

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάπτυξη έξυπνου συστήματος οδικού φωτισμού»



Ο φοιτητής
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΥΦΟΥΔΑΚΗΣ
Αρ. Μητρώου: 2020/074

Επιβλέπων
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2026

Τίτλος Δ.Ε.: Ανάπτυξη έξυπνου συστήματος οδικού φωτισμού

Κωδικός Δ.Ε.: 26139

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Κωνσταντίνος Κουφουδάκης (Α.Μ. 2020/074)

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε.: 06/03/2026

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.: 03/09/2026

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

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κωνσταντίνου Κουφουδάκη 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 διπλωματικής 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.

*«Αφιερωμένο σε όσους δε σταματάνε να πιστεύουν στα όνειρα τους και βρίσκουν τρόπο να τα υλοποιούν
καθώς και στους μοναχικούς δρόμους σε χωριά και πόλεις που φωτίζονται για κανέναν... »*

Πρόλογος

Το θέμα της εργασίας προέκυψε από μια παρατήρηση που έκανα σε έναν επαρχιακό δρόμο κοντά στο χωριό μου. Τα φώτα άναβαν στις εννιά το βράδυ και έσβηναν στις έξι το πρωί, στην ίδια ένταση, με τον δρόμο άδειο για τις περισσότερες από αυτές τις ώρες. Ο συνδυασμός ήταν πολύ σπάταλος και θεώρησα ότι είναι κάτι το οποίο μπορεί να λυθεί με χρήση κάποιων ηλεκτρονικών και μάλιστα χαμηλού κόστους.

Η εργασία μου έδωσε την ευκαιρία να δουλέψω ταυτόχρονα με ηλεκτρονικά ισχύος, αισθητήρες, ενσωματωμένο προγραμματισμό και μετρήσεις. Το κομμάτι που με δίδαξε τα περισσότερα δεν ήταν η θεωρία αλλά οι ώρες που πέρασα προσπαθώντας να καταλάβω γιατί ένας αισθητήρας υπερήχων έδινε τιμές 3 μέτρων μέσα σε ένα κουτί 40 εκατοστών, ή γιατί ο μικροελεγκτής έκανε επανεκκίνηση κάθε φορά που άναβαν ταυτόχρονα τρεις ζώνες λαμπτήρων. Οι απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα δεν βρίσκονται στα εγχειρίδια, αλλά στη διαδικασία της δοκιμής.

Ελπίζω το κείμενο που ακολουθεί να είναι χρήσιμο σε όποιον θελήσει να κατασκευάσει κάτι παρόμοιο, τόσο για όσα δούλεψαν όσο και για όσα δεν δούλεψαν.

Περίληψη

Η εργασία περιγράφει τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη μέτρηση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου οδικού φωτισμού, υλοποιημένου ως φυσική μακέτα με την ονομασία SmartStreet. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η κατανάλωση των συμβατικών δικτύων φωτισμού, τα οποία λειτουργούν σε πλήρη ένταση από τη δύση μέχρι την ανατολή ανεξάρτητα από την πραγματική κυκλοφορία.

Το σύστημα βασίζεται σε μικροελεγκτή Arduino Uno. Τρεις αισθητήρες υπερήχων HC-SR04, ένας ανά ζώνη, ανιχνεύουν τα διερχόμενα αντικείμενα (είτε είναι αυτοκίνητα, είτε κάποιος άνθρωπος), και τρεις ανεξάρτητες ζώνες των τεσσάρων λαμπτήρων LED οδηγούνται μέσω τρανζίστορ 2N2222 με σήματα διαμόρφωσης εύρους παλμού. Όταν ο δρόμος είναι άδειος, οι ζώνες παραμένουν στο 10% της μέγιστης έντασης, διασφαλίζοντας έτσι την μακροζωία των LED και λειτουργούν ως φωτισμός ασφαλείας. Με την ανίχνευση αντικειμένου εντός του παραθύρου των 4 έως 10 εκατοστών, η αντίστοιχη ζώνη ανεβαίνει στο 100% και επανέρχεται στο 10% πέντε δευτερόλεπτα μετά την τελευταία ανίχνευση.

Η εργασία παρουσιάζει τα κριτήρια επιλογής των εξαρτημάτων, τους υπολογισμούς των αντιστάσεων και του ρεύματος βάσης, την κατασκευή της χαρτονένιας μακέτας με τους δώδεκα λαμπτήρες φωτισμού, τη δομή του λογισμικού ελέγχου και τα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά την ολοκλήρωση, ανάμεσά τους η διαφωνία μεταξύ των τριών αισθητήρων υπερήχων. Ακολουθεί λειτουργικός έλεγχος του πρωτοτύπου και υπολογιστική αποτίμηση των ηλεκτρικών μεγεθών και της εξοικονόμησης ενέργειας, με βάση τα φύλλα δεδομένων των εξαρτημάτων.

Για σενάριο δώδεκα ωρών νυχτερινής λειτουργίας με τέσσερις ώρες πραγματικής κίνησης, η ενέργεια του υποσυστήματος φωτισμού μειώνεται κατά 79,8% σε σχέση με τη σταθερή λειτουργία πλήρους έντασης. Όταν προσμετρηθεί η κατανάλωση του μικροελεγκτή και των αισθητήρων, το ποσοστό πέφτει στο 12,5%, εύρημα που οφείλεται στη μικρή κλίμακα του φορτίου και σχολιάζεται αναλυτικά. Η εργασία δείχνει ότι το ποσοστό εξοικονόμησης εξαρτάται από το επίπεδο αναμονής, από το προφίλ κυκλοφορίας και από την κλίμακα της εγκατάστασης, και ότι τα ποσοστά που αναφέρει η βιβλιογραφία δεν συγκρίνονται μεταξύ τους όταν οι παραδοχές τους δεν δηλώνονται.

Development of an Intelligent Street Lighting System

Konstantinos Koufoudakis

Abstract

This thesis describes the design, construction and measurement of an automatic street lighting control system, built as a physical scale model named SmartStreet. The problem it addresses is the consumption of conventional lighting networks, which run at full intensity from dusk until dawn regardless of actual traffic.

The system is based on an Arduino Uno microcontroller. Three HC-SR04 ultrasonic sensors, one per zone, detect passing objects, and three independent lighting zones of four LEDs each are driven through 2N2222 transistors using pulse width modulation. When the road is empty the zones stay at 10% of maximum intensity and act as safety lighting. When an object is detected within the 4 to 10 centimetre window, the corresponding zone rises to 100% and returns five seconds after the last detection.

