συμπεριφορά κατά το power-up είναι εξίσου σημαντική με τη συμπεριφορά μετά την πλήρη εκκίνηση. Μέχρι να ρυθμιστεί η RA5, το TR1 πρέπει να

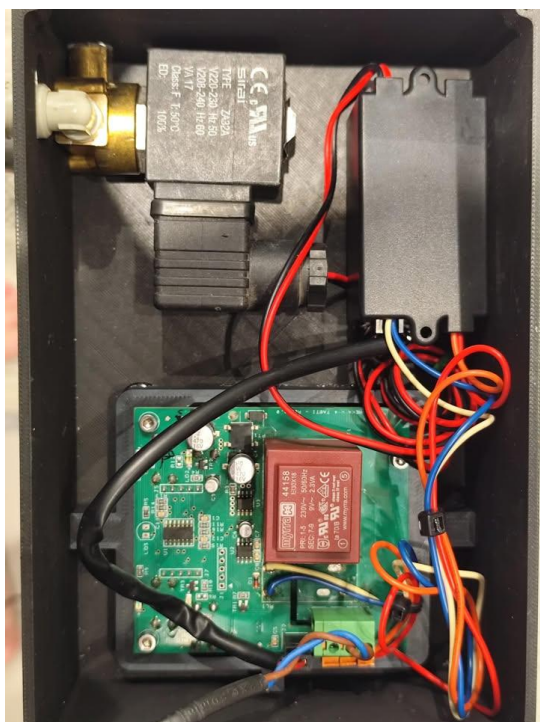
παραμένει σε κατάσταση που δεν ενεργοποιεί ανεπιθύμητα το πηνίο. Με το πραγματικό G2RL-1A-E η επαφή ισχύος είναι SPST-NO και παραμένει ανοικτή όταν το πηνίο δεν τροφοδοτείται. Η κατάσταση αυτή πρέπει να επιβεβαιώνεται στην πλήρη καλωδίωση της ηλεκτροβάνας.

Η συμπεριφορά κατά το power-up είναι εξίσου σημαντική με τη συμπεριφορά μετά την πλήρη εκκίνηση. Μέχρι να ρυθμιστεί η RA5, το TR1 πρέπει να παραμένει σε κατάσταση που δεν ενεργοποιεί ανεπιθύμητα το πηνίο. Με το πραγματικό G2RL-1A-E η επαφή ισχύος είναι SPST-NO και παραμένει ανοικτή όταν το πηνίο δεν τροφοδοτείται. Η κατάσταση αυτή πρέπει να επαληθεύεται στην πλήρη καλωδίωση της ηλεκτροβάνας.

Από άποψη χρήστη, η πλακέτα συμπεριφέρεται ως χρονικός controller. Οι αναλογικές στάθμες των πλήκτρων μετατρέπονται σε εντολές, η LCD δείχνει την επιλεγμένη κατάσταση και το ρελέ εκτελεί την τελική μεταγωγή. Η συμπεριφορά σε reset ή απώλεια τροφοδοσίας πρέπει να επαληθεύεται με βάση το πραγματικό relay part number και τη συνδεσμολογία της ηλεκτροβάνας.

Το reset μέσω MCLR δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο emergency stop. Είναι reset λογικής και η τελική κατάσταση του ρελέ εξαρτάται από τη φυσική συνδεσμολογία. Για συσκευή που συνδέεται σε 230 V, η ασφαλής διακοπή πρέπει να εξετάζεται ανεξάρτητα από το firmware. Το σημείο αυτό είναι χαρακτηριστικό της διαφοράς ανάμεσα σε ένα λειτουργικό πρωτότυπο και σε ένα πιστοποιημένο προϊόν.

Στις ακόλουθες φωτογραφίες παρουσιάζεται η πραγματική υλοποίηση του χρονοδιακόπτη και, σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια, η πλακέτα ελέγχου με τον PIC16F1825.



Εικόνα 4.3: Εσωτερική άποψη του αυτόματου ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη με ηλεκτροβάνα,



Εικόνα 4.4: Πλακέτα ελέγχου με μικροελεγκτή PIC16F1825.

καλωδίωση και πλακέτα ελέγχου.

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Επίσημη σελίδα Microchip PIC16F1825 - εικόνες package | Φωτογραφία PIC16F1825-I/SOIC-14 (RS)

4.3 Αρχιτεκτονική firmware του ESP32

Ο κώδικας ESP_FLOW_TEMP.ino του υποσυστήματος ESP32 είναι οργανωμένος σε μικρές συναρτήσεις: pulseCounter(), beep(), doubleBeep(), readTemperature(), calculateFlow(), checkButton(), updateLCD(), setup() και loop(). Κάθε συνάρτηση έχει σαφή ρόλο και μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα. Δεν χρησιμοποιούνται tasks ή FreeRTOS primitives, παρότι το ESP32 τα υποστηρίζει. Η κλασική Arduino loop είναι επαρκής για τον ρυθμό των συγκεκριμένων μετρήσεων.

Απόσπασμα κώδικα 4.1 - Βασικοί ορισμοί και ISR μέτρησης παλμών

```
#define DS18B20_PIN 4
#define FLOW_SENSOR_PIN 14
#define BUTTON_PIN 25
#define BUZZER_PIN 27

const float calibrationFactor = 7.5;
volatile unsigned long pulseCount = 0;
float temperature = 0.0;
float flowRate = 0.0;
float totalLiters = 0.0;

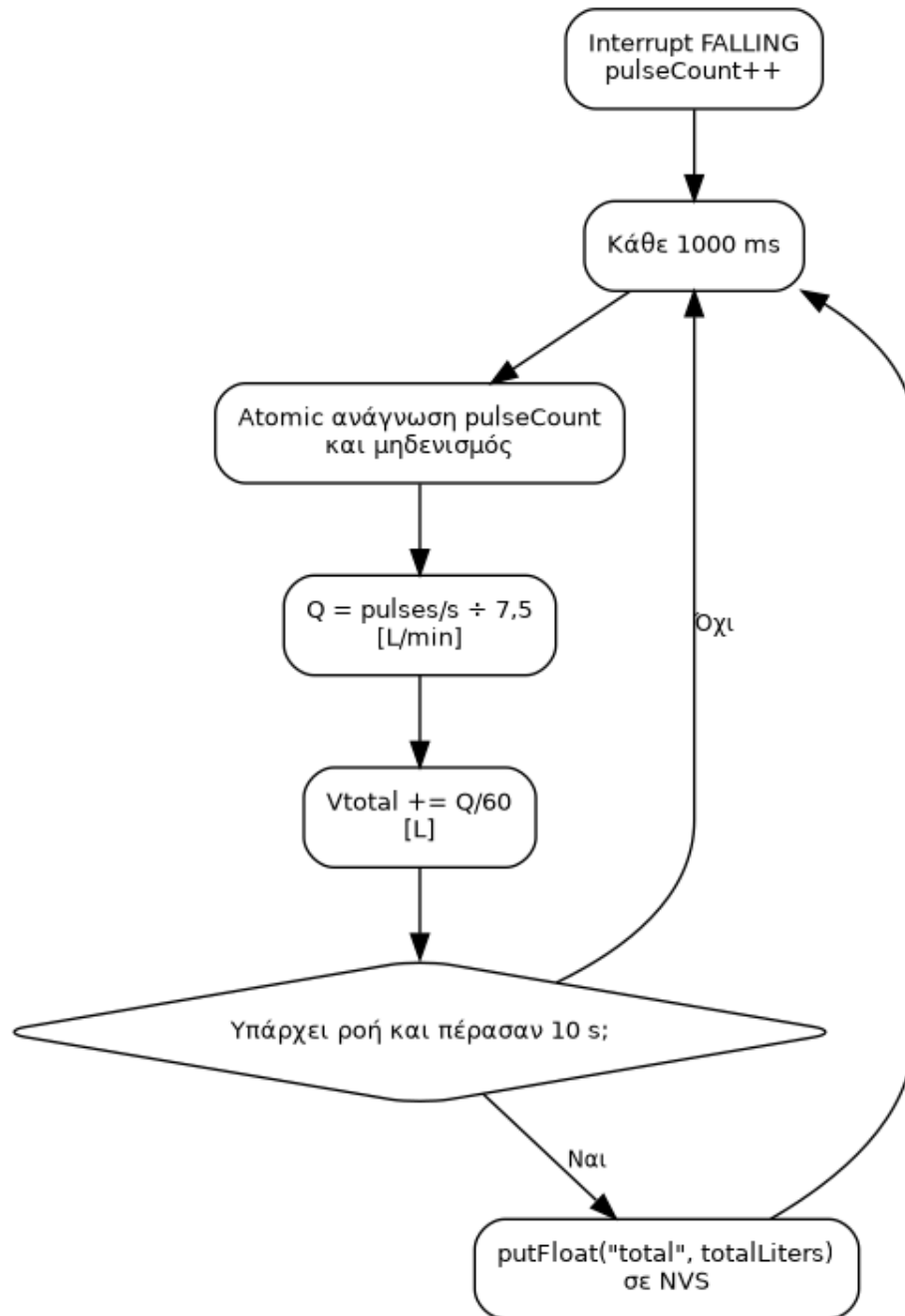
void IRAM_ATTR pulseCounter() {
    pulseCount++;
}
```

Η μεταβλητή pulseCount δηλώνεται volatile επειδή μεταβάλλεται μέσα σε interrupt service routine. Η ISR είναι όσο γίνεται μικρή: αυξάνει μόνο έναν μετρητή. Αυτή είναι σωστή επιλογή, καθώς βαριές πράξεις μέσα σε ISR μπορούν να καθυστερήσουν άλλες λειτουργίες ή να δημιουργήσουν αστάθεια. Ο πραγματικός υπολογισμός της ροής γίνεται αργότερα στη normal execution της loop [30].

Οι χρονισμοί υλοποιούνται με διαφορές millis() και όχι με ένα μοναδικό delay. Έτσι η μέτρηση παροχής, η θερμοκρασία, το button handling και η LCD μπορούν να συνυπάρχουν. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε μικρά embedded systems όπου δεν απαιτείται πλήρες RTOS αλλά χρειάζεται να εκτελούνται πολλά περιοδικά γεγονότα.

4.4 Υπολογισμός παροχής, όγκου και αποθήκευση NVS

Υπολογισμός παροχής και συνολικού όγκου



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ροής του υπολογισμού παροχής και της αποθήκευσης συνολικού όγκου.

Απόσπασμα κώδικα 4.2 - Υπολογισμός ροής και αποθήκευση

```
void calculateFlow() {  
  if (millis() - flowTimer >= 1000) {  
    noInterrupts();  
    unsigned long pulses = pulseCount;  
    pulseCount = 0;  
    interrupts();
```

```

    flowRate = ((1000.0 / (millis() - flowTimer)) * pulses)
                / calibrationFactor;
    totalLiters += flowRate / 60.0;
    flowTimer = millis();
}

if (flowRate > 0.0 && (millis() - saveTimer > 10000)) {
    preferences.putFloat("total", totalLiters);
    saveTimer = millis();
}
}

```

Πριν διαβαστεί ο pulseCount απενεργοποιούνται προσωρινά τα interrupts. Η ενέργεια αυτή αποφεύγει race condition όπου η ISR θα μπορούσε να αλλάξει τον μετρητή ανάμεσα στην ανάγνωση και στον μηδενισμό του. Για τη στιγμιαία παροχή ο κώδικας χρησιμοποιεί την πραγματική διαφορά millis() και έτσι δεν θεωρεί το παράθυρο μέτρησης ακριβώς ίσο με 1000 ms. Αντίθετα, η ενημέρωση totalLiters γίνεται με $\text{totalLiters} += \text{flowRate}/60.0$ και άρα προσεγγίζει κάθε κύκλο σαν να διαρκεί ακριβώς ένα δευτερόλεπτο. Η προσέγγιση είναι επαρκής όταν ο βρόχος εκτελείται κοντά στο 1 s, αλλά σε πιο αυστηρή υλοποίηση ο προστιθέμενος όγκος πρέπει να υπολογίζεται από τον πραγματικό χρόνο Δt , δηλαδή $\Delta V = Q \cdot \Delta t / 60000$ όταν Q είναι σε L/min και Δt σε ms [30].

Με $F=7,5 \cdot Q$ προκύπτει $Q=F/7,5$. Για παράδειγμα, αν μετρηθούν 75 παλμοί σε ένα δευτερόλεπτο, η συχνότητα είναι περίπου 75 Hz και η εκτιμώμενη παροχή 10 L/min. Σε χρονικό βήμα ενός δευτερολέπτου, ο όγκος που προστίθεται είναι $Q/60$, δηλαδή περίπου 0,1667 L για 10 L/min. Η μέθοδος είναι αριθμητική ολοκλήρωση ορθογωνικού κανόνα με μικρό χρονικό βήμα [31].

Η Preferences library αποθηκεύει μικρές τιμές σε NVS και τα δεδομένα διατηρούνται μετά από restart ή απώλεια τροφοδοσίας [29]. Ο κώδικας δεν γράφει κάθε δευτερόλεπτο αλλά ανά 10 s όταν υπάρχει ροή, περιορίζοντας τις εγγραφές Flash. Στην εκκίνηση, preferences.getFloat("total", 0.0) ανακτά την προηγούμενη τιμή. Σε μελλοντική βελτίωση θα μπορούσε να γίνεται επιπλέον αποθήκευση όταν η ροή μεταβαίνει από θετική σε μηδενική, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα απώλειας των τελευταίων δευτερολέπτων πριν από ξαφνική διακοπή ρεύματος.

4.5 Θερμοκρασία, LCD, πλήκτρο και ηχητική ανάδραση

Απόσπασμα κώδικα 4.3 - Κύριος βρόχος του ESP32

```
void loop() {  
  calculateFlow();  
  
  if (millis() - tempTimer > 2000) {  
    readTemperature();  
    tempTimer = millis();  
  }  
  
  checkButton();  
  
  if (millis() - lcdTimer > 500) {  
    updateLCD();  
    lcdTimer = millis();  
  }  
}
```

Η θερμοκρασία δεν χρειάζεται να ενημερώνεται τόσο γρήγορα όσο η παροχή. Η επιλογή δύο δευτερολέπτων είναι λογική για ένα θερμικό μέγεθος που μεταβάλλεται σχετικά αργά. Αντίθετα, η LCD ανανεώνεται ανά 500 ms ώστε η ένδειξη ροής να φαίνεται άμεσα στον χρήστη. Η συχνή ανανέωση δεν σημαίνει ότι ο αισθητήρας θερμοκρασίας διαβάζεται κάθε 500 ms: η μεταβλητή κρατά την τελευταία διαθέσιμη μέτρηση [28].

Στο checkButton() το σύντομο πάτημα αλλάζει μεταξύ δύο οθονών, ενώ το παρατεταμένο πάτημα άνω των 3 s μηδενίζει το totalLiters και γράφει αμέσως μηδενική τιμή στη Flash. Η λειτουργία συνοδεύεται από μήνυμα RESET TOTAL? / Resetting... και double beep. Η επιλογή παρατεταμένου πατήματος μειώνει την πιθανότητα τυχαίου μηδενισμού, αν και για ακόμη μεγαλύτερη ασφάλεια θα μπορούσε να ζητείται δεύτερη επιβεβαίωση [29].

Η HMI του ESP32 είναι σκόπιμα απλή. Δεν υπάρχει touch interface ή εφαρμογή κινητού. Παρόλα αυτά, εμφανίζονται οι τρεις βασικές πληροφορίες που χρειάζονται για δοκιμή: θερμοκρασία, στιγμιαία ροή και σωρευτικός όγκος. Για φάση πρωτοτύπου αυτή η απλότητα είναι πλεονέκτημα, επειδή ο μηχανικός μπορεί να ελέγξει γρήγορα εάν οι αισθητήρες και οι αλγόριθμοι λειτουργούν πριν επενδύσει χρόνο σε πιο σύνθετη διεπαφή [32].

4.6 Ανάλυση PCB fabrication layers

Το σύνθετο screenshot του PCB παρουσιάζει τα κύρια fabrication layers της πλακέτας. Η ομοιότητα του board outline σε όλα τα layers δείχνει συνεπή μηχανική αναφορά. Τα openings του solder mask αντιστοιχούν στα pads, τα solder paste layers στα SMD σημεία και τα drill layers στις οπές through-hole ή μηχανικής στερέωσης [21].

Η εικόνα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για να φανεί ότι η σχεδίαση περιλαμβάνει τόσο SMD όσο και through-hole στοιχεία. Μεγάλα footprints στην άνω περιοχή αντιστοιχούν σε μετασχηματιστή, ρελέ και κλέμμες, ενώ η πυκνότερη SMD περιοχή βρίσκεται χαμηλότερα. Οι δύο επιμήκεις εγκοπές είναι μηχανικό χαρακτηριστικό και εμφανίζονται με συνέπεια στο outline.

Τα fabrication layers της πρωτότυπης πλακέτας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Εικόνα 3.48 και αναλυτικότερα στα Σχήματα 11 έως 18.

Το board outline ορίζει μία ορθογώνια πλακέτα με έξι περιμετρικές οπές στερέωσης και δύο επιμήκεις εσωτερικές εγκοπές. Οι εγκοπές πιθανότατα εξυπηρετούν μηχανικό διαχωρισμό, συναρμολόγηση ή αύξηση διαδρομής επιφανειακής διαρροής μεταξύ περιοχών, όμως χωρίς το πλήρες μηχανολογικό assembly δεν είναι σωστό να αποδοθεί μία μοναδική λειτουργία.

Οι οπές στα άκρα πρέπει να ευθυγραμμίζονται με το περίβλημα χωρίς να πλησιάζουν επικίνδυνα σε αγωγή μέρη. Σε συσκευή που περιλαμβάνει νερό, η θέση της πλακέτας και οι αποστάσεις από υδραυλικά μέρη είναι επίσης κρίσιμες. Το screenshot τεκμηριώνει το σχήμα, όχι το τελικό enclosure.

Το top silkscreen είναι το πιο κατατοπιστικό layer για τη χωροθέτηση. Διακρίνονται μεγάλα περιγράμματα στην άνω περιοχή για T1, REL1 και στοιχεία σύνδεσης, ενώ προς το κέντρο και κάτω υπάρχουν U1, U2, U3, τρανζίστορ, πυκνωτές, αντιστάσεις και connectors. Η διάταξη ακολουθεί σε γενικές γραμμές τη λειτουργική ροή του schematic.

Η χρήση reference designators διευκολύνει τη συναρμολόγηση και το service. Η σήμανση πρέπει να παραμένει αναγνώσιμη μετά την τοποθέτηση των εξαρτημάτων, χωρίς να καλύπτει pads. Στο συγκεκριμένο screenshot υπάρχουν επίσης οι δύο επιμήκεις εγκοπές, οι οποίες δημιουργούν φυσικό διαχωρισμό της επάνω περιοχής.

Στο bottom silkscreen εμφανίζονται καθαρά τέσσερα τετράγωνα footprints με επιγραφές που αντιστοιχούν στα BT1-BT4. Η διάταξη υποδηλώνει ότι τα πλήκτρα βρίσκονται στην κάτω όψη ή σε πλευρά που προσανατολίζεται προς την πρόσοψη της συσκευής. Αυτό συμφωνεί με τη λειτουργική ανάγκη για τέσσερα χειριστήρια.

Η ύπαρξη silkscreen και στην κάτω πλευρά βοηθά στη συναρμολόγηση και στον έλεγχο σωστής θέσης. Επειδή τα πλήκτρα κωδικοποιούνται ανά δύο σε κάθε ADC γραμμή, η φυσική θέση τους πρέπει να ταιριάζει με το firmware. Από τον έλεγχο της πλακέτας φαίνεται ότι τα button mappings

χρειάζονται προσοχή ως προς το «χιαστή» pairing, κάτι που πρέπει να επιβεβαιώνεται σε τελική δοκιμή.

Το top solder mask δείχνει τα ανοίγματα του προστατευτικού βερνικιού στην άνω όψη. Τα openings περιλαμβάνουν μεγάλα through-hole pads στην άνω περιοχή και πυκνότερα SMD pads στο κέντρο και κάτω. Το mask μειώνει τον κίνδυνο γεφυρώσεων κόλλησης και προστατεύει τον χαλκό από οξείδωση και μηχανική επαφή.

Σε περιοχή δικτύου, το solder mask δεν πρέπει να θεωρείται κύρια μόνωση που επιτρέπει να αγνοηθούν creepage/clearance απαιτήσεις. Οι πραγματικές αποστάσεις εξαρτώνται από τα copper layers, τα οποία δεν έχουν ενσωματωθεί στο παρόν τεύχος ως ξεχωριστές απεικονίσεις. Η εικόνα χρησιμοποιείται άρα για κατασκευαστική τεκμηρίωση και όχι για αριθμητική πιστοποίηση αποστάσεων [19], [20], [21].

Το bottom solder mask έχει αισθητά λιγότερα openings στην επάνω περιοχή και συγκεντρώνει pads κυρίως στις θέσεις through-hole στοιχείων και χειριστηρίων. Η εικόνα συμπληρώνει το top layer και δείχνει ποια σημεία θα είναι εκτεθειμένα για κόλληση ή ηλεκτρική επαφή στην κάτω όψη.

Η συμμετρία των οπών και η συνέπεια με το PTH drill αποτελούν βασικό έλεγχο πριν την παραγωγή Gerber/drill set. Στην τελική βιομηχανική διαδικασία θα έπρεπε επίσης να γίνει DRC και CAM review με τα copper layers. Στην παρούσα εργασία τα συγκεκριμένα routing layers δεν έχουν ενσωματωθεί ως ξεχωριστές εικόνες, οπότε η αξιολόγηση περιορίζεται στα fabrication δεδομένα που παρουσιάζονται.

Το top solder paste layer εμφανίζει τα SMD pads στα οποία θα τοποθετηθεί πάστα μέσω stencil. Είναι ιδιαίτερα πυκνό γύρω από τον PIC, τους ρυθμιστές και τα μικρά παθητικά. Τα μεγάλα through-hole στοιχεία δεν εμφανίζονται ως paste openings, όπως είναι αναμενόμενο.

Το bottom solder paste περιλαμβάνει κυρίως τα footprints των πλήκτρων/στοιχείων της κάτω όψης. Η ύπαρξη paste και στις δύο πλευρές υποδηλώνει δυνατότητα διπλής όψης SMD συναρμολόγησης. Η ακριβής παραγωγική διαδικασία, όπως σειρά reflow και χειροκίνητη τοποθέτηση THT, δεν περιγράφεται στα αρχεία και δεν θεωρείται δεδομένη.

Το bottom solder paste layer αφορά τις θέσεις SMD που βρίσκονται στην κάτω όψη. Στο screenshot της κάτω όψης τα openings είναι περιορισμένα και συγκεντρώνονται κυρίως γύρω από τις θέσεις των χειριστηρίων. Σε μία διαδικασία συναρμολόγησης διπλής όψης, τα paste layers χρησιμοποιούνται για την κατασκευή stencil και για τον ελεγχόμενο όγκο πάστας σε κάθε pad.

Η εικόνα δεν περιέχει πληροφορία για το πάχος του stencil ή για το τελικό προφίλ reflow, άρα δεν μπορεί να εξαχθούν συμπεράσματα για τις ακριβείς παραμέτρους παραγωγής. Παρόλα αυτά, μαζί με το top solder paste τεκμηριώνει ότι η πλακέτα έχει σχεδιαστεί με SMD στοιχεία και στις δύο πλευρές.

Το PTH drill layer περιλαμβάνει τις οπές που προορίζονται για plated through-hole κατασκευή. Σε αυτές τις οπές η μεταλλοποίηση του τοιχώματος δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των πλευρών της πλακέτας και επιτρέπει την τοποθέτηση through-hole ακροδεκτών. Στην εικόνα διακρίνονται οι μεγαλύτερες οπές των στοιχείων ισχύος και των connectors, καθώς και σειρές μικρότερων οπών στην περιοχή των ηλεκτρονικών.

Η σωστή αντιστοίχιση drill diameter, pad diameter και annular ring είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία της κόλλησης. Τα συγκεκριμένα screenshots δεν δίνουν αριθμητικές διαμέτρους, οπότε η εργασία περιορίζεται στην ποιοτική τεκμηρίωση. Πριν από παραγωγή απαιτείται έλεγχος του drill file σε συνδυασμό με τα copper Gerbers και το πραγματικό BOM.

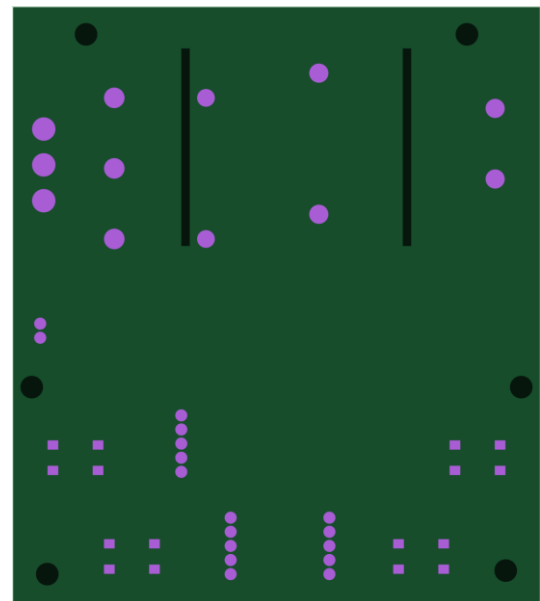
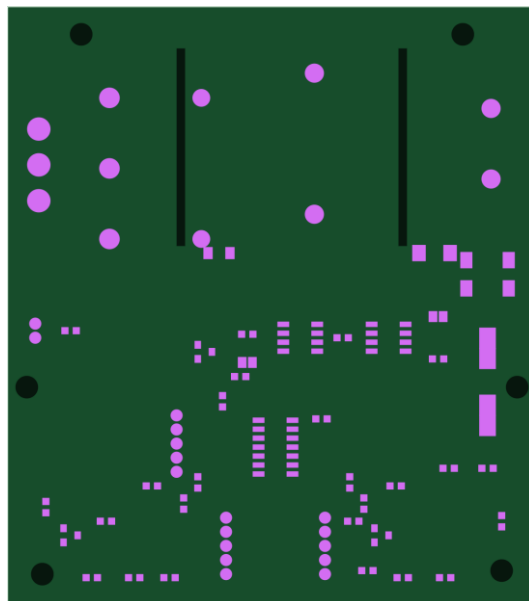
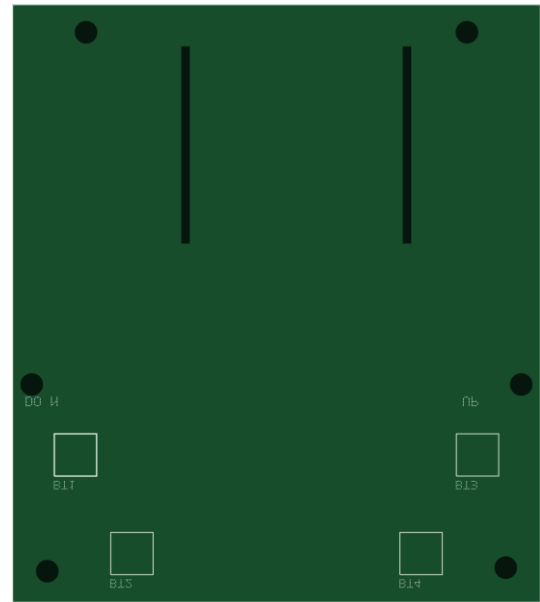
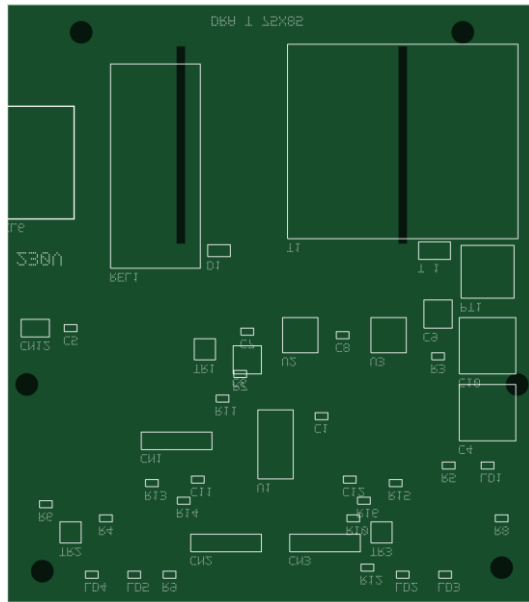
Το NPTH drill layer παρουσιάζει μη επιμεταλλωμένες οπές, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για μηχανική στερέωση ή ευθυγράμμιση και δεν αποτελούν ηλεκτρικούς κόμβους. Στην απεικόνιση φαίνονται έξι περιμετρικές οπές, οι οποίες αντιστοιχούν στις αντίστοιχες θέσεις του board outline.

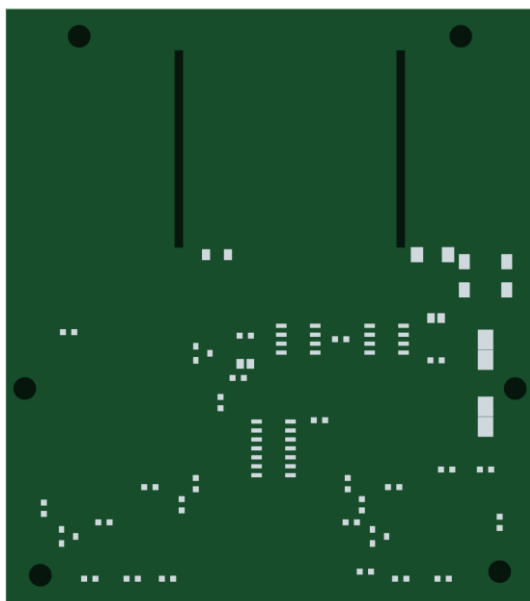
Η διάκριση PTH και NPTH είναι σημαντική γιατί μία μηχανική βίδα ή αποστάτης δεν πρέπει να αποκτήσει ανεπιθύμητη ηλεκτρική σύνδεση με χαλκό. Στην τελική κατασκευή πρέπει να ελέγχεται η απόσταση των μηχανικών εξαρτημάτων από την περιοχή 230 V, καθώς και το ενδεχόμενο μεταλλικών αποστατών. Οι δύο επιμήκειες εγκοπές αποτελούν επίσης μηχανικό χαρακτηριστικό, αλλά δεν υπάρχει πλήρες σχέδιο περιβλήματος ώστε να τεκμηριωθεί ο ακριβής σκοπός τους.