The thesis presents the component selection criteria, the sizing calculations for the current limiting resistors and the transistor base current, the construction of the cardboard scale model with its twelve lighting poles, the structure of the control software and the problems encountered during integration, among them acoustic crosstalk between the three ultrasonic sensors. A functional verification of the prototype follows, together with a computational assessment of the electrical quantities and of the resulting energy savings, based on component datasheets.

For a scenario of twelve hours of night operation with four hours of actual traffic, the energy of the lighting subsystem falls by 79.8%. Once the consumption of the microcontroller and sensors is included, the figure drops to 12.5%, a result caused by the small scale of the load. The thesis shows that the savings percentage depends on the standby level, the traffic profile and the scale of the installation, and that percentages reported in the literature are not comparable when their assumptions are left undeclared.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη σημαντικών ανθρώπων. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ιορδάνη Κιοσκερίδη, για την καθοδήγηση και τις εύστοχες υποδείξεις του. Θερμές ευχαριστίες οφείλω στους φίλους μου, Κώστα, Χριστόφορο και Βασίλη, καθώς και στην οικογένειά μου, που στάθηκαν δίπλα μου. Ιδιαίτερη μνεία και ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στη Δήμητρα, για τη συνεχή ενθάρρυνση και συμπαράστασή της.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract.....	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xii
Κατάλογος Πινάκων	xiii
Συντομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Το πρόβλημα του οδικού φωτισμού.....	1
1.2 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας.....	1
1.3 Έξυπνες πόλεις και έξυπνος φωτισμός.....	2
1.4 Στόχοι και παραδοτέα.....	2
1.5 Μεθοδολογία.....	2
1.6 Οριοθέτηση της εργασίας	2
1.7 Δομή της εργασίας	3
1.8 Επίλογος	3
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική ανασκόπηση	4
2.1 Εισαγωγή	4
2.2 Από τους λαμπτήρες τόξου στα LED	4
2.3 Συμβατικά συστήματα και οι περιορισμοί τους	4
2.4 Η τεχνολογία LED	4
2.4.1 Αρχή λειτουργίας.....	4
2.4.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και οδήγηση	5
2.4.3 Θερμική συμπεριφορά και χρωματική θερμοκρασία.....	5
2.5 Έλεγχος έντασης με διαμόρφωση εύρους παλμού	5
2.6 Αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης	6
2.6.1 Αισθητήρες υπερήχων.....	6
2.6.2 Υπέρυθροι αισθητήρες	7
2.6.3 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες.....	7
2.6.4 Σύγκριση των τριών τεχνολογιών.....	7
2.7 Φωτοαντιστάσεις και ανίχνευση ημέρας και νύχτας	8
2.8 Αυτόνομη τροφοδοσία με φωτοβολταϊκά.....	8

2.8.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	8
2.8.2 Συσσωρευτές.....	9
2.8.3 Ελεγκτές φόρτισης.....	9
2.9 Δικτύωση, IoT και ανίχνευση βλαβών	9
2.10 Φωτορύπανση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	9
2.11 Στρατηγικές ελέγχου	10
2.12 Το ζήτημα των προτύπων	11
2.13 Φωτοτεχνικά μεγέθη και κριτήρια επάρκειας	11
2.14 Μετρικές ενεργειακής αποτίμησης	12
2.15 Ανασκόπηση συναφών εργασιών	12
2.16 Τι λείπει από τη βιβλιογραφία.....	14
2.17 Επίλογος	15
Κεφάλαιο 3ο: Υλικό και ηλεκτρική μελέτη	16
3.1 Εισαγωγή	16
3.2 Κριτήρια επιλογής εξαρτημάτων	16
3.3 Ο μικροελεγκτής Arduino Uno	16
3.4 Οι αισθητήρες.....	17
3.4.1 Αισθητήρας υπερήχων HC-SR04	17
3.5 Το κύκλωμα φωτισμού	18
3.5.1 Λαμπτήρες LED	18
3.5.2 Οδήγηση με τρανζίστορ	18
3.6 Υπολογισμός αντιστάσεων	19
3.7 Τροφοδοσία από τον μικροελεγκτή	20
3.8 Τροφοδοσία και ισοζύγιο ρευμάτων	21
3.9 Χρονισμός και φύλλο δεδομένων του HC-SR04.....	22
3.10 Εναλλακτικές επιλογές που εξετάστηκαν	24
3.11 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και διαδρομές καλωδίων	24
3.12 Αξιοπιστία και θερμική συμπεριφορά.....	25
3.13 Επίλογος	25
Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση και υλοποίηση της μακέτας.....	26
4.1 Εισαγωγή	26
4.2 Αρχιτεκτονική του συστήματος.....	26
4.3 Η φυσική μακέτα	27
4.3.1 Γεωμετρία και υλικά	27

4.3.2	Οι ιστοί φωτισμού.....	27
4.3.3	Χωροθέτηση του εξοπλισμού	28
4.3.4	Από τον πάγκο στη μακέτα.....	29
4.4	Συνδεσμολογία	33
4.4.1	Τροφοδοσία και κοινή γείωση	34
4.4.2	Σύνδεση των αισθητήρων και δομή κόμβων	34
4.4.3	Σύνδεση των ζωνών φωτισμού.....	35
4.5	Το λογισμικό ελέγχου.....	35
4.5.1	Το περιβάλλον ανάπτυξης	35
4.5.2	Δομή του κώδικα	36
4.5.3	Ο αλγόριθμος ελέγχου.....	37
4.5.4	Διαδοχική ενεργοποίηση των αισθητήρων	38
4.5.5	Μη μπλοκάρουσα χρονομέτρηση	38
4.5.6	Φιλτράρισμα και αποφυγή ψευδών ανιχνεύσεων.....	38
4.5.7	Ομαλή μετάβαση της έντασης	39
4.6	Δομή του πηγαίου κώδικα	39
4.7	Παρακολούθηση μέσω σειριακής θύρας	40
4.8	Προβλήματα που εμφανίστηκαν.....	41
4.9	Διαδικασία συναρμολόγησης και ελέγχου.....	42
4.10	Διαδικασία βαθμονόμησης	43
4.11	Οδηγός χρήσης	43
4.12	Επίλογος	43
Κεφάλαιο 5ο:	Λειτουργικός έλεγχος και υπολογιστική αποτίμηση.....	44
5.1	Εισαγωγή	44
5.2	Λειτουργικός έλεγχος	44
5.3	Ανάλυση του κώδικα ελέγχου	45
5.4	Αναμενόμενα ηλεκτρικά μεγέθη	47
5.5	Εκτίμηση εξοικονόμησης ενέργειας	48
5.6	Η επιλογή του επιπέδου αναμονής.....	49
5.7	Ανάλυση ευαισθησίας σε τρεις τύπους οδού	50
5.8	Σύγκριση με απλό χρονοδιακόπτη μείωσης.....	51
5.9	Οικονομική αποτίμηση σε πραγματική κλίμακα.....	52
5.10	Σύγκριση με τη βιβλιογραφία.....	53
5.11	Περιορισμοί της μελέτης	53