Τα fabrication screenshots που δημιουργήθηκαν κατά τη σχεδίαση της πλακέτας επιτρέπουν να παρουσιαστούν solder mask, solder paste, silkscreen, outline και drill layers. Στο παρόν τεύχος δεν έχουν ενσωματωθεί ως ξεχωριστές εικόνες τα top και bottom copper routing layers. Γι' αυτό η εργασία δεν επιχειρεί να αποδώσει πλάτη διαδρομών, ακριβείς αποστάσεις χαλκού ή συγκεκριμένα ground planes που δεν απεικονίζονται στο παρόν σύνολο τεκμηρίωσης.

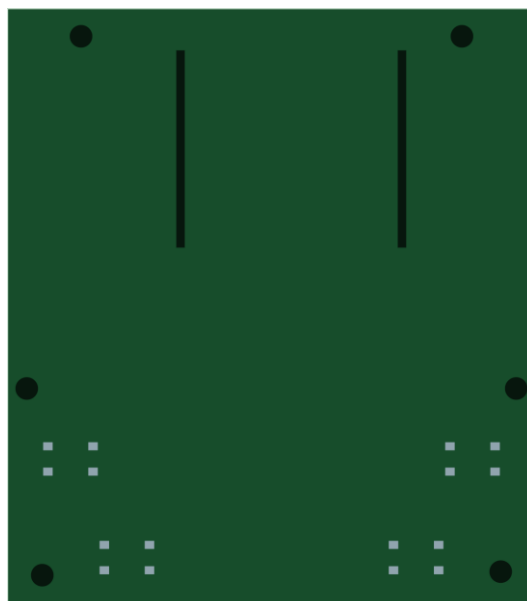
Αυτός ο περιορισμός είναι ουσιαστικός στην περιοχή του δικτύου. Η συμμόρφωση με αποστάσεις creepage και clearance δεν μπορεί να αποδειχθεί μόνο από silkscreen ή solder mask. Για πλήρη CAM έλεγχο θα απαιτούνταν τα copper Gerbers, το drill map, το stack-up, το πάχος PCB, η κατηγορία υλικού και οι απαιτήσεις μόνωσης. Τα αρχεία που παρουσιάζονται τεκμηριώνουν τη μηχανική και κατασκευαστική προετοιμασία της πλακέτας, όχι πιστοποίηση για λειτουργία σε οικιακή συσκευή.

Η διάκριση ανάμεσα σε «υπάρχει σχεδίαση PCB» και «έχει αποδειχθεί η ηλεκτρική καταλληλότητα του PCB» είναι σημαντική. Τα διαθέσιμα layers δείχνουν outline, οπές, ανοίγματα solder mask, σημεία πάστας και σημάνσεις τοποθέτησης. Δεν παρουσιάζεται όμως το πλήρες copper routing, άρα δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για πλάτη ισχύος, thermal reliefs, επιστροφές ρεύματος ή αποστάσεις χαλκού στην περιοχή των 230 V. Η ανάλυση περιορίζεται σε όσα τεκμηριώνονται οπτικά.

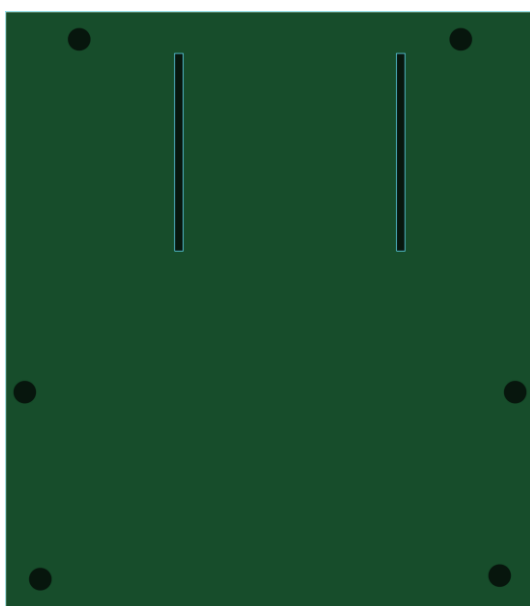




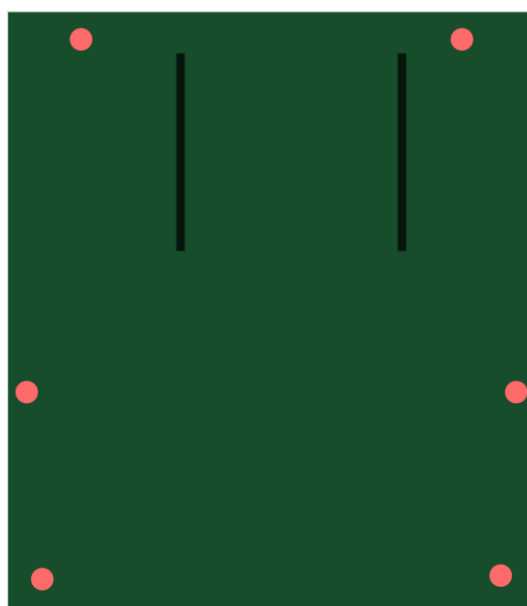
Εικόνα 4.10: Top solder paste.



Εικόνα 4.11: Bottom solder paste.



Εικόνα 4.12: Board outline και μηχανικές εγκοπές.



Εικόνα 4.13: NPTH drill και οπές στερέωσης.

Η οπτική εξέταση των layers βοηθά να ελεγχθούν footprint openings, θέσεις εξαρτημάτων και μηχανικές οπές. Δεν αντικάνει όμως τον έλεγχο DRC στο αρχικό CAD της κατασκευής. Ειδικά για την περιοχή των 230 V, η απουσία απεικόνισης των copper layers στο παρόν τεύχος δεν επιτρέπει να μετρηθούν creepage/clearance μεταξύ των πραγματικών αγωγικών διαδρομών. Άρα η εργασία περιορίζεται σε παρατηρήσεις που τεκμηριώνονται από τα fabrication αρχεία που έχουν ενσωματωθεί στην τεχνική παρουσίαση.

4.7 Πρακτική διασύνδεση του ESP32 με αισθητήρες και περιφερειακά

Το schematic ESP_FLOW_TEMP που σχεδιάστηκε για την πρωτότυπη μονάδα χωρίζει καθαρά τις λειτουργίες σε blocks. Ο ESP32 συνδέεται μέσω headers με τα διαθέσιμα GPIO. Στο δεξί μέρος φαίνονται τα terminals του YF-S201 και του DS18B20, ενώ χαμηλότερα βρίσκεται ο driver του buzzer. Η LCD 16×2 έχει ποτενσιόμετρο 10 kΩ για contrast και συνδέεται σε 4-bit mode. Το reset/menu button συνοδεύεται από R3=100 kΩ και C3=10 nF σύμφωνα με το schematic· σε τεχνική σημείωση της ίδιας της κατασκευής αναφέρεται 100 nF, οπότε η πραγματική τιμή C3 χρειάζεται επιβεβαίωση πριν από την τελική κατασκευή.

Η τροφοδοσία Vin και 3V3 εμφανίζονται ως ξεχωριστές γραμμές. Αυτό είναι σημαντικό για αισθητήρες ή βοηθητικά κυκλώματα που ενδέχεται να λειτουργούν στα 5 V, ενώ τα GPIO του ESP32 είναι λογικής 3,3 V [27]. Το pull-up του σήματος ροής προς 3,3 V έχει στόχο να διατηρήσει ασφαλές λογικό επίπεδο. Στο κύκλωμα FLOW RESET η R3 φαίνεται να αναφέρεται στη γραμμή Vin, άρα πριν από την τελική συναρμολόγηση πρέπει να επιβεβαιωθεί η πραγματική τάση του συγκεκριμένου net. Αν το Vin είναι 5 V, η pull-up του GPIO25 είναι προτιμότερο να αναφέρεται στα 3,3 V ή να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη προσαρμογή στάθμης. Αντίστοιχα, πρέπει να επιβεβαιωθεί με datasheet ή παλμογράφο το ηλεκτρικό interface του συγκεκριμένου YF-S201 module και να μην θεωρηθεί χωρίς έλεγχο ότι η έξοδός του είναι ασφαλής για είσοδο 3,3 V.

Οι πυκνωτές C1, C2 και C4 των 100 nF λειτουργούν ως decoupling κοντά στις αντίστοιχες γραμμές τροφοδοσίας. Η πρακτική τοποθέτησή τους στο PCB πρέπει να είναι όσο το δυνατόν κοντύτερα στα pins τροφοδοσίας που εξυπηρετούν. Το schematic δίνει τη λογική σύνδεση, αλλά η πραγματική αποτελεσματικότητα αποσύζευξης εξαρτάται από το layout και τις διαδρομές επιστροφής [22].

4.8 Ηλεκτρικοί και αριθμητικοί υπολογισμοί

Οι τεχνικές σημειώσεις περιλαμβάνουν πραγματική μέτρηση της κύριας DC γραμμής. Αναφέρεται τάση περίπου 13,5-14 V σε μικρό φορτίο και πτώση κοντά στα 12 V όταν αυξάνεται το φορτίο. Η συμπεριφορά είναι συμβατή με μικρό μετασχηματιστή 9 V AC, πλήρη ανόρθωση και χωρητικό φίλτρο χωρίς ενεργό σταθεροποιητή στη γραμμή ισχύος.

Για την κατανάλωση δίνεται ενδεικτική κατανομή 60 mA για το backlight, περίπου 35 mA για το πηνίο του ρελέ και περίπου 45 mA για λογική και LED, δηλαδή συνολικό ρεύμα κοντά στα 140 mA. Οι τιμές χρησιμοποιούνται ως τεχνική εκτίμηση και όχι ως πιστοποιημένες μετρήσεις ακριβείας, επειδή σε αυτή τη φάση δεν έχει καταγραφεί πλήρες πρωτόκολλο οργάνων, θερμοκρασίας και επαναλήψεων.

Η εκτίμηση των περίπου 140 mA είναι χρήσιμη επειδή βοηθά να ελεγχθεί αν ο μετασχηματιστής των 256 mA στη συγκεκριμένη έκδοση του 44158 έχει θεωρητικό περιθώριο ρεύματος [9]. Το περιθώριο αυτό δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως πλήρης απόδειξη καταλληλότητας, επειδή η πραγματική κατανάλωση δεν είναι σταθερή και τα ρεύματα της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας πλευράς επηρεάζονται από την ανορθωτική φόρτιση των πυκνωτών. Παρ' όλα αυτά, δείχνει ότι η κατασκευή δεν σχεδιάστηκε να λειτουργεί ακριβώς στο όριο της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή.

Σε μία πιο συστηματική πειραματική διαδικασία θα καταγράφονταν ξεχωριστές καταστάσεις: αναμονή με LCD ενεργή, αναμονή με backlight, ενεργοποιημένο ρελέ, ενεργοποιημένες ενδείξεις LED και πλήρης ταυτόχρονη λειτουργία. Για κάθε κατάσταση θα μετρούνταν 13,5 V, 3,3 V, συνολικό ρεύμα και θερμοκρασία 78L33A. Έτσι θα μπορούσε να δημιουργηθεί πίνακας κατανάλωσης ανά λειτουργία και να εντοπιστεί ποιο φορτίο προκαλεί τη μεγαλύτερη πτώση ή θέρμανση. Η παρούσα καταγραφή της κατασκευής δεν περιλαμβάνει ακόμη τέτοιο πλήρες πρωτόκολλο, άρα διατηρείται καθαρή διάκριση ανάμεσα στις πραγματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και στις προτεινόμενες μελλοντικές δοκιμές.

Με πλήρη ανόρθωση δικτύου 50 Hz, οι πυκνωτές τροφοδοσίας επαναφορτίζονται με συχνότητα περίπου 100 Hz. Για συνολική χωρητικότητα 940 μF και φορτίο 140 mA, μία πρώτη προσέγγιση της κυμάτωσης δίνει περίπου 1,5 V peak-to-peak. Η τεχνική σημείωση αναφέρει αντίστοιχα τιμή γύρω στο 1,4 V, άρα η τάξη μεγέθους είναι συνεπής.

Η κυμάτωση εξηγεί γιατί ένα πολύμετρο DC μπορεί να εμφανίζει μία μέση τιμή ενώ τα φορτία δέχονται στιγμιαία υψηλότερες και χαμηλότερες τάσεις. Για το πηνίο του ρελέ η μεταβολή επηρεάζει το διαθέσιμο περιθώριο έλξης. Για τα LED επηρεάζει άμεσα το στιγμιαίο ρεύμα. Για τη λογική, ο 78L33A απομονώνει σε μεγάλο βαθμό αυτές τις μεταβολές, εφόσον διατηρείται επαρκές dropout και θερμικό περιθώριο.

$$\Delta V \approx I / (f \cdot C) = 0,14 / (100 \cdot 940 \mu F) \approx 1,49 \text{ V} \quad (4.1)$$

Οι δύο κλάδοι UP και DOWN χρησιμοποιούν δύο λευκά LED σε σειρά και αντίσταση 220 Ω. Με γραμμή 13,5 V, δύο πτώσεις LED περίπου 3 V και μικρή πτώση στον κορεσμένο BC847B, ο θεωρητικός υπολογισμός μπορεί να οδηγήσει σε ρεύμα κοντά στα 30 mA. Στις κορυφές της κυμάτωσης το ρεύμα μπορεί να αυξηθεί περισσότερο. Από τον έλεγχο της πλακέτας φαίνεται ότι αυτό αποτελεί πιθανή αιτία πρόωρης καταστροφής LED [11].

Επειδή το ακριβές επιτρεπόμενο ρεύμα εξαρτάται από την έκδοση του VLMW1301, το duty cycle, τη θερμοκρασία και την ψύξη του PCB, δεν ορίζεται μία νέα τιμή ως οριστική. Ως κατεύθυνση βελτίωσης εξετάζονται 390 Ω ή 470 Ω, οι οποίες μειώνουν αισθητά το ρεύμα. Η τελική επιλογή πρέπει να επιβεβαιωθεί με datasheet και πραγματική μέτρηση.

Ο 78L33A είναι γραμμικός ρυθμιστής και η διαφορά εισόδου-εξόδου μετατρέπεται σε θερμότητα. Με είσοδο 13,5 V και έξοδο 3,3 V, η διαφορά είναι περίπου 10,2 V. Στα 30 mA η απώλεια είναι περίπου 0,31 W, ενώ στα 50 mA φτάνει περίπου τα 0,51 W. Για μικρό SO-8 αυτές οι τιμές δικαιολογούν πραγματικό έλεγχο θερμοκρασίας στη δυσμενέστερη κατάσταση [5].