5.12 Επίλογος	54
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις	55
6.1 Συμπεράσματα.....	55
6.2 Τι θα έκανα διαφορετικά	55
6.3 Από τη μακέτα στο πραγματικό οδικό δίκτυο.....	56
6.4 Προτάσεις επέκτασης	57
6.5 Ευρύτερη σημασία	57
6.6 Συμβολή της εργασίας.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΗΓΑΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ	64

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Μορφή σήματος PWM για κύκλο λειτουργίας 25%, 50% και 100%

Σχήμα 3.1: Κύκλωμα οδήγησης μίας ζώνης τεσσάρων LED με τρανζίστορ 2N2222

Σχήμα 3.2: Χρονισμός του αισθητήρα HC-SR04: παλμός Trigger, ριπή υπερήχων και παλμός Echo

Σχήμα 4.1: Διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος SmartStreet

Σχήμα 4.2: Το κέλυφος της μακέτας, με το οδόστρωμα, τους ιστούς φωτισμού και τα διαμερίσματα των ηλεκτρονικών

Σχήμα 4.3: Κάτοψη της μακέτας με τη διάταξη των τριών ζωνών, των αισθητήρων και των διαμερισμάτων

Σχήμα 4.4: Η πρώτη φάση, με τα τρία breadboards σε πάγκο εργασίας και δοκιμαστικούς λαμπτήρες

Σχήμα 4.5: Η ολοκληρωμένη μακέτα σε λειτουργία, με τους δώδεκα ιστούς αναμμένους κατά μήκος του δρόμου

Σχήμα 4.6: Άποψη της μακέτας με τα κτίρια, τη βλάστηση και το όχημα δοκιμών

Σχήμα 4.7: Λεπτομέρεια της ζώνης φωτισμού, με τον φωτεινό κύκλο κάθε ιστού στο οδόστρωμα

Σχήμα 4.8: Το όχημα δοκιμών μέσα στη ζώνη ανίχνευσης, με τους λαμπτήρες σε πλήρη ένταση

Σχήμα 4.9: Το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE κατά τη μεταγλώττιση του κώδικα ελέγχου

Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου

Σχήμα 5.1: Η πρώτη φάση δοκιμών, με τον αισθητήρα υπερήχων και δοκιμαστικό λαμπτήρα σε αυτοσχέδιο ιστό

Σχήμα 5.2: Αναμενόμενο συνολικό ρεύμα ανά κατάσταση λειτουργίας

Σχήμα 5.3: Εξοικονόμηση ενέργειας ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης των ζωνών

Σχήμα 5.4: Εξοικονόμηση ενέργειας ανά τύπο οδού, με και χωρίς την κατανάλωση του ελέγχου

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σύγκριση τεχνολογιών ανίχνευσης κίνησης

Πίνακας 2.2: Συγκριτική επισκόπηση των δώδεκα εργασιών που εξετάστηκαν

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά του Arduino Uno που αφορούν τη σχεδίαση

Πίνακας 3.2: Διαδρομές ρεύματος και όρια τροφοδοσίας

Πίνακας 3.3: Αντιστοίχιση ακίδων του Arduino Uno με τα εξαρτήματα

Πίνακας 3.4: Υπολογιστικό ισοζύγιο ρευμάτων ανά κατάσταση λειτουργίας

Πίνακας 5.1: Αναμενόμενο ρεύμα και ισχύς ανά κατάσταση λειτουργίας

Πίνακας 5.2: Αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας για ενεργό χρόνο 4 ωρών

Πίνακας 5.3: Επίδραση του επιπέδου αναμονής στην εξοικονόμηση

Πίνακας 5.4: Εξοικονόμηση για τέσσερις τύπους οδού

Συντομογραφίες

ADC	Analog to Digital Converter, μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GSM	Global System for Mobile Communications
HID	High Intensity Discharge, λαμπτήρας υψηλής έντασης εκκένωσης
IoT	Internet of Things, Διαδίκτυο των Πραγμάτων
IR	Infrared, υπέρυθρη ακτινοβολία
LDR	Light Dependent Resistor, φωτοεξαρτώμενη αντίσταση
LED	Light Emitting Diode, δίοδος εκπομπής φωτός
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PWM	Pulse Width Modulation, διαμόρφωση εύρους παλμού
SRAM	Static Random Access Memory

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα του οδικού φωτισμού

Ο δημόσιος φωτισμός είναι από τα ακριβότερα πάγια έξοδα ενός δήμου. Ανάλογα με το μέγεθος και τη γεωγραφία της πόλης, ο φωτισμός των δρόμων απορροφά ένα ποσοστό του συνολικού ενεργειακού λογαριασμού που κυμαίνεται από 10% έως 38% [6]. Σε επίπεδο συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, ο οδικός φωτισμός υπολογίζεται σε περίπου 19% [7]. Πρόκειται για μεγάλα νούμερα, και το πιο ενοχλητικό στοιχείο τους είναι ότι ένα σημαντικό μέρος αυτής της ενέργειας δαπανάται σε άδειους δρόμους.

Το τυπικό δίκτυο ανάβει με χρονοδιακόπτη ή με ένα απλό φωτοκύτταρο και σβήνει το πρωί. Ανάμεσα σε αυτά τα δύο γεγονότα δεν συμβαίνει τίποτα άλλο. Ένας δρόμος με δέκα διελεύσεις οχημάτων μετά τις δύο τα ξημερώματα φωτίζεται με την ίδια ισχύ που θα χρειαζόταν αν είχε δέκα διελεύσεις το λεπτό. Η χειροκίνητη μείωση της έντασης κατά τις ώρες χαμηλής κίνησης δεν είναι πρακτικά εφικτή, επειδή θα απαιτούσε προσωπικό σε κάθε πίνακα διανομής, και επειδή οι λαμπτήρες που κυριαρχούν στα υπάρχοντα δίκτυα δεν επιδέχονται ρύθμιση έντασης [4].

Η ενέργεια που δαπανάται χωρίς λόγο δεν χάνεται μόνο οικονομικά. Κάθε επιπλέον κιλοβατώρα μεταφράζεται σε εκπομπές από τη μονάδα παραγωγής που την κάλυψε, και σε πολλές αναπτυσσόμενες περιοχές η ζήτηση ξεπερνά ήδη την προσφορά τις ώρες αιχμής [5], [8]. Υπάρχει και το ζήτημα της φωτορύπανσης, το οποίο σπάνια αναφέρεται σε τεχνικές εργασίες αλλά αφορά άμεσα τον σχεδιασμό: ένας δρόμος που φωτίζεται στο μέγιστο όλη τη νύχτα επηρεάζει τα έντομα, τα πουλιά και τους κατοίκους των γύρω κτιρίων περισσότερο από έναν δρόμο που φωτίζεται στο μέγιστο μόνο όταν περνάει κάποιος.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός συστήματος που ρυθμίζει αυτόματα την ένταση του οδικού φωτισμού με βάση δύο μεταβλητές: το επίπεδο του φυσικού φωτός και την παρουσία κίνησης στον δρόμο. Ο σκοπός δεν είναι απλώς να σβήνουν τα φώτα, αλλά να λειτουργούν στο ελάχιστο επίπεδο που εξακολουθεί να είναι ασφαλές, και να ανεβαίνουν στο μέγιστο μόνο όταν υπάρχει κάποιος για να το χρειαστεί.

Η υλοποίηση έγινε ως φυσική μακέτα και όχι ως προσομοίωση. Η επιλογή αυτή είχε κόστος σε χρόνο, αλλά μου επέτρεψε να συναντήσω προβλήματα που δεν εμφανίζονται σε λογισμικό: αντανάκλασεις των υπερήχων στα τοιχώματα της κατασκευής, ακουστική διαφωνία μεταξύ γειτονικών αισθητήρων που εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα, πτώσεις τάσης όταν ανάβουν πολλοί λαμπτήρες ταυτόχρονα.

Η μακέτα κατασκευάστηκε από χαρτόνι και αναπαριστά ευθύγραμμο τμήμα οδού. Το επάνω μέρος είναι το οδόστρωμα, με διακεκομμένη διαχωριστική γραμμή και τρία παράθυρα πρόσβασης στα ηλεκτρονικά. Οι δώδεκα λαμπτήρες τοποθετούνται στην κορυφή με εμφάνιση λαμπτήρα δρόμου σε κλίμακα 1:87, στην μία πλευρά του δρόμου, και ομαδοποιούνται σε τρεις ανεξάρτητες ζώνες των τεσσάρων LED. Ο εσωτερικός χώρος της βάσης χωρίζεται σε διαμερίσματα που φιλοξενούν τρία breadboards και τον μικροελεγκτή Arduino Uno, ο οποίος τροφοδοτεί ολόκληρο το σύστημα από τη θύρα USB.

1.3 Έξυπνες πόλεις και έξυπνος φωτισμός

Ο όρος «έξυπνη πόλη» χρησιμοποιείται αρκετά ελαστικά, συχνά ως συνώνυμο του «ψηφιακή». Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας τον χρησιμοποιώ με τη στενή του σημασία: μια υποδομή είναι έξυπνη όταν μετράει κάτι από το περιβάλλον της και αλλάζει τη συμπεριφορά της με βάση αυτή τη μέτρηση. Ένας δρόμος με χρονοδιακόπτη είναι αυτόματος αλλά όχι έξυπνος. Ένας δρόμος που ξέρει αν περνάει αυτοκίνητο είναι.

Η διαφορά είναι σημαντική για τον σχεδιασμό. Στο πρώτο μοντέλο η κατανάλωση είναι σταθερή και προβλέψιμη. Στο δεύτερο, η κατανάλωση γίνεται συνάρτηση της πραγματικής χρήσης, και το κέρδος εξαρτάται από το πόσο άδειος είναι στην πράξη ο δρόμος. Σε έναν κεντρικό δρόμο με συνεχή κίνηση, ένα τέτοιο σύστημα δεν εξοικονομεί σχεδόν τίποτα. Σε έναν περιφερειακό ή αγροτικό δρόμο, μπορεί να εξοικονομήσει τα μισά. Αυτή η εξάρτηση από το προφίλ κυκλοφορίας είναι κάτι που η βιβλιογραφία τείνει να παρακάμπτει, και επανέρχεται στην ανάλυση του Κεφαλαίου 5.

1.4 Στόχοι και παραδοτέα

Οι στόχοι της εργασίας ήταν πέντε. Πρώτος, η καταγραφή των τεχνολογιών που χρησιμοποιεί η βιβλιογραφία για ανίχνευση, έλεγχο και τροφοδοσία, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθεμιάς. Δεύτερος, η επιλογή και η ηλεκτρική διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων πριν από οποιαδήποτε συνδεσμολογία, ώστε να μην καεί τίποτα. Τρίτος, η κατασκευή μιας μακέτας που να μπορεί να λειτουργήσει επί ώρες χωρίς επίβλεψη. Τέταρτος, η συγγραφή λογισμικού που να υλοποιεί τον έλεγχο χωρίς μπλοκάρισμα και χωρίς ψευδείς ενεργοποιήσεις. Πέμπτος, η μέτρηση της πραγματικής κατανάλωσης και η σύγκρισή της με τη σταθερή λειτουργία.

Τα παραδοτέα είναι το παρόν κείμενο, η λειτουργική μακέτα, ο πηγαίος κώδικας του λογισμικού ελέγχου στο Παράρτημα Α, και το σύνολο των μετρήσεων του Κεφαλαίου 5.

1.5 Μεθοδολογία

Η δουλειά έγινε σε τέσσερα στάδια, με αρκετή επικάλυψη μεταξύ τους. Το πρώτο ήταν η βιβλιογραφική έρευνα, η οποία επικεντρώθηκε σε δώδεκα εργασίες που περιγράφουν υλοποιημένα συστήματα και όχι μόνο προτάσεις. Το δεύτερο ήταν οι υπολογισμοί: τιμές αντιστάσεων, ρεύματα ανά ακίδα, συνολικό ρεύμα ανά κατάσταση λειτουργίας, θερμικά όρια. Το τρίτο ήταν η κατασκευή, η οποία περιλάμβανε τη μηχανική κατασκευή της μακέτας, τη συνδεσμολογία και τη συγγραφή του κώδικα σε επαναληπτικούς κύκλους δοκιμής και διόρθωσης. Το τέταρτο ήταν οι δοκιμές και μετρήσεις.