Ο LM317L λειτουργεί διαφορετικά, ως πηγή σταθερού ρεύματος περίπου 60 mA για το backlight. Η λύση προσφέρει σταθερή φωτεινότητα παρά τις μεταβολές της γραμμής, με κόστος επιπλέον απωλειών. Αν σε επόμενη έκδοση αυξηθεί η κατανάλωση της λογικής, ένας buck converter θα είναι ενεργειακά αποδοτικότερος από τον 78L33A, αλλά θα αυξήσει την πολυπλοκότητα PCB και τις απαιτήσεις EMI [6].

$$P_{78L33} = (V_{in} - V_{out}) \cdot I_{out} \quad (4.2)$$

$$I_{backlight} \approx 1,25 \text{ V} / 21 \Omega \approx 59,5 \text{ mA} \quad (4.3)$$

Οι βασικοί υπολογισμοί συγκεντρώνουν τα σημεία όπου οι θεωρητικές σχέσεις μπορούν να ελεγχθούν με απλά όργανα. Για την κύρια πλακέτα, το ρεύμα backlight είναι 1,25/21≈59,5 mA, το ρεύμα βάσης των NPN περίπου (3,3-0,7)/1000≈2,6 mA και η μεσαία στάθμη των πλήκτρων 1,65 V. Για το νέο υποσύστημα, το pull-up 10 kΩ καταναλώνει περίπου 0,33 mA όταν η γραμμή τραβιέται χαμηλά, ενώ το RC του button έχει $\tau=100 \text{ k}\Omega \times 100 \text{ nF}=10 \text{ ms}$.

Για τον flow sensor, αν σε παράθυρο 1 s μετρηθούν N παλμοί, η συχνότητα είναι περίπου N Hz και $Q=N/7,5 \text{ L/min}$. Ο συνολικός όγκος που προστίθεται σε αυτό το δευτερόλεπτο είναι $Q/60 \text{ L}$. Εναλλακτικά, επειδή 7,5 Hz ανά L/min αντιστοιχούν περίπου σε 450 παλμούς ανά λίτρο, μια δεύτερη προσέγγιση είναι $V=N/450 \text{ L}$. Οι δύο μορφές είναι θεωρητικά ισοδύναμες όταν το χρονικό παράθυρο είναι ακριβώς 1 s. Ο κώδικας χρησιμοποιεί τη μορφή με πραγματικό elapsed time, που είναι πιο ανθεκτική σε μικρές αποκλίσεις του loop [31].

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικοί υπολογισμοί του συστήματος

Υπολογισμός	Σχέση	Ενδεικτικό αποτέλεσμα
-------------	-------	-----------------------

Backlight	1,25 V / 21 Ω	59,5 mA
Βάση NPN	(3,3-0,7)/1 kΩ	2,6 mA
ADC πλήκτρων	3,3·10k/(10k+10k)	1,65 V
RC πλήκτρων PIC	10 kΩ·100 nF	1 ms
RC button ESP32	100 kΩ·10 nF (schematic)	1 ms (10 ms αν C3=100 nF)
Flow pull-up	3,3 V/10 kΩ	0,33 mA
Παροχή YF-S201	$Q=F/7,5$	L/min
Όγκος ανά παλμούς	$V=N/450$	L
78L33 @50 mA	(13,5-3,3)·0,05	≈0,51 W

Οι υπολογισμοί αυτοί δεν αντικάνουν τις πραγματικές μετρήσεις. Η ανοχή αντιστάσεων, η θερμοκρασία, η πτώση τάσης του μετασχηματιστή, το forward voltage των LED και η απόκριση του flow sensor δημιουργούν αποκλίσεις. Ο σωστός τρόπος χρήσης τους είναι ως αρχικές τιμές σχεδιασμού και ως βάση για σύγκριση με πολύμετρο, παλμογράφο ή ογκομετρική δοκιμή.

Για τη γραμμή 13,5 V ο υπολογισμός ripple μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γρήγορος έλεγχος τάξης μεγέθους. Με πλήρη ανόρθωση στα 50 Hz, οι κορυφές επαναλαμβάνονται περίπου στα 100 Hz. Για συνολικό φορτίο 0,14 A και χωρητικότητα 940 μF, η απλή σχέση $\Delta V \approx I/(f \cdot C)$ δίνει περίπου 1,49 V. Η τιμή βρίσκεται κοντά στην εκτίμηση 1,4 V του τεχνικού υλικού. Η συμφωνία δεν αποδεικνύει την πραγματική κυματομορφή, αλλά δείχνει ότι η εκτίμηση είναι φυσικά εύλογη. Με παλμογράφο θα μπορούσαν να ελεγχθούν η πραγματική κυμάτωση και οι στιγμιαίες αιχμές κατά τη μεταγωγή του ρελέ.

Στο υποσύστημα ροής μπορεί να γίνει αντίστοιχος έλεγχος συνέπειας με δύο διαφορετικούς υπολογισμούς. Εφόσον ο αισθητήρας αντιστοιχεί περίπου σε 450 παλμούς ανά λίτρο, ο συνολικός όγκος μπορεί να υπολογιστεί απευθείας ως συνολικοί παλμοί/450. Επίσης, το firmware ολοκληρώνει τη στιγμιαία παροχή ανά δευτερόλεπτο. Σε μια δοκιμή μεγάλης διάρκειας, οι δύο μέθοδοι πρέπει να δίνουν σχεδόν ίδιο αποτέλεσμα. Αν εμφανιστεί αισθητή διαφορά, θα είναι ένδειξη ότι πρέπει να εξεταστούν τα χρονικά παράθυρα, χαμένοι παλμοί ή το calibration factor.

4.9 Δοκιμές, σφάλματα, αξιοπιστία και περιορισμοί

Η συνολική σχεδίαση είναι λειτουργικά συνεκτική: η τροφοδοσία διαχωρίζει τη μη σταθεροποιημένη γραμμή ισχύος από τη λογική 3,3 V, οι BC847B απομονώνουν τα GPIO από μεγαλύτερα ρεύματα, η LL4148 περιορίζει το flyback του πηνίου και η αναλογική κωδικοποίηση εξοικονομεί ακροδέκτες στον PIC. Το ICSP επιτρέπει συντήρηση του firmware χωρίς αποκόλληση του μικροελεγκτή.

Οι βασικοί περιορισμοί της τεκμηρίωσης είναι συγκεκριμένοι. Ο πλήρης πηγαίος κώδικας C της πλακέτας PIC16F1825 βρίσκεται στο Παράρτημα Δ και επιτρέπει να ελεγχθεί άμεσα η λογική ελέγχου, χωρίς όμως να δίνεται έτοιμο αρχείο HEX. Επίσης, τα copper routing layers δεν παρουσιάζονται ως ξεχωριστές εικόνες και δεν υπάρχει πλήρες μηχανολογικό σχέδιο ολόκληρης της υδραυλικής εγκατάστασης. Αυτά τα σημεία καθορίζουν το επίπεδο στο οποίο μπορεί να αναπαραχθεί και να αξιολογηθεί το πρωτότυπο.

Για τον flowmeter η βασικότερη δοκιμή είναι η βαθμονόμηση με γνωστό όγκο. Μια πρακτική διαδικασία θα ήταν να γίνουν τουλάχιστον πέντε επαναλήψεις για 0,5 L, 1 L και διαφορετικούς ρυθμούς ροής. Σε κάθε δοκιμή θα καταγράφονται οι pulses, ο υπολογισμένος όγκος και ο πραγματικός όγκος. Από τη διαφορά μπορεί να υπολογιστεί το σφάλμα και να διορθωθεί ο calibrationFactor. Επειδή δεν έχει καταγραφεί ακόμη πλήρες dataset από τέτοιες δοκιμές, δεν δίνονται αριθμητικά αποτελέσματα βαθμονόμησης.

Για τον DS18B20, η σύγκριση με θερμόμετρο αναφοράς σε δύο ή τρία σημεία θα ήταν αρκετή για αρχικό έλεγχο. Παράλληλα πρέπει να εξεταστεί η θέση του αισθητήρα: άλλη θερμοκρασία μετράται στο boiler, άλλη στον σωλήνα και άλλη στο νερό που εξέρχεται. Η ακρίβεια του IC δεν αρκεί αν το σημείο μέτρησης δεν αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία που ενδιαφέρει [28].

Στο firmware, χρήσιμες δοκιμές περιλαμβάνουν πολύ γρήγορη ροή, μηδενική ροή, αποσύνδεση αισθητήρα, συνεχή ενεργοποίηση button και απότομη διακοπή τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια ροής. Η τρέχουσα υλοποίηση δεν ελέγχει ειδικά το error value του DS18B20 ούτε αν ο flow sensor παρουσιάζει μη ρεαλιστική συχνότητα. Αυτοί είναι φυσικοί υποψήφιοι για defensive checks σε επόμενη έκδοση [28].

Στα STL, η αξιοπιστία δεν μπορεί να εκτιμηθεί μόνο από την οπτική γεωμετρία. Πρέπει να γίνει πραγματική συναρμολόγηση, έλεγχος ανοχών, σταθερότητας και πιθανής επαφής με νερό. Το πλεονέκτημα των αρχείων είναι ότι επιτρέπουν γρήγορη επανάληψη: αν μια οπή ή υποδοχή χρειάζεται αλλαγή, το μοντέλο μπορεί να τροποποιηθεί και να επανεκτυπωθεί χωρίς αλλαγή της ηλεκτρονικής.

4.10 Ηλεκτρική ασφάλεια και σχεδιαστικοί έλεγχοι

Το σημαντικότερο θέμα ασφάλειας είναι ότι στα L, N, COM, στις επαφές του REL1 και στο πρωτεύον του T1 υπάρχει τάση δικτύου 230 V AC. Το COM δεν είναι κοινή γείωση της ηλεκτρονικής· είναι ελεγχόμενη έξοδος φάσης. Η γαλβανική απομόνωση του μετασχηματιστή προστατεύει τη χαμηλή τάση, αλλά δεν καταργεί τους κινδύνους στην πρωτεύουσα πλευρά.

Για συσκευή θέρμανσης υγρών η τελική κατασκευή πρέπει να εξεταστεί με τις αντίστοιχες απαιτήσεις IEC 60335-1 και IEC 60335-2-15 [19], [20]. Απαιτούνται κατάλληλες αποστάσεις μόνωσης, ασφάλεια εισόδου, ονομαστική ικανότητα ρελέ και διαδρομών για το πραγματικό φορτίο, κατάλληλο enclosure και προστασία από επαφή με νερό. Η TVS του δευτερεύοντος δεν αντικάνει την ασφάλεια της πρωτεύουσας πλευράς. Η τεκμηρίωση αφορά πρωτότυπο και δεν αποτελεί πιστοποίηση συμμόρφωσης.

Ο διαχωρισμός υψηλής και χαμηλής τάσης πρέπει να διατηρείται σε όλη τη διάρκεια κατασκευής, δοκιμών και προγραμματισμού. Η ασφαλέστερη πρακτική για ICSP είναι τα 230 V να παραμένουν αποσυνδεδεμένα και η πλακέτα να τροφοδοτείται από απομονωμένο εργαστηριακό τροφοδοτικό στη χαμηλή πλευρά, όπως περιγράφεται στο τεχνικό υλικό. Έτσι ο προγραμματιστής, ο υπολογιστής και ο χειριστής δεν συνδέονται κατά λάθος με τμήμα που βρίσκεται σε δυναμικό δικτύου. Η κοινή γείωση που απαιτεί το PICkit αφορά το GND της χαμηλής τάσης και όχι το COM του ρελέ.

Η προστασία δεν εξαντλείται στην ηλεκτροπληξία. Η εφαρμογή συνδυάζει ηλεκτρική ενέργεια και υδραυλική παροχή, ενώ η θερμοκρασία του νερού αποτελεί μετρούμενο μέγεθος. Ένα τελικό περίβλημα πρέπει να εμποδίζει την πρόσβαση του χρήστη σε ενεργά σημεία, να συγκρατεί την πλακέτα μηχανικά, να απομακρύνει τα καλώδια δικτύου από τις γραμμές χειρισμού και να περιορίζει την πιθανότητα εισροής υγρού. Αντίστοιχα, το ρελέ και οι διαδρομές του πρέπει να επιλεγούν όχι μόνο με βάση το ονομαστικό ρεύμα αλλά και τη φύση του φορτίου. Η IEC 60335-1 παρέχει γενικό πλαίσιο ασφάλειας για οικιακές ηλεκτρικές συσκευές, ενώ η IEC 60335-2-15 είναι σχετική όταν το σύστημα ενσωματώνεται σε εφαρμογή θέρμανσης υγρών [19], [20].

Σημαντικό είναι επίσης να προβλέπεται ασφαλής συμπεριφορά σε μη φυσιολογικές καταστάσεις. Reset του μικροελεγκτή, πτώση της 3,3 V, κολλημένο πλήκτρο, βλάβη αισθητήρα ή κόλλημα επαφής ρελέ δεν πρέπει να οδηγούν ανεξέλεγκτα σε συνεχή ροή νερού. Με το πραγματικό G2RL-1A-E η επαφή είναι SPST-NO, αλλά η τελική ασφαλής συμπεριφορά εξαρτάται από την πλήρη καλωδίωση και τον τύπο της ηλεκτροβάνας. Μία μελλοντική έκδοση θα μπορούσε να προσθέσει ανεξάρτητο χρονικό όριο, watchdog και επιβεβαίωση ροής.

Με την προσθήκη flowmeter και θερμοκρασίας προκύπτει επιπλέον ανάγκη για σωστό διαχωρισμό νερού και ηλεκτρονικών. Το υποσύστημα ESP32 είναι χαμηλής τάσης, όμως τα καλώδια αισθητήρων μπορεί να βρίσκονται κοντά σε σωληνώσεις. Η μηχανική στήριξη πρέπει να αποτρέπει

διαρροή προς PCB, connectors ή καλώδια δικτύου. Σχεδιαστικά είναι προτιμότερο οι υδραυλικές συνδέσεις να βρίσκονται σε διαφορετική ζώνη από την πλακέτα 230 V.

Η κύρια πλακέτα χρειάζεται επίσης κατάλληλη ασφάλεια εισόδου, σωστά creepage/clearance, κατάλληλη καλωδίωση και enclosure σύμφωνα με τις απαιτήσεις για συσκευές θέρμανσης υγρών [19], [20]. Η εργασία δεν αποτελεί πιστοποίηση IEC. Εδώ καταγράφονται οι βασικοί κίνδυνοι και οι έλεγχοι που πρέπει να γίνουν πριν από οποιαδήποτε χρήση πέρα από το εργαστηριακό πρωτότυπο.