Στην πράξη το τρίτο στάδιο επέστρεψε δύο φορές στο δεύτερο. Η αρχική εκτίμηση του συνολικού ρεύματος ήταν λάθος επειδή είχα υπολογίσει την κατανάλωση των αισθητήρων υπερήχων μόνο κατά τη στιγμή της εκπομπής, ενώ ο κώδικας τους καλεί συνεχώς. Η δεύτερη επιστροφή αφορούσε τον αριθμό των ζωνών, ο οποίος περιορίστηκε από τα διαθέσιμα breadboards.

1.6 Οριοθέτηση της εργασίας

Είναι χρήσιμο να δηλωθεί από την αρχή τι δεν καλύπτει η εργασία. Δεν εξετάζεται η φωτοτεχνική μελέτη του δρόμου, δηλαδή ο υπολογισμός του απαιτούμενου επιπέδου φωτισμού ανά κατηγορία οδού και η κατανομή της φωτεινής ροής. Το ζήτημα αυτό καθορίζεται από πρότυπα και προϋποθέτει γνωστά φωτιστικά σώματα, ενώ εδώ τα φωτιστικά είναι LED των 5 mm πάνω σε μακέτα.

Δεν εξετάζεται επίσης η αντοχή σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ένα φωτιστικό δρόμου πρέπει να έχει βαθμό στεγανότητας τουλάχιστον IP65, να αντέχει θερμοκρασίες από μείον δέκα έως συν σαράντα βαθμούς και να μη διαταράσσεται από υγρασία ή σκόνη. Η μακέτα δεν έχει καμία από αυτές τις προδιαγραφές και δεν προορίζεται για εξωτερική χρήση.

Τέλος, δεν εξετάζεται η ασφάλεια του δικτύου σε επίπεδο κυβερνοασφάλειας. Το ζήτημα γίνεται ουσιαστικό μόλις προστεθεί ασύρματη επικοινωνία, όπως προτείνεται στο Κεφάλαιο 6, αλλά δεν αφορά την τρέχουσα υλοποίηση, η οποία δεν έχει καμία δικτυακή διεπαφή.

Αντικείμενο της εργασίας είναι επομένως η λογική ελέγχου και η ενεργειακή της αποτίμηση, μελετημένες σε κλίμακα εργαστηρίου. Τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν αυτό το επίπεδο, και όπου γίνεται προβολή σε πραγματική εγκατάσταση αυτό δηλώνεται ρητά.

1.7 Δομή της εργασίας

Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο και την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας: πώς λειτουργούν οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα και γιατί δεν ρυθμίζονται, πώς λειτουργεί ο έλεγχος έντασης με διαμόρφωση εύρους παλμού, ποιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για ανίχνευση κίνησης, και τι κάνουν οι δώδεκα εργασίες που εξετάστηκαν.

Το Κεφάλαιο 3 αναλύει το υλικό. Περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή και των αισθητήρων, τους υπολογισμούς των αντιστάσεων περιορισμού και του ρεύματος βάσης, το ισοζύγιο ρευμάτων ανά κατάσταση λειτουργίας και το κόστος των εξαρτημάτων.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει την κατασκευή: τη γεωμετρία της μακέτας, τη συνδεσμολογία, τη δομή του λογισμικού και τα προβλήματα που εμφανίστηκαν κατά την ολοκλήρωση.

Το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει τις μετρήσεις, την αξιολόγηση της απόκρισης των αισθητήρων, τον υπολογισμό της εξοικονόμησης και τους περιορισμούς της μελέτης.

Το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα συμπεράσματα και προτείνει επεκτάσεις. Ακολουθούν η βιβλιογραφία και το Παράρτημα Α με τον κώδικα.

1.8 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό ορίστηκε το πρόβλημα της κατανάλωσης στον οδικό φωτισμό, το αντικείμενο και οι στόχοι της εργασίας, και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Το επόμενο κεφάλαιο εξετάζει τι έχει ήδη γίνει στον τομέα και ποιες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Πριν από τον σχεδιασμό ενός συστήματος ελέγχου φωτισμού χρειάζεται να απαντηθούν τρία ερωτήματα. Γιατί τα υπάρχοντα δίκτυα δεν ρυθμίζονται. Με ποιον τρόπο ρυθμίζεται η ένταση ενός LED χωρίς να αλλοιωθεί το χρώμα ή η σταθερότητά του. Και ποιος αισθητήρας ανιχνεύει αξιόπιστα ένα όχημα με κόστος μερικών ευρώ. Το κεφάλαιο απαντά και στα τρία, και κλείνει με την ανασκόπηση δώδεκα εργασιών που έχουν υλοποιήσει παρόμοια συστήματα.

2.2 Από τους λαμπτήρες τόξου στα LED

Ο ηλεκτρικός φωτισμός δρόμων ξεκίνησε στα τέλη του 19ου αιώνα με λαμπτήρες τόξου και συνεχίστηκε με λαμπτήρες πυρακτώσεως. Στα μέσα του 20ού αιώνα κυριάρχησαν οι λαμπτήρες εκκένωσης αερίου, πρώτα υδραργύρου και μετά νατρίου υψηλής πίεσης, επειδή έδιναν πολύ περισσότερα lumen ανά watt. Το χαρακτηριστικό κίτρινο φως του νατρίου παραμένει ορατό σε πολλούς ελληνικούς δρόμους μέχρι σήμερα.

Ο έλεγχος αυτών των δικτύων έμεινε στάσιμος για δεκαετίες. Ξεκίνησε με μηχανικούς χρονοδιακόπτες, πέρασε σε ηλεκτρονικούς και κατέληξε σε φωτοκύτταρα που ανάβουν και σβήνουν το σύνολο του δικτύου. Καμία από αυτές τις λύσεις δεν ρυθμίζει ένταση, επειδή κανένας από αυτούς τους λαμπτήρες δεν το επιτρέπει. Η δυνατότητα ρύθμισης εμφανίστηκε μαζί με τα LED και έγινε πρακτικά προσιτή όταν οι μικροελεγκτές κατέβηκαν σε κόστος λίγων ευρώ. Τα δύο αυτά γεγονότα, τα οποία απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από μία δεκαετία, είναι ο λόγος που η βιβλιογραφία για τον έξυπνο φωτισμό είναι σχεδόν όλη μεταγενέστερη του 2010.

2.3 Συμβατικά συστήματα και οι περιορισμοί τους

Τα δίκτυα που βασίζονται σε λαμπτήρες υψηλής έντασης εκκένωσης έχουν έναν περιορισμό που δεν παρακάμπτεται με λογισμικό. Η φωτεινή εκπομπή προκύπτει από εκκένωση μέσα σε αέριο, και η εκκένωση απαιτεί ελάχιστη τάση για να διατηρηθεί. Μείωση της τάσης δεν μειώνει την ένταση: σβήνει τον λαμπτήρα. Επιπλέον, μετά το σβήσιμο ο λαμπτήρας χρειάζεται χρόνο επαναφοράς που μετριέται σε λεπτά, οπότε η ταχεία εναλλαγή ανάλογα με την κίνηση αποκλείεται εξ ορισμού [1], [4].

Στα μειονεκτήματα προστίθενται η ευαισθησία στις διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου, το κόστος συντήρησης, και για ορισμένους τύπους η περιεκτικότητα σε υδράργυρο, που δημιουργεί υποχρεώσεις διαχείρισης αποβλήτων. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι μια υποδομή που καταναλώνει σταθερά, δεν προσαρμόζεται, και επιβαρύνει τη μονάδα παραγωγής με ζήτηση που δεν αντιστοιχεί σε πραγματική ανάγκη [6].

2.4 Η τεχνολογία LED

2.4.1 Αρχή λειτουργίας

Το LED είναι δίοδος ημιαγωγού. Το βασικό υλικό είναι συνήθως πυρίτιο με προσμείξεις γαλλίου, αρσενικού, ινδίου ή αζώτου, ανάλογα με το επιθυμητό μήκος κύματος. Όταν το ρεύμα διαρρέει την επαφή, τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με οπές και η ενέργεια που απελευθερώνεται εκπέμπεται ως φωτόνιο. Η διαφορά με τον λαμπτήρα πυρακτώσεως είναι θεμελιώδης: εκεί το φως είναι παραπροϊόν της θερμότητας, ενώ στο LED η θερμότητα είναι παραπροϊόν του φωτός.

Πρακτικά αυτό σημαίνει τρία πράγματα. Η απόδοση σε lumen ανά watt είναι πολλαπλάσια, η διάρκεια ζωής μετριέται σε δεκάδες χιλιάδες ώρες, και η απόκριση στην ενεργοποίηση είναι άμεση, χωρίς χρόνο προθέρμανσης. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι η αντικατάσταση συμβατικών λαμπτήρων με LED μειώνει την κατανάλωση έως και τρεις φορές, ακόμη και πριν εφαρμοστεί οποιαδήποτε λογική ελέγχου [5], [9].

2.4.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και οδήγηση

Το LED δεν συμπεριφέρεται σαν αντίσταση. Κάτω από μια τάση κατωφλίου δεν άγει καθόλου, και πάνω από αυτήν το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά με μικρές μεταβολές της τάσης. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση ορθής φοράς και για τα λευκά LED των 5 mm κυμαίνεται στα 3,0 V έως 3,2 V, με ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας γύρω στα 20 mA.

Η συνέπεια είναι ότι ένα LED δεν συνδέεται ποτέ απευθείας σε πηγή τάσης. Χρειάζεται είτε πηγή σταθερού ρεύματος είτε, στην απλή περίπτωση, μια αντίσταση σε σειρά που περιορίζει το ρεύμα. Ο υπολογισμός αυτής της αντίστασης παρουσιάζεται στην ενότητα 3.7. Ένα δεύτερο σημείο που αγνοείται συχνά είναι ότι η τάση ορθής φοράς μειώνεται καθώς η θερμοκρασία της επαφής αυξάνεται, οπότε ένα LED που ζεσταίνεται τραβάει περισσότερο ρεύμα, ζεσταίνεται περισσότερο και ούτω καθεξής. Η αντίσταση σε σειρά περιορίζει και αυτό το φαινόμενο.

2.4.3 Θερμική συμπεριφορά και χρωματική θερμοκρασία

Δύο χαρακτηριστικά των LED που δεν αφορούν άμεσα τον έλεγχο αλλά καθορίζουν την ποιότητα μιας εγκατάστασης είναι η διαχείριση της θερμότητας και η χρωματική θερμοκρασία.

Παρότι το LED δεν παράγει φως μέσω θερμότητας, ένα μέρος της ηλεκτρικής ισχύος μετατρέπεται σε θερμότητα στην ίδια την επαφή. Σε φωτιστικά ισχύος, η θερμότητα αυτή πρέπει να απομακρυνθεί μέσω ψύκτρας, αλλιώς η θερμοκρασία της επαφής ανεβαίνει, η φωτεινή ροή πέφτει και η διάρκεια ζωής μειώνεται δραματικά. Η υποβάθμιση δεν είναι γραμμική: αύξηση της θερμοκρασίας επαφής κατά δέκα βαθμούς μπορεί να υποδιπλασιάσει την ωφέλιμη ζωή. Στα LED των 5 mm της μακέτας, με ρεύμα 9 mA το καθένα, το θέμα δεν τίθεται, αλλά σε κλιμάκωση γίνεται από τα πρώτα ζητήματα σχεδίασης.

Η χρωματική θερμοκρασία, μετρημένη σε kelvin, καθορίζει αν το φως είναι ψυχρό ή θερμό. Τα ψυχρά λευκά LED, γύρω στα 5000 K έως 6000 K, έχουν ελαφρώς υψηλότερη απόδοση σε lumen ανά watt, και για τον λόγο αυτό επιλέγονται συχνά σε αναβαθμίσεις δικτύων. Η επιλογή αυτή έχει όμως κόστος: το ψυχρό φως περιέχει περισσότερη μπλε συνιστώσα, η οποία σκεδάζεται περισσότερο στην ατμόσφαιρα, επιδεινώνει τη φωτορύπανση και επηρεάζει τους κερκαδικούς ρυθμούς ανθρώπων και ζώων. Αρκετοί δήμοι στην Ευρώπη έχουν στραφεί για τους λόγους αυτούς σε θερμότερες αποχρώσεις γύρω στα 3000 K, δεχόμενοι μια μικρή απώλεια απόδοσης. Είναι ένα καλό παράδειγμα του ότι η βελτιστοποίηση ενός μόνο μεγέθους, εδώ των lumen ανά watt, δεν δίνει απαραίτητα την καλύτερη συνολική λύση.