Ένα ακόμη σημείο ασφάλειας αφορά τις καταστάσεις μετά από διακοπή και επαναφορά τροφοδοσίας. Ο PIC πρέπει να αρχικοποιεί τις εξόδους σε γνωστή κατάσταση πριν ενεργοποιηθεί οποιοδήποτε φορτίο. Αντίστοιχα, το ESP32 ανακτά τον συνολικό όγκο από τη NVS, αλλά οι στιγμιαίες μεταβλητές ροής ξεκινούν από μηδέν. Η συμπεριφορά αυτή είναι σωστή για τη μέτρηση, όμως σε μελλοντικό closed-loop control πρέπει να καθοριστεί τι συμβαίνει αν η τροφοδοσία επανέλθει ενώ υπάρχει φυσικά ανοιχτή βαλβίδα ή πίεση στο κύκλωμα. Η fail-safe σχεδίαση πρέπει να βασίζεται και σε hardware κατάσταση και όχι μόνο σε μεταβλητές λογισμικού [29].

Τέλος, οποιαδήποτε δοκιμή με 230 V πρέπει να γίνεται μόνο με κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό, προστατευμένο enclosure και διαδικασία που δεν απαιτεί άγγιγμα της πλακέτας υπό τάση. Η χρήση απομονωμένου τροφοδοτικού χαμηλής τάσης για προγραμματισμό και debugging είναι προτιμότερη. Η παρουσία μετασχηματιστή στο κύκλωμα δημιουργεί γαλβανική απομόνωση για τη δευτερεύουσα πλευρά, αλλά οι ακροδέκτες L, N, COM και οι επαφές του ρελέ παραμένουν επικίνδυνοι όσο η συσκευή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 5ο: Αξιολόγηση, Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης

Στο τελευταίο κεφάλαιο εξετάζεται τι επιτεύχθηκε σε σχέση με τους αρχικούς στόχους, ποιοι περιορισμοί παραμένουν και ποιες αλλαγές έχουν μεγαλύτερη τεχνική αξία. Οι προτάσεις χωρίζονται σε άμεσες βελτιώσεις της υπάρχουσας σχεδίασης και σε μεγαλύτερες επεκτάσεις που θα απαιτούσαν νέο PCB ή αλλαγή αρχιτεκτονικής.

Η τελική αξιολόγηση βασίζεται στην πραγματική λειτουργία του αυτόματου ηλεκτρονικού χρονοδιακόπτη και της συμπληρωματικής μονάδας μέτρησης. Η πλακέτα PIC16F1825 αναλαμβάνει τον χρονισμένο έλεγχο της ηλεκτροβάνας και την τοπική διεπαφή, ενώ το ESP32 προσθέτει μέτρηση παροχής, συνολικού όγκου και θερμοκρασίας. Τα schematics, τα fabrication layers, τα STL, το firmware και οι φωτογραφίες επιτρέπουν η αποτίμηση να γίνεται πάνω στο πραγματικό πρωτότυπο και όχι μόνο σε θεωρητική περιγραφή.

Η λειτουργία του πρωτοτύπου είναι ολοκληρωμένη, αλλά υπάρχουν ακόμη σημεία που μπορούν να βελτιωθούν. Χρειάζεται έλεγχος των ορίων τάσης, της θερμικής συμπεριφοράς, της βαθμονόμησης και της ασφαλούς κατάστασης του ρελέ. Οι προτάσεις που ακολουθούν ξεκινούν από απλές διορθώσεις στην υπάρχουσα πλακέτα και φτάνουν σε μεγαλύτερες αλλαγές, όπως η ενοποίηση των ελεγκτών ή η προσθήκη δικτυακής εποπτείας.

Για να λειτουργήσει σωστά το πρωτότυπο πρέπει να συνεργάζονται σωστά όλες οι βαθμίδες. Η τροφοδοσία, ο μικροελεγκτής, το ρελέ, οι αισθητήρες και η διεπαφή χρήστη επηρεάζουν το ένα το άλλο, άρα μια αλλαγή σε ένα σημείο μπορεί να επηρεάσει τη συνολική λειτουργία. Για αυτό η αξιολόγηση γίνεται στο σύστημα ως σύνολο και όχι μόνο σε μεμονωμένα εξαρτήματα.

Οι υπολογισμοί και οι έλεγχοι δείχνουν ορισμένα σημεία που χρειάζονται επανεξέταση σε επόμενη έκδοση: μεγαλύτερο περιθώριο τάσης στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές, έλεγχο του ρεύματος LED, θερμικό έλεγχο του 78L33A, βαθμονόμηση του αισθητήρα ροής και ακριβέστερο υπολογισμό του όγκου με το πραγματικό Δt . Τα σημεία αυτά δίνουν συγκεκριμένη κατεύθυνση για επανασχεδιασμό και εργαστηριακό έλεγχο.

5.1 Αποτίμηση επίτευξης των τεχνικών στόχων της κατασκευής

Οι τεχνικοί στόχοι που τεκμηριώνονται από τη σχεδίαση και την υλοποίηση καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό. Υπάρχει συγκεκριμένο κύκλωμα τροφοδοσίας από 230 V, σταθερή λογική τάση 3,3 V, μικροελεγκτής που μπορεί να εκτελέσει χρονισμό, γραφική LCD, τέσσερα πλήκτρα, ενδείξεις UP/DOWN και ηλεκτρομηχανική έξοδος προς την ηλεκτροβάννα. Η πλακέτα έχει επίσης ICSP connector, άρα ο έλεγχος μπορεί να επαναπρογραμματιστεί χωρίς αποσυναρμολόγηση του PIC.

Σε αυτή την έκδοση δεν υλοποιούνται λειτουργίες Wi-Fi, εφαρμογή κινητού, server ή βάση δεδομένων. Το σύστημα επικεντρώνεται στον αυτόματο ηλεκτρονικό χρονισμό της εκχύλισης νερού και στη μέτρηση θερμοκρασίας και όγκου. Μελλοντική προσθήκη δικτύωσης θα αποτελέσει ξεχωριστή λειτουργική επέκταση του υπάρχοντος hardware.

Η βαθμίδα τροφοδοσίας χρησιμοποιεί μικρό μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση, γέφυρα ανόρθωσης και δύο πυκνωτές εξομάλυνσης για τη δημιουργία της γραμμής DC. Ο 78L33A παράγει την τάση 3,3 V, με θερμικές απώλειες λόγω της μεγάλης πτώσης τάσης. Ο LM317L χρησιμοποιείται σε συνδεσμολογία σταθερού ρεύματος για την τροφοδοσία του backlight.

Στον έλεγχο φορτίων, τα τρανζίστορ BC847B αποτρέπουν τη διέλευση ρεύματος ρελέ ή LED από τον PIC. Η flyback δίοδος προστατεύει το TR1 από την επαγωγική αιχμή του πηνίου. Η κωδικοποίηση τεσσάρων πλήκτρων σε δύο ADC εισόδους μειώνει τις απαιτήσεις σε ακροδέκτες, ενώ η κοινή χρήση RA0/RA1 με ICSP αξιοποιεί τις διαθέσιμες γραμμές του 14-pin μικροελεγκτή.

Η κατασκευή συνδυάζει διαφορετικά επίπεδα ηλεκτρονικού σχεδιασμού στο ίδιο σύστημα. Η τροφοδοσία ξεκινά από 230 V AC, η ψηφιακή λογική λειτουργεί στα 3,3 V, το backlight χρειάζεται σταθερό ρεύμα, το ρελέ αποτελεί ηλεκτρομηχανικό φορτίο και η LCD απαιτεί σειριακή επικοινωνία και σωστή αρχικοποίηση. Ο PIC16F1825 λειτουργεί ως σημείο συντονισμού αυτών των βαθμίδων χωρίς να οδηγεί απευθείας τα φορτία ισχύος.

Η υλοποίηση περιλαμβάνει δύο βασικά επίπεδα: actuation και sensing. Η πλακέτα PIC παρέχει χρονισμένο έλεγχο της ηλεκτροβάννας και τοπική HMI, ενώ η μονάδα ESP32 προσθέτει μέτρηση ροής και θερμοκρασίας. Σε αυτή την έκδοση δεν υπάρχει λογική διασύνδεση ESP32-PIC, άρα η μέτρηση δεν χρησιμοποιείται ως ανάδραση για τον έλεγχο της ηλεκτροβάννας. Η ενοποίηση των δύο λειτουργιών αποτελεί μελλοντική βελτίωση.

Η τεκμηρίωση περιλαμβάνει schematics, pinouts, fabrication layers, STL και τον πηγαίο κώδικα των δύο υποσυστημάτων. Η άμεση αντιστοίχιση σχεδίασης, υλοποίησης και firmware βοηθά να ελεγχθούν οι παραδοχές του κυκλώματος και να εντοπιστούν καθαρά τα σημεία που χρειάζονται επανέλεγχο ή βελτίωση.

5.2 Περιορισμοί και εμπειρίες από την υλοποίηση

Η τεκμηρίωση έχει ορισμένους συγκεκριμένους περιορισμούς. Ο πλήρης πηγαίος κώδικας C/XC8 του PIC16F1825 βρίσκεται στο Παράρτημα Δ, οπότε τα configuration bits, οι αρχικοί χρόνοι, τα ADC thresholds, η χρήση του Timer2 και η λογική οδήγησης του ρελέ μπορούν να ελεγχθούν απευθείας στον κώδικα. Δεν δίνεται έτοιμο αρχείο HEX. Για το ESP32 περιλαμβάνεται το ESP_FLOW_TEMP.ino. Επίσης δεν παρουσιάζονται ξεχωριστά τα copper routing layers και δεν υπάρχει πλήρης μηχανολογική τομή της υδραυλικής εγκατάστασης ή εργαστηριακό report με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις.

Δεν υπάρχουν τιμολόγια ή αναλυτικές τιμές αγοράς για όλα τα εξαρτήματα, οπότε δεν δίνεται συνολικός προϋπολογισμός σε ευρώ. Η εκτίμηση κόστους παραμένει ποιοτική: ο PIC, οι γραμμικοί ρυθμιστές και τα διακριτά τρανζίστορ αποτελούν σχετικά απλή λύση, ενώ μια έκδοση με ασύρματο SoC, επιπλέον αισθητήρες και πιστοποιημένο AC/DC module θα είχε μεγαλύτερο κόστος αλλά και περισσότερες δυνατότητες.

Ο βασικός περιορισμός είναι ότι δεν υπάρχει πλήρες πειραματικό dataset. Υπάρχουν χρήσιμες μετρήσεις τροφοδοσίας και υπολογιστικές εκτιμήσεις, αλλά όχι ολοκληρωμένη καμπύλη ροής, θερμοκρασίας και επαναληψιμότητας. Για αυτό τα συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια παραμένουν περιορισμένα και δεν παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές ως πραγματικές μετρήσεις.

Ένας δεύτερος περιορισμός είναι ότι το υποσύστημα ESP32 λειτουργεί παράλληλα και όχι σε κλειστό βρόχο ελέγχου. Ο συνολικός όγκος μετριέται, αλλά δεν χρησιμοποιείται για να κλείσει η ηλεκτροβάννα όταν επιτευχθεί η επιθυμητή ποσότητα. Για closed-loop dosing θα χρειαζόταν αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των δύο ελεγκτών ή ενοποίηση των λειτουργιών σε έναν controller, μαζί με σαφή fail-safe λογική.

5.3 Άμεσες προτάσεις βελτίωσης

Οι πρώτες βελτιώσεις μπορούν να γίνουν χωρίς αλλαγή της βασικής φιλοσοφίας. Προτείνεται αύξηση της ονομαστικής τάσης των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών από 16 V σε 25 V ώστε να αυξηθεί το περιθώριο απέναντι στην τάση χωρίς φορτίο. Δεύτερη προτεραιότητα είναι η επαλήθευση του ρεύματος των λευκών LED και, εφόσον απαιτείται, αύξηση των R8/R9. Τρίτη είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας του 78L33A στη μέγιστη κατανάλωση.

Στο firmware προτείνονται watchdog, brown-out reset, σαφής αρχικοποίηση του Rel_control και thresholds ADC με hysteresis/debounce. Στο hardware πρέπει να επιβεβαιωθεί η κατάσταση της ηλεκτροβάνας όταν ο PIC κάνει reset ή όταν χάνεται η 3,3 V. Οι παρεμβάσεις αυτές στοχεύουν στην αύξηση της αξιοπιστίας του βασικού κύκλου ελέγχου νερού πριν από την προσθήκη νέων λειτουργιών.

- Αύξηση της ονομαστικής τάσης των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών της γραμμής 13,5 V από 16 V σε 25 V για μεγαλύτερο περιθώριο.
- Επανέλεγχος των R8/R9 των LED ώστε το ρεύμα να παραμένει με άνεση μέσα στα όρια του συγκεκριμένου VLMW1301.
- Θερμική μέτρηση του 78L33A στη δυσμενέστερη κατάσταση φορτίου και αξιολόγηση buck converter σε επόμενο PCB.
- Πραγματική βαθμονόμηση YF-S201 με γνωστό όγκο και αποθήκευση calibration factor ως παραμετροποιήσιμη τιμή.
- Έλεγχος αποσύνδεσης DS18B20 και εμφάνιση σαφούς fault αντί για μη έγκυρη θερμοκρασία.
- Αποθήκευση totalLiters όταν σταματά η ροή και όχι μόνο ανά 10 s, ώστε να μειώνεται η πιθανή απώλεια δεδομένων.
- Προσθήκη watchdog και timeout που να αντιμετωπίζει μη φυσιολογική συνεχή ροή ή μη αναμενόμενη κατάσταση ρελέ.
- Έλεγχος πραγματικών creepage/clearance πάνω στα copper layers πριν οποιαδήποτε χρήση εκτός ελεγχόμενου εργαστηριακού πρωτοτύπου.

Οι παραπάνω αλλαγές μπορούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία χωρίς να αλλάξει η βασική αρχιτεκτονική. Αρκετές γίνονται μόνο με αλλαγή τιμής εξαρτήματος ή με αλλαγή στο firmware. Αντίθετα, μια νέα αρχιτεκτονική τροφοδοσίας ή η χρήση ενιαίου controller απαιτεί νέο schematic και PCB και ανήκει στις μεγαλύτερες μελλοντικές επεκτάσεις.

5.4 Μελλοντική εξέλιξη του χρονοδιακόπτη και τελικό συμπέρασμα

Σε μία δεύτερη έκδοση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αποδοτικότερος buck converter για τα 3,3 V και logic-level MOSFET για το πηνίο. Αν προστεθούν περισσότερα ρελέ ή άλλα επαγωγικά φορτία, ένα ολοκληρωμένο ULN2003A μπορεί να συγκεντρώσει πολλαπλούς οδηγούς Darlington και διόδους καταστολής σε ένα εξάρτημα [25]. Μία OLED 128×64 θα καταργούσε το ξεχωριστό backlight, με αντάλλαγμα αλλαγή firmware και connector. Η σημαντικότερη λειτουργική επέκταση είναι η αξιοποίηση του υπάρχοντος YF-S201 ως ανάδραση για κλειστό βρόχο δοσομέτρησης, ώστε η ηλεκτροβάννα να κλείνει με βάση τον πραγματικό όγκο και όχι μόνο τον χρόνο. Επίσης, ένας αισθητήρας στάθμης νερού θα μπορούσε να προσθέσει επιπλέον προστασία από λειτουργία χωρίς διαθέσιμο νερό.

Η προσθήκη Wi-Fi ή Bluetooth είναι τεχνικά εφικτή, αλλά πρέπει να γίνει ως νέα φάση σχεδίασης με πρόβλεψη για κυβερνοασφάλεια, ασφαλές update και τοπικό fallback. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι ο προγραμματιζόμενος χρονισμός της ηλεκτροβάννας μπορεί να συνδυαστεί με μέτρηση ροής και θερμοκρασίας, αρκεί να εξετάζονται μαζί η λογική, η ισχύς, η διεπαφή, οι αισθητήρες, το PCB και η ηλεκτρική ασφάλεια.

Η πιο χρήσιμη μελλοντική επέκταση είναι η χρήση της μέτρησης ροής σε κλειστό βρόχο δοσομέτρησης. Ο χρήστης θα ορίζει τον επιθυμητό όγκο και η ηλεκτροβάννα θα κλείνει όταν το totalLiters ή ο μετρητής παλμών φτάσει στον στόχο. Για ασφαλή λειτουργία θα χρειάζονται timeout, έλεγχος μηδενικής ροής και ξεκάθαρη συμπεριφορά σε reset.

Το ESP32 έχει ενσωματωμένο Wi-Fi και Bluetooth [27], οπότε μια επόμενη έκδοση θα μπορούσε να στέλνει τις μετρήσεις σε web interface ή εφαρμογή. Η δυνατότητα αυτή δεν χρησιμοποιείται στο σημερινό firmware και αναφέρεται μόνο ως μελλοντική επέκταση. Πριν προστεθεί cloud ή remote control, προτεραιότητα έχουν η βαθμονόμηση των αισθητήρων, η ηλεκτρική ασφάλεια και η σταθερή λειτουργία του τοπικού συστήματος.

Συνολικά, το σύστημα συνδυάζει αυτόματο χρονισμό της ηλεκτροβάννας με παράλληλη μέτρηση παροχής, συνολικού όγκου και θερμοκρασίας μέσω δύο ανεξάρτητων embedded μονάδων. Η κύρια πλακέτα PIC16F1825 αναλαμβάνει τον χρονισμό και τη διεπαφή της ηλεκτροβάννας, ενώ το υποσύστημα ESP32 αναλαμβάνει τις μετρήσεις. Το επόμενο ουσιαστικό βήμα είναι να χρησιμοποιηθεί η μετρούμενη ροή ως ανάδραση, ώστε η δοσομέτρηση να βασίζεται στον πραγματικό όγκο και όχι μόνο στον χρόνο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Microchip Technology Inc., “PIC16F/LF1825/1829 Data Sheet: 14/20-Pin Flash Microcontrollers with nanoWatt XLP Technology,” DS41440A, 2010.
- [2] Microchip Technology Inc., “PIC16F/LF182X Memory Programming Specification,” technical specification.
- [3] Microchip Technology Inc., “MPLAB PICKit 5 In-Circuit Debugger User’s Guide,” user guide.
- [4] Microchip Technology Inc., “MPLAB X IDE and MPLAB Integrated Programming Environment (IPE),” technical documentation.
- [5] STMicroelectronics, “L78L Positive Voltage Regulators,” datasheet DS0424, Rev. 30, 2024.
- [6] STMicroelectronics, “LM217L/LM317L Low Current 1.2 to 37 V Adjustable Voltage Regulators,” DocID2168, Rev. 7, 2015.
- [7] NXP Semiconductors, “BC847 Series: 45 V, 100 mA NPN General-Purpose Transistors,” Product Data Sheet, Rev. 9, 2014.
- [8] onsemi, “LL4148 Small Signal Diode,” Publication Order Number LL4148/D, Rev. 2, 2022.
- [9] MYRRA, “Safety Printed Circuit Board Transformers,” product datasheet, reference 44158, 2.3 VA, 230 V/9 V.
- [10] OMRON, “G2RL PCB Power Relay,” official datasheet; G2RL-1A-E, 12 VDC, SPST-NO (1a), high-capacity 16 A variant.
- [11] Vishay Semiconductors, “VLMW1301 Highbright 0603 ChipLED,” product data sheet.
- [12] Smarter, “Smarter Coffee - 2nd Generation,” official product information, accessed 20 Aug. 2026.
- [13] Smarter Support, “Smarter Coffee - 2nd Generation: Setup, Features and Integrations,” official support documentation, accessed 20 Aug. 2026.
- [14] Nespresso, “Vertuo Connected Coffee Machines and Nespresso App,” official product/support documentation, accessed 20 Aug. 2026.
- [15] K. Kim, D.-H. Park, H. Bang, G. Hong and S.-I. Jin, “Smart Coffee Vending Machine Using Sensor and Actuator Networks,” 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 71-72, doi: 10.1109/ICCE.2014.6775913.

- [16] S. Pongswatd, K. Smerpitak and T. Thepmanee, “Smart Coffee Vending Machine Based on IoT Concept,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 16, no. 4, pp. 1441-1448, 2020, doi: 10.24507/ijicic.16.04.1441.
- [17] Y. Ishii, E. Saneyoshi, M. Sendoda and R. Kondo, “Anomaly Identification in a Liquid-Coffee Vending Machine Using Electrical Current Waveforms,” *2019 IEEE 2nd International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)*, pp. 98-101, doi: 10.1109/INFOCT.2019.8711414.
- [18] B. Bohara et al., “IoT Based Smart Home Using Blynk Framework,” *arXiv:2007.13714*, 2020.
- [19] IEC 60335-1, Household and Similar Electrical Appliances - Safety - Part 1: General Requirements.
- [20] IEC 60335-2-15, Household and Similar Electrical Appliances - Safety - Part 2-15: Particular Requirements for Appliances for Heating Liquids.
- [21] IPC-2221B, Generic Standard on Printed Board Design, IPC, 2012.
- [22] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed., Cambridge University Press, 2015.
- [23] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th ed., Oxford University Press, 2014.
- [24] Microchip Technology Inc., “PIC16F1825,” official product page and technical resources, accessed 20 Aug. 2026.
- [25] Texas Instruments, “ULN200x, ULQ200x High-Voltage, High-Current Darlington Transistor Arrays,” datasheet, Rev. T, 2025.
- [26] Texas Instruments, “LMR51420 36-V Synchronous Step-Down Converter,” data sheet.
- [27] Espressif Systems, “ESP32 Series Datasheet,” v5.3, 2026.
- [28] Analog Devices / Maxim Integrated, “DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer,” Datasheet, Rev. 6, 2019.
- [29] Espressif Systems, “Arduino-ESP32 Preferences API / NVS,” online documentation, accessed 20 Aug. 2026.
- [30] Espressif Systems, “Arduino-ESP32 GPIO API: Interrupts and attachInterrupt,” online documentation, accessed 20 Aug. 2026.
- [31] Seeed Studio, “Water Flow Sensor,” YF-S201 application and technical documentation, accessed 20 Aug. 2026.
- [32] Arduino, “LiquidCrystal Library,” reference documentation for HD44780-compatible character LCD modules, accessed 20 Aug. 2026.

[33] Winstar Display Co., “WO12864A1 Graphic 128×64 COG LCD Module,” ST7565P, 3.3 V, official product page and datasheet.

[34] TE Connectivity, “FSM4JSMATR Tactile Switch,” official product documentation, part 4-1437565-2.

[35] Crystal Clear Technology / catalog documentation, “CMC216L01YBN 16×2 Character LCD Module,” technical catalog.

[36] Kingstate, “KPEG110 Piezoelectric Buzzer,” technical datasheet and product drawing.

[37] SIRAI, “ZA32A Solenoid Coil,” 220–230 V / 50 Hz, 208–240 V / 60 Hz, Class F, ED 100%, technical documentation.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Συνοπτικός Πίνακας Εξαρτημάτων

Πίνακας Α.1: Βασικά εξαρτήματα και αρχεία της κατασκευής

Ref. / Μονάδα	Τύπος / τιμή	Λειτουργία
T1	MYRRA 44158, 230/9 V, 2,3 VA	Υποβιβασμός και γαλβανική απομόνωση
PT1	DF1506S	Πλήρης ανόρθωση
C4,C10	470 μ F / 16 V	Εξομάλυνση κύριας DC γραμμής
U2	78L33A	Σταθεροποίηση 3,3 V
U3	LM317L + 21 Ω	Πηγή $\approx$ 60 mA για backlight
U1	PIC16F1825	Κεντρικός controller ηλεκτροβάνας
Ρελέ Omron G2RL-1A-E 12 VDC	SPST-NO (1a), high-capacity, 16 A / 250 VAC (ωμικό φορτίο)	Μεταγωγή της γραμμής ισχύος της ηλεκτροβάνας
TR1-TR3	BC847B	Οδήγηση ρελέ και LED
D1	LL4148	Flyback προστασία
LCD1	128×64 COG	Γραφική διεπαφή PIC
ESP32	ESP32 development board	Μέτρηση ροής/θερμοκρασίας
Flow sensor	YF-S201	Hall pulses για παροχή
Temp sensor	DS18B20	Ψηφιακή θερμοκρασία 1-Wire
LCD2	CMC216L01YBN / 16×2	Τοπική απεικόνιση ESP32
KPEG110 piezo buzzer	BC817	Driver buzzer
R1	10 k Ω	Pull-up flow signal
R4	4,7 k Ω	Pull-up 1-Wire
R3/C3	100 k Ω / 10 nF στο schematic	Hardware debounce· 100 nF αναφέρεται σε τεχνική σημείωση της σχεδίασης
P1	10 k Ω	Contrast LCD
STL parts	FLOWMETER_BOTTOM_001 / FLOWMETER_002_V2	Μηχανικά μέρη flowmeter

Σχετική τεχνική τεκμηρίωση: Φωτογραφία ακριβούς MYRRA 44158 (TME) | Επίσημο datasheet / μηχανική διάταξη και pinout MYRRA 44158

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - Βασικά Τμήματα Κώδικα ESP32

Στο παράρτημα δίνονται βασικά τμήματα του αρχείου ESP_FLOW_TEMP.ino που δείχνουν τη λογική μέτρησης ροής και θερμοκρασίας, τον χειρισμό της LCD, την αποθήκευση στη NVS και τη λειτουργία του πλήκτρου και του buzzer.

Κώδικας Παραρτήματος Β.1

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Preferences.h>

// ===== LCD (4-bit Mode) =====
// Pins: RS, EN, D4, D5, D6, D7
LiquidCrystal lcd(19, 23, 18, 5, 16, 15);

// ===== ΟΡΙΣΜΟΣ PINS =====
#define DS18B20_PIN 4
#define FLOW_SENSOR_PIN 14
#define BUTTON_PIN 25
#define BUZZER_PIN 27

// ===== ΣΤΑΘΕΡΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ =====
const float calibrationFactor = 7.5; // F = 7.5 * Q (YF-S201)

// ===== ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ =====
OneWire oneWire(DS18B20_PIN);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// ===== ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΡΟΗΣ =====
volatile unsigned long pulseCount = 0;
unsigned long flowTimer = 0;
unsigned long saveTimer = 0;

// Ρουτίνα Εξυπηρέτησης Διακοπής (ISR)
void IRAM_ATTR pulseCounter() {
    pulseCount++;
}

// ===== ΜΗ-ΠΤΗΤΙΚΗ ΜΝΗΜΗ FLASH =====
Preferences preferences;

// ===== ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ =====
float temperature = 0.0;
float flowRate = 0.0; // Στιγμιαία Ροή σε L/min
float totalLiters = 0.0; // Συνολικός Όγκος σε Liters

// ===== ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΕΝΟΥ =====
byte screen = 0; // 0 = Θερμοκρασία, 1 = Ροή & Όγκος
bool lastButton = HIGH;
unsigned long pressStart = 0;
bool longPressDone = false;

// ===== ΧΡΟΝΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ (TIMERS) =====
unsigned long tempTimer = 0;
unsigned long lcdTimer = 0;

// ===== ΗΧΗΤΙΚΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ (BUZZER) =====
void beep() {
    digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
}
```

```

    delay(80);
    digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
}

void doubleBeep() {
    beep();
    delay(100);
    beep();
}

// ===== ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ =====
void readTemperature() {
    sensors.requestTemperatures();
    temperature = sensors.getTempCByIndex(0);
}

```

Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει τις βιβλιοθήκες, τα pin definitions, τις μεταβλητές, την ISR και τις συναρτήσεις για το buzzer και την ανάγνωση θερμοκρασίας.

Κώδικας Παραρτήματος Β.2

```

// ===== ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΗΣ & ΟΓΚΟΥ =====
void calculateFlow() {
    // Δειγματοληψία ανά 1000ms (1 δευτερόλεπτο)
    if (millis() - flowTimer >= 1000) {
        // Atomic ανάγνωση παλμών με αποφυγή Race Condition
        noInterrupts();
        unsigned long pulses = pulseCount;
        pulseCount = 0;
        interrupts();

        // Υπολογισμός Ροής: Q = (Παλμοί ανά sec) / calibrationFactor
        flowRate = ((1000.0 / (millis() - flowTimer)) * pulses) / calibrationFactor;

        // Ολοκλήρωση Όγκου ανά sec: dV = Q / 60
        totalLiters += flowRate / 60.0;
        flowTimer = millis();
    }

    // Αποθήκευση στη μνήμη Flash ανά 10 sec κατά τη ροή
    if (flowRate > 0.0 && (millis() - saveTimer > 10000)) {
        preferences.putFloat("total", totalLiters);
        saveTimer = millis();
    }
}

```

Το δεύτερο τμήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ροής, την atomic ανάγνωση του pulse counter, τον υπολογισμό του όγκου και την περιοδική εγγραφή στη NVS.

Κώδικας Παραρτήματος Β.3

```

// ===== ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΛΗΚΤΡΟΥ =====
void checkButton() {
    bool buttonState = digitalRead(BUTTON_PIN);

    // Ανίχνευση αρχής πατήματος
    if (lastButton == HIGH && buttonState == LOW) {
        pressStart = millis();
        longPressDone = false;
    }

    // Πατατεταμένο πάτημα (>3 sec) -> Μηδενισμός Συνολικού Όγκου
    if (buttonState == LOW) {

```

```

if ((millis() - pressStart > 3000) && !longPressDone) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("RESET TOTAL?");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Resetting...");

    totalLiters = 0.0;
    preferences.putFloat("total", totalLiters);

    doubleBeep();
    delay(1000);
    longPressDone = true;
    lcd.clear();
}
}

// Σύντομο πάτημα -> Εναλλαγή Οθόνης
if (lastButton == LOW && buttonState == HIGH) {
    if (!longPressDone) {
        screen++;
        if (screen > 1) screen = 0;
        beep();
        lcd.clear();
    }
}

lastButton = buttonState;
}

// ===== ANANEΩΣΗ ΟΘΟΝΗΣ LCD =====
void updateLCD() {
    if (screen == 0) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(" -TEMPERATURE- ");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(temperature, 1);
        lcd.print(" C   ");
    }
    else if (screen == 1) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Flow: ");
        lcd.print(flowRate, 1);
        lcd.print(" L/min ");

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Vol: ");
        lcd.print(totalLiters, 2);
        lcd.print(" L   ");
    }
}
}

```

Το τρίτο τμήμα χειρίζεται το σύντομο και το παρατεταμένο πάτημα του πλήκτρου και την εναλλαγή ανάμεσα στις δύο οθόνες.

Κώδικας Παραρτήματος Β.4