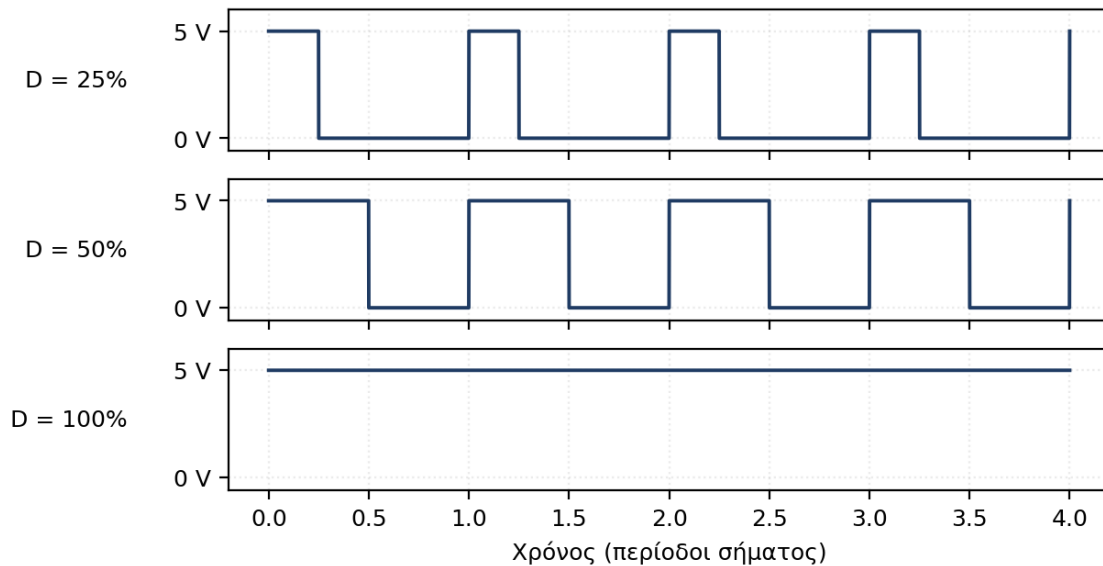
2.5 Έλεγχος έντασης με διαμόρφωση εύρους παλμού

Επειδή η σχέση τάσης και ρεύματος στο LED είναι απότομη, η ρύθμιση της έντασης με μείωση της τάσης είναι δύσκολη και ασταθής. Η λύση που χρησιμοποιείται καθολικά είναι η διαμόρφωση εύρους παλμού, γνωστή ως PWM. Αντί να μειωθεί η τάση, το LED ανάβει και σβήνει με μεγάλη συχνότητα, και ρυθμίζεται το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο παραμένει αναμμένο. Το ποσοστό αυτό ονομάζεται κύκλος λειτουργίας.

Με κύκλο λειτουργίας 30%, το LED ανάβει για το 30% κάθε περιόδου και μένει σβηστό για το υπόλοιπο 70%. Το μέσο ρεύμα, και άρα η μέση ισχύς, πέφτει αναλόγως. Το μάτι δεν αντιλαμβάνεται την εναλλαγή

εφόσον η συχνότητα είναι αρκετά υψηλή, και βλέπει μια σταθερή, χαμηλότερη φωτεινότητα. Το Arduino Uno παράγει PWM στα 490 Hz στις περισσότερες ακίδες και στα 980 Hz στις ακίδες 5 και 6, τιμές αρκετά πάνω από το όριο αντίληψης.

Το Σχήμα 2.1 δείχνει τη μορφή του σήματος για τρεις τιμές κύκλου λειτουργίας. Η γραμμικότητα της σχέσης μεταξύ κύκλου λειτουργίας και μέσου ρεύματος είναι ο λόγος που ο έλεγχος υλοποιείται με μία μόνο εντολή στον κώδικα, χωρίς πρόσθετα ηλεκτρονικά πέρα από τον διακόπτη ισχύος.



Σχήμα 2.1: Μορφή σήματος PWM για κύκλο λειτουργίας 25%, 50% και 100%

Πρέπει να σημειωθεί ότι η αντιλαμβανόμενη φωτεινότητα δεν ακολουθεί γραμμικά τον κύκλο λειτουργίας, επειδή η απόκριση του ματιού είναι περίπου λογαριθμική. Ένα LED στο 50% κύκλο λειτουργίας φαίνεται αισθητά πιο φωτεινό από το μισό. Για τους σκοπούς της εξοικονόμησης ενέργειας αυτό λειτουργεί υπέρ μας: η μείωση της ισχύος στο 30% δίνει φωτισμό που υποκειμενικά μοιάζει πολύ πιο κοντά στο μισό της πλήρους έντασης.

2.6 Αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης

Η επιλογή του αισθητήρα καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά του συστήματος. Η βιβλιογραφία χρησιμοποιεί τρεις κατηγορίες.

2.6.1 Αισθητήρες υπερήχων

Ο αισθητήρας υπερήχων εκπέμπει έναν παλμό ήχου σε συχνότητα περίπου 40 kHz και μετράει τον χρόνο μέχρι να επιστρέψει η ηχώ. Από τον χρόνο και την ταχύτητα του ήχου προκύπτει η απόσταση. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι δίνει αριθμητική τιμή απόστασης και όχι απλή ένδειξη παρουσίας, οπότε επιτρέπει διάκριση μεταξύ ενός οχήματος στη λωρίδα και ενός αντικείμενου στο πεζοδρόμιο. Η εμβέλεια φτάνει τα 11 μέτρα σε ανοιχτό χώρο [1], [10].

Τα μειονεκτήματα εμφανίστηκαν άμεσα κατά τις δοκιμές. Η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη θερμοκρασία, οπότε η μέτρηση μετατοπίζεται περίπου 0,17% ανά βαθμό Κελσίου. Σε κλειστό χώρο ο παλμός ανακλάται στα τοιχώματα και επιστρέφει με καθυστέρηση, δίνοντας τιμές που δεν αντιστοιχούν σε κανένα υπαρκτό αντικείμενο. Ένα αντικείμενο με λοξή ή μαλακή επιφάνεια μπορεί να μην επιστρέψει καθόλου ηχώ.