```

// ===== ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ (SETUP) =====
void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
}

```

```

// Ρύθμιση Pin Ροής με FALLING Interrupt
pinMode(FLOW_SENSOR_PIN, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN), pulseCounter, FALLING);

lcd.begin(16, 2);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" FLOW METER ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" Starting... ");
delay(1500);

sensors.begin();

// Ανάκτηση δεδομένων από τη Flash
preferences.begin("flowmeter", false);
totalLiters = preferences.getFloat("total", 0.0);

lcd.clear();
beep();
flowTimer = millis();
}

// ===== ΚΥΠΙΟΣ ΒΡΟΧΟΣ (LOOP) =====
void loop() {
  calculateFlow();

  // Μέτρηση θερμοκρασίας ανά 2 sec
  if (millis() - tempTimer > 2000) {
    readTemperature();
    tempTimer = millis();
  }

  checkButton();

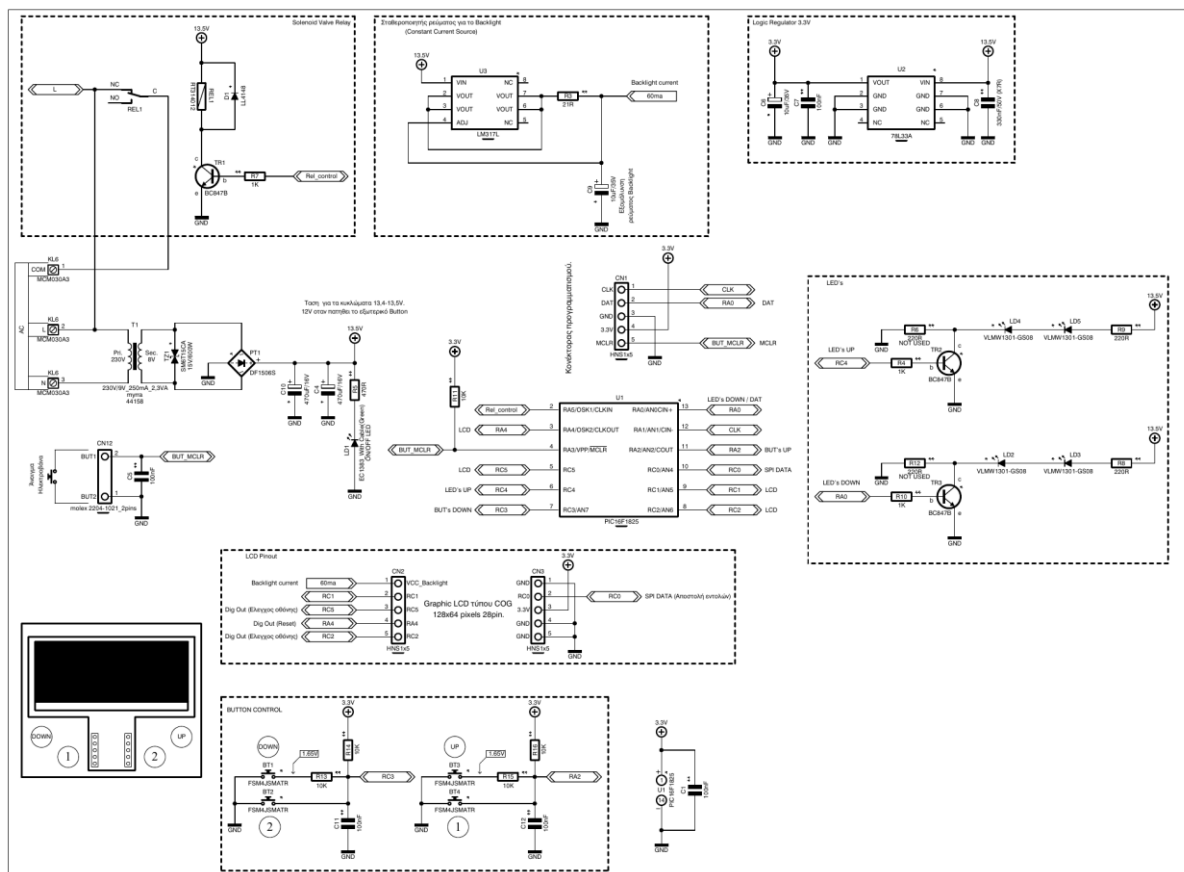
  // Ανανέωση LCD ανά 500 ms
  if (millis() - lcdTimer > 500) {
    updateLCD();
    lcdTimer = millis();
  }
}

```

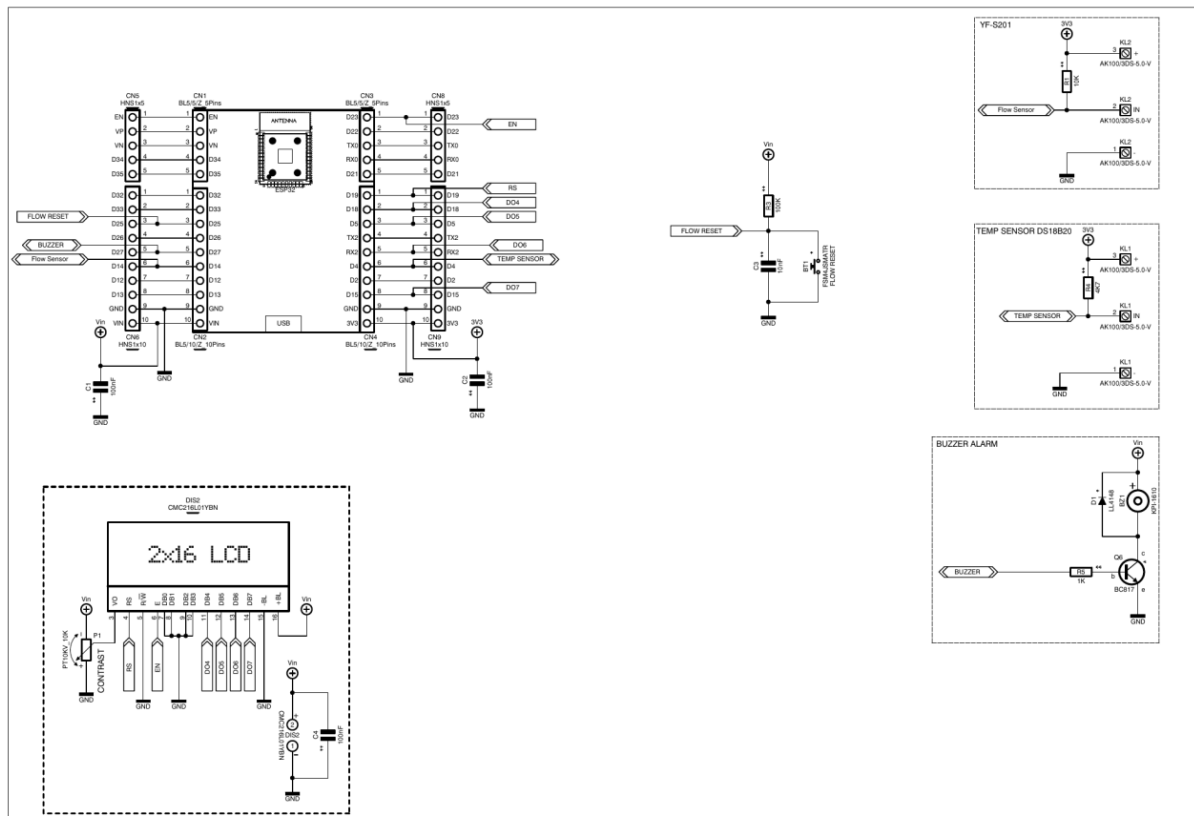
Το τελευταίο τμήμα περιλαμβάνει τις `setup()` και `loop()`, δηλαδή την αρχικοποίηση των περιφερειακών και τον βασικό χρονισμό των λειτουργιών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Σχέδια και Μηχανικά Αρχεία

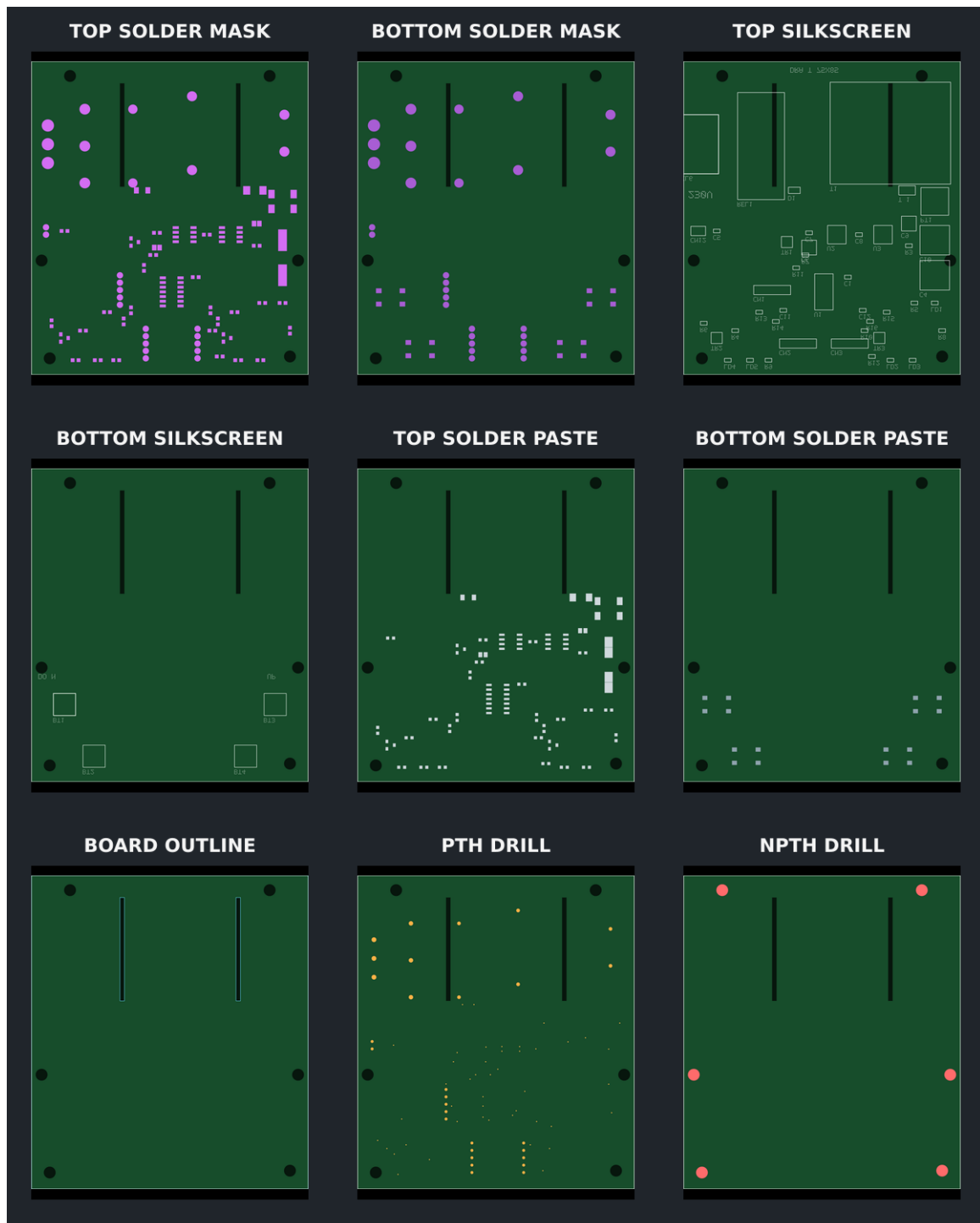
Στο παράρτημα συγκεντρώνονται τα βασικά σχέδια της εργασίας. Οι εικόνες έχουν ήδη αναλυθεί στα αντίστοιχα κεφάλαια και εδώ δίνονται για εύκολη τεχνική αναφορά.



Εικόνα Γ.1: Παράρτημα - πλήρες schematic κύριας πλακέτας PIC.

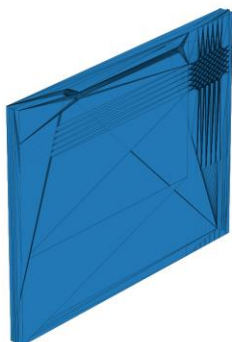


Εικόνα Γ.2: Παράρτημα - πλήρες schematic ESP32 flow/temperature.



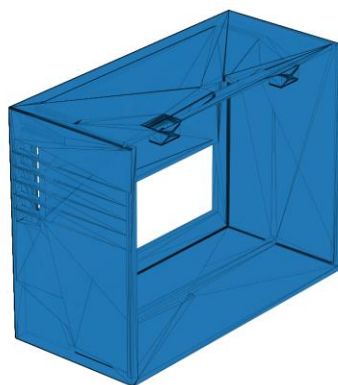
Εικόνα Γ.3: Παράρτημα - συνολικό fabrication set PCB.

FLOWMETER BOTTOM



*Εικόνα Γ.4: Παράρτημα -
FLOWMETER_BOTTOM_001.STL.*

FLOWMETER BODY



*Εικόνα Γ.5: Παράρτημα -
FLOWMETER_002_V2.STL.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - Πηγαίος Κώδικας C του PIC16F1825

Στο παράρτημα δίνεται ο πλήρης πηγαίος κώδικας που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του PIC16F1825 της κύριας πλακέτας. Ο κώδικας είναι γραμμένος σε C για MPLAB XC8 και περιλαμβάνει τις ρυθμίσεις, την κύρια λογική της εφαρμογής, τις ρουτίνες ADC και Timer2, τη σειριακή οδήγηση και την αρχικοποίηση της γραφικής LCD, καθώς και τα γραφικά δεδομένα της οθόνης. Οι βασικές λειτουργίες του firmware είναι η επιλογή και αλλαγή χρόνων μονής και διπλής δόσης, η ανάγνωση των πλήκτρων από δύο αναλογικές εισόδους, ο χρονισμός σε βήματα 1 ms, η ενεργοποίηση του ρελέ και η ενημέρωση της οθόνης κατά την εκχύλιση.

Κώδικας Παραρτήματος Δ.1 - Πλήρες firmware PIC16F1825

```
/* ===[ config.h ]===== */
#ifndef CONFIG_H
#define CONFIG_H

#include <xc.h>

#define _XTAL_FREQ      8000000

/* -- I/O pins --- */
#define LCD_SDA          LATC0
#define LCD_SCK          LATC1
#define LCD_A0           LATA4
#define LCD_RES          LATC2
#define LCD_CS           LATC5

#define LCD_SDA_TRIS     TRISC0
#define LCD_SCK_TRIS     TRISC1
#define LCD_A0_TRIS      TRISA4
#define LCD_RES_TRIS     TRISC2
#define LCD_CS_TRIS      TRISC5

#define BN_START         RA3
#define RELAY_PIN        LATA5

#endif /* CONFIG_H_ */

/* ===[ main.c ]===== */

#include "config.h"
#include <xc.h>
#include "spi.h"
#include "lcd.h"
#include "adc.h"
#include "timer.h"
#include "gfx.h"

/* --- config bits --- */
#pragma config FOSC      = INTOSC
#pragma config WDTE      = OFF
#pragma config PWRTE     = OFF
#pragma config MCLRE     = OFF
#pragma config CP        = OFF
#pragma config CPD       = OFF
#pragma config BOREN     = OFF
#pragma config CLKOUTEN  = OFF
#pragma config IESO      = OFF
#pragma config FCMEN     = OFF

#pragma config WRT       = OFF
#pragma config PLEN      = OFF /* plain 8 MHz HFINTOSC, no 4x PLL */
#pragma config STVREN    = OFF
#pragma config BORV      = LO
#pragma config LVP       = ON

/* default single/double dose times in milliseconds */
#define DEF_SINGLE_MS    1550
#define DEF_DOUBLE_MS    4000

static unsigned int dose_time[] = {DEF_SINGLE_MS, DEF_DOUBLE_MS};
static unsigned int *cur_dose = dose_time;
static unsigned char lock_doses;

static void pump(unsigned int dose);
static void fillcup(unsigned char lvl, unsigned char width);
static void draw_cups(void);
static void draw_number(unsigned int n);
static void draw_times(void);

void main(void)
{
    unsigned char upd_times = 0;
    unsigned int bnleft_val, bnright_val;

    /* 8mhz internal, no PLL */
```

```

OSCCONbits.IRCF = 0xe;
OSCCONbits.SCS = 0;

/* start button on RA3 */
TRISA3 = 1;
OPTION_REGbits.nWPUEN = 0; /* enable pull-ups */
WPUA3 = 1;

/* relay control output */
TRISA5 = 0;
RELAY_PIN = 0;

spi_init();
adc_init();
lcd_init();
timer_init();

draw_cups();

for(;;) {
    bnleft_val = adc_read(7); /* read analog level at RC3/AN7 */
    bnright_val = adc_read(2); /* read analog level at RA2/AN2 */

    if(bnleft_val < 256) {
        /* double dose button pressed (input shorted to ground) */
        cur_dose = dose_time + 1;

        if(bnright_val < 256) {
            /* both single and double dose buttons pressed, toggle lock */
            lock_doses ^= 1;
            __delay_ms(20);
            continue;
        }
    } else if(bnleft_val < 768) {
        /* down button pressed (input through resistor divider ~1.65v) */
        if(!lock_doses && *cur_dose > 0) {
            upd_times = 1;
            --*cur_dose;
        }
    }

    if(bnright_val < 256) {
        /* single dose button pressed (input shorted to ground) */
        cur_dose = dose_time;
    } else if(bnright_val < 768) {
        /* up button pressed (input at ~1.65v) */
        if(!lock_doses && *cur_dose < 0xffff) {
            upd_times = 1;
            ++*cur_dose;
        }
    }

    if(!BN_START) {
        /* start button pressed */
        pump(*cur_dose);
        upd_times = 1;
    }

    if(upd_times) {
        /* upd_times was set, need to redraw the dose time numbers */
        draw_times();
        upd_times = 0;
    }

    __delay_ms(20);
}

static void pump(unsigned int dose)
{
    unsigned long start_msec, msec;
    unsigned int elapsed, saved_dose;
    unsigned char lvl;

    saved_dose = *cur_dose;

    RELAY_PIN = 1; /* close relay to start pumping */

    start_msec = get_msec();
    while((elapsed = (unsigned int)(get_msec() - start_msec)) < dose) {
        /* pumping */
        lvl = elapsed * 20 / dose; /* graphical fill level in pixels */

        if(cur_dose == dose_time) {
            /* filling the single cup */
            lcd_addr_page(3);
            lcd_addr_col(13);
            fillcup(lvl, 35);
        } else {
            /* filling the double cup */
            lcd_addr_page(3);
            lcd_addr_col(90);
            fillcup(lvl, 35);
        }

        /* countdown */
        *cur_dose = dose - elapsed;
        draw_times();
    }

    RELAY_PIN = 0; /* stop pumping */

    *cur_dose = saved_dose;
}

```

```

static void draw_cups(void)
{
    unsigned char i, j;
    const unsigned char *img;

    /* draw single empty cup on the left */
    img = img_cup;
    for(i=0; i<5; i++) {
        lcd_addr_page(2 + i);
        lcd_addr_col(2);
        for(j=0; j<45; j++) {
            lcd_data(*img++);
        }
    }

    /* draw double cup on the right */
    img = img_dbldcup;
    for(i=0; i<5; i++) {
        lcd_addr_page(2 + i);
        lcd_addr_col(72);
        for(j=0; j<52; j++) {
            lcd_data(*img++);
        }
    }
}

static void fillcup(unsigned char lvl, unsigned char width)
{
    unsigned char i, j, pglvl, colpat, start_col = lcd_cur_col;

    for(i=0; i<3; i++) {
        pglvl = lvl - (2 - i) * 8;          /* level within current page */
        colpat = 0xff << (8 - pglvl);      /* column pixel pattern for fill level */

        for(j=0; j<width; j++) {
            lcd_data(colpat);
        }
        lcd_addr_col(start_col);
        lcd_addr_page(lcd_cur_page + 1);
    }
}

static void draw_number(unsigned int n)
{
    unsigned char i, offs, col, len = 0;
    unsigned char dig[8];

    do {
        dig[len++] = n % 10;
        n /= 10;
    } while(n);

    col = lcd_cur_col;
    for(i=0; i<len; i++) {
        offs = dig[len - i - 1] * 8;
        lcd_write(img_digtop + offs, 8);
    }

    lcd_addr_col(col);
    lcd_addr_page(lcd_cur_page + 1);
    for(i=0; i<len; i++) {
        offs = dig[len - i - 1] * 8;
        lcd_write(img_digbot + offs, 8);
    }
}

static void draw_times(void)
{
    static const unsigned char dotglyph[] = {0, 0x0c, 0x0c, 0};
    static const unsigned char num_col[] = {5, 79};
    unsigned int sec, ms;
    unsigned char i, col;

    for(i=0; i<2; i++) {
        sec = dose_time[i] / 1000;
        ms = dose_time[i] % 1000;

        lcd_addr_page(0);
        lcd_addr_col(num_col[i]);

        draw_number(sec);          /* draw seconds */
        lcd_write(dotglyph, sizeof dotglyph); /* draw decimal point */

        lcd_addr_page(0);
        draw_number(ms / 100);     /* draw single digit, hundreds of ms */

        /* draw 's' suffix */
        col = lcd_cur_col;
        lcd_addr_page(0);
        lcd_write(img_digtop + 80, 8);
        lcd_addr_page(1);
        lcd_addr_col(col);
        lcd_write(img_digbot + 80, 8);
    }
}

/* ==== [ adc.h ] ===== */

#ifndef ADC_H_
#define ADC_H_

void adc_init(void);
unsigned int adc_read(unsigned char chan);

#endif /* ADC_H_ */

```

```

/* ===[ adc.c ]===== */

#include "config.h"
#include "adc.h"

void adc_init(void)
{
    ANSELA = 0;
    ANSELB = 0;
    ANSA2 = 1;
    ANSC3 = 1;
    TRISA2 = 1;
    TRISC3 = 1;

    ADCON1bits.ADFM = 1;          /* right-justified result */
    ADCON1bits.ADPREF = 0;       /* ref = VCC */
    ADCON1bits.ADCS = 6;        /* FOSC/64 */
    ADCON1bits.ADON = 1;
}

unsigned int adc_read(unsigned char chan)
{
    ADCON0bits.CHS = chan;
    __delay_us(10);              /* acquisition time */
    while(ADCON0bits.GO_nDONE);
    return ((unsigned int)ADRESH << 8) | ADRESL;
}

/* ===[ timer.h ]===== */

#ifndef TIMER_H_
#define TIMER_H_

void timer_init(void);
unsigned long get_msec(void);

#endif /* TIMER_H_ */

/* ===[ timer.c ]===== */

#include "config.h"
#include "timer.h"
#include <stdio.h>

static volatile unsigned long msec;

void timer_init(void)
{
    /* Timer2: Fosc=8MHz -> Tcy=500ns, prescale 1:16, PR2=124
    * period = (124+1) * 4 * Tcy * 16 = 1.00 ms
    */
    T2CONbits.T2CKPS = 2;        /* prescaler: 1/16 */
    PR2 = 124;
    PIR1bits.TMR2IF = 0;
    PIE1bits.TMR2IE = 1;
    T2CONbits.TMR2ON = 1;

    INTCONbits.PEIE = 1;
    INTCONbits.GIE = 1;
}

unsigned long get_msec(void)
{
    unsigned long val;
    GIE = 0;
    val = msec;
    GIE = 1;
    return val;
}

void __interrupt() isr(void)
{
    if(PIR1bits.TMR2IF) {
        PIR1bits.TMR2IF = 0;
        msec++;
    }
}

/* ===[ spi.h ]===== */

#ifndef SPI_H_
#define SPI_H_

void spi_init(void);
void spi_write(unsigned char val);

#endif /* SPI_H_ */

/* ===[ spi.c ]===== */

#include "config.h"
#include "spi.h"

void spi_init(void)
{
    LCD_SDA_TRIS = 0;
    LCD_SCK_TRIS = 0;
    LCD_SCK = 1;
}

void spi_write(unsigned char val)
{
    unsigned char i;

```

```

        for(i=0; i<8; i++) {
            LCD_SCK = 0;
            LCD_SDA = (val & 0x80) ? 1 : 0;
            val <<= 1;
            LCD_SCK = 1;
        }
    }

/* ==== [ lcd.h ] ===== */
#ifndef LCD_H
#define LCD_H

extern unsigned char lcd_cur_col, lcd_cur_page;

void lcd_init(void);
void lcd_contrast(unsigned char val);
void lcd_clear(void);

void lcd_addr_page(unsigned char page);
void lcd_addr_col(unsigned char col);

void lcd_cmd(unsigned char cmd);
void lcd_data(unsigned char data);
void lcd_write(const unsigned char *ptr, unsigned char n);

#endif /* LCD_H */

/* ==== [ lcd.c ] ===== */
#include "config.h"
#include "lcd.h"

unsigned char lcd_cur_col;

void lcd_init(void)
{
    LCD_CS_TRIS = 0;
    LCD_A0_TRIS = 0;
    LCD_RES_TRIS = 0;
    LCD_CS = 1;
    LCD_A0 = 0;
    LCD_RES = 1;

    LCD_RES = 0;
    delay_ms(20);
    LCD_RES = 1;
    __delay_ms(20);

    lcd_cmd(0xA2); /* LCD bias 1/9 */
    lcd_cmd(0xA0); /* ADC select, normal */
    lcd_cmd(0xC8); /* common output mode, reversed */
    lcd_cmd(0xA6); /* display normal (not inverted) */
    lcd_cmd(0x28 | 0x07); /* power control: booster/regulator/follower on */
    lcd_cmd(0x20 | 0x04); /* internal resistor ratio */
    lcd_contrast(0x20); /* starting contrast, 0-63 */
    lcd_cmd(0xAF); /* display ON */

    lcd_clear();
}

void lcd_contrast(unsigned char val)
{
    lcd_cmd(0x81);
    lcd_cmd(val & 0x3F);
}

void lcd_clear(void)
{
    unsigned char i, j;

    for(i=0; i<8; i++) {
        lcd_addr_page(i);
        lcd_addr_col(0);
        for(j=0; j<128; j++) {
            lcd_data(0);
        }
    }
}

void lcd_addr_page(unsigned char page)
{
    lcd_cur_page = page;
    lcd_cmd(0xB0 | page);
}

void lcd_addr_col(unsigned char col)
{
    lcd_cur_col = col;
    lcd_cmd(0x10 | (col >> 4));
    lcd_cmd(col & 0xf);
}

void lcd_cmd(unsigned char cmd)
{
    LCD_A0 = 0;
    LCD_CS = 0;
    spi_write(cmd);
    LCD_CS = 1;
}

void lcd_data(unsigned char data)
{
    LCD_A0 = 1;

```



```

static const unsigned char img_digtop[] = {
    0b00000011, 0b00000001, 0b11111000, 0b11111100, 0b11111000, 0b00000001,
    0b00000011, 0b11111111, 0b11111111, 0b11100111, 0b11110011, 0b11110001,
    0b00000000, 0b00000000, 0b11111111, 0b11111111, 0b11110001, 0b11110000,
    0b01111100, 0b00111100, 0b00011100, 0b10000000, 0b11000001, 0b11111111,
    0b1111011, 0b11111001, 0b11111000, 0b11001100, 0b11001100, 0b10000000,
    0b00000001, 0b00111111, 0b01111111, 0b00111111, 0b00001111, 0b11000111,
    0b11110001, 0b00000000, 0b00000000, 0b11111111, 0b10000111, 0b10000000,
    0b11001000, 0b11001100, 0b11001100, 0b00011100, 0b00111100, 0b11111111,
    0b00000111, 0b00000001, 0b10011000, 0b11001100, 0b11001100, 0b10001000,
    0b00011001, 0b00111011, 0b11111100, 0b11111100, 0b11111100, 0b00011100,
    0b00000100, 0b11100000, 0b11110000, 0b11111100, 0b00100001, 0b00100000,
    0b10001100, 0b11001100, 0b11001100, 0b00000000, 0b00110001, 0b11111111,
    0b11000011, 0b00000001, 0b00111100, 0b00111100, 0b10111000, 0b00000001,
    0b00000011, 0b11111111, 0b11111111, 0b10001111, 0b01110111, 0b01110111,
    0b01110111, 0b01110111, 0b11101111, 0b11111111
};

static const unsigned char img_digbot[] = {
    0b11111100, 0b11111000, 0b11110001, 0b11110011, 0b11110001, 0b11111000,
    0b11111100, 0b11111111, 0b11111111, 0b11111111, 0b11111111, 0b11111111,
    0b11110000, 0b11110000, 0b11111111, 0b11111111, 0b11110001, 0b11110000,
    0b11110000, 0b11110010, 0b11110011, 0b11110011, 0b11110011, 0b11111111,
    0b11111100, 0b11111000, 0b11110001, 0b11110011, 0b11110011, 0b11110001,
    0b11111000, 0b11111100, 0b11111100, 0b11111100, 0b11111100, 0b11111100,
    0b11111100, 0b11110000, 0b11110000, 0b11111100, 0b11111001, 0b11110001,
    0b11110011, 0b11110011, 0b11110001, 0b11111000, 0b11111100, 0b11111111,
    0b11111100, 0b11111000, 0b11110001, 0b11110011, 0b11110011, 0b11110001,
    0b11111111, 0b11111100, 0b11111111, 0b11111111, 0b11110000, 0b11110000,
    0b11111111, 0b11111111, 0b11111111, 0b11111111, 0b11111100, 0b11111000,
    0b11110001, 0b11110011, 0b11110011, 0b11111000, 0b11111100, 0b11111111,
    0b11111001, 0b11110001, 0b11110011, 0b11110011, 0b11110001, 0b11111000,
    0b11111110, 0b11111111, 0b11111111, 0b11111011, 0b11110111, 0b11110111,
    0b11110111, 0b11110111, 0b11111000, 0b11111111
};

```