2.6.2 Υπέρυθροι αισθητήρες

Η μονάδα υπέρυθρων αποτελείται από ένα LED που εκπέμπει σε μήκος κύματος γύρω στα 940 nm και μια φωτοδίοδο που λαμβάνει. Στη διάταξη ανίχνευσης εμποδίου, ο δέκτης λαμβάνει την ανάκλαση από το αντικείμενο και η έξοδος του αισθητήρα μεταβαίνει σε λογικό μηδέν. Ο μικροελεγκτής διαβάζει την αλλαγή και ανάβει την αντίστοιχη ομάδα λαμπτήρων. Καθώς το όχημα προχωράει, ενεργοποιούνται διαδοχικά τα μπροστινά φώτα και επανέρχονται τα πίσω, δημιουργώντας έναν διάδρομο φωτός που ακολουθεί την κίνηση [2], [12].

Το κύριο πρόβλημα των υπέρυθρων είναι ότι ο ήλιος εκπέμπει έντονα στην ίδια περιοχή του φάσματος. Ένας δέκτης χωρίς διαμόρφωση φέροντος κορέννεται σε άμεσο ηλιακό φως και σταματά να διακρίνει τον δικό του πομπό. Οι εμπορικές μονάδες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα με διαμόρφωση στα 38 kHz και οπτικά φίλτρα, χωρίς όμως να το εξαλείφουν εντελώς.

2.6.3 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες

Η τρίτη προσέγγιση τοποθετεί πιεζοηλεκτρικά στοιχεία κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Η πίεση του διερχόμενου τροχού παραμορφώνει το κρυσταλλικό υλικό και παράγει τάση, την οποία διαβάζει ο μικροελεγκτής. Οι Balachandran κ.ά. [6] υιοθέτησαν αυτή τη λύση ακριβώς για να αποφύγουν τα προβλήματα των υπέρυθρων, χρησιμοποιώντας μικροελεγκτή MSP430, και επισημαίνουν ότι οι υπέρυθροι δυσκολεύονται να διακρίνουν πολλαπλά οχήματα που περνούν ταυτόχρονα.

Το πλεονέκτημα είναι η πλήρης προστασία από τις καιρικές συνθήκες και τον εξωτερικό φωτισμό, καθώς και το ότι το ίδιο το στοιχείο δεν καταναλώνει ενέργεια για να λειτουργήσει. Το μειονέκτημα είναι το κόστος και η δυσκολία εγκατάστασης, αφού απαιτείται επέμβαση στο ίδιο το οδόστρωμα, κάτι που σε υπάρχοντα δρόμο σημαίνει τομή και αποκατάσταση της ασφάλτου.

2.6.4 Σύγκριση των τριών τεχνολογιών

Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των τριών κατηγοριών όπως προκύπτουν από τη βιβλιογραφία και από τις δοκιμές της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση τεχνολογιών ανίχνευσης κίνησης

Χαρακτηριστικό	Υπέρηχοι	Υπέρυθροι	Πιεζοηλεκτρικοί	Επιλογή εδώ
Έξοδος	Απόσταση (αριθμητική)	Παρουσία (δυαδική)	Παλμός τάσης	Υπέρηχοι
Εμβέλεια	έως 11 m	έως ~1 m	σημειακή	—
Κόστος ανά μονάδα	χαμηλό	πολύ χαμηλό	μεσαίο	—
Εναισθησία σε ηλιακό φως	καμία	υψηλή	καμία	κρίσιμο κριτήριο
Ρύθμιση κατωφλίου	από λογισμικό	με ποτενσιόμετρο	από λογισμικό	κρίσιμο κριτήριο
Αντοχή σε καιρικά φαινόμενα	μεσαία	χαμηλή	υψηλή	—
Δυσκολία εγκατάστασης	χαμηλή	χαμηλή	υψηλή (τομή οδοστρώματος)	—
Διάκριση πολλαπλών οχημάτων	όχι	όχι	ναι	—
Διαφωνία σε συστοιχία	ναι, απαιτεί σειριακή ανάγνωση	όχι	όχι	αντιμετωπίστηκε

Για τη μακέτα επιλέχθηκαν αποκλειστικά αισθητήρες υπερήχων, ένας ανά ζώνη φωτισμού. Οι υπέρυθροι απορρίφθηκαν για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι η ευαισθησία τους στο εξωτερικό φως, η οποία θα καθιστούσε τη συμπεριφορά της μακέτας εξαρτημένη από τον φωτισμό του χώρου επίδειξης. Ο δεύτερος είναι ότι η ρύθμιση του κατωφλίου τους γίνεται με ποτενσιόμετρο σε κάθε μονάδα, δηλαδή μηχανικά και μη επαναλήψιμα, ενώ στους υπερήχους το κατώφλι είναι μια σταθερά στον κώδικα. Οι πιεζοηλεκτρικοί απορρίφθηκαν επειδή η μακέτα δεν έχει πραγματικό οδόστρωμα στο οποίο να ενσωματωθούν. Η επιλογή ομοειδών αισθητήρων εισάγει ωστόσο ένα πρόβλημα που δεν υπάρχει σε ετερογενή διάταξη, την ακουστική διαφωνία, το οποίο αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

2.7 Φωτοαντιστάσεις και ανίχνευση ημέρας και νύχτας

Η φωτοαντίσταση, ή LDR, είναι μια αντίσταση από ημιαγωγό υψηλής αντίστασης, συνήθως θειούχο κάδμιο. Η τιμή της μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το προσπίπτον φως: στο απόλυτο σκοτάδι φτάνει μερικά megaohm, ενώ σε έντονο φωτισμό πέφτει σε μερικές εκατοντάδες ohm [1], [9].

Ο μηχανισμός είναι η φωτοαγωγιμότητα. Τα φωτόνια που απορροφώνται από τον ημιαγωγό δίνουν στα δεσμευμένα ηλεκτρόνια αρκετή ενέργεια ώστε να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Τα ελεύθερα πλέον ηλεκτρόνια άγουν ρεύμα και η αντίσταση πέφτει. Η μεταβολή δεν είναι ακαριαία: μια τυπική LDR χρειάζεται μερικές δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου για να ανταποκριθεί, χρόνος αμελητέος για την εφαρμογή αλλά αρκετός ώστε να μην χρειάζεται πρόσθετο φιλτράρισμα.

Στο κύκλωμα η LDR συνδέεται ως το ένα σκέλος ενός διαιρέτη τάσης, με σταθερή αντίσταση στο άλλο. Ο μικροελεγκτής διαβάζει την τάση στο μεσαίο σημείο ως αναλογική τιμή και τη συγκρίνει με ένα κατώφλι. Η επιλογή του κατωφλίου δεν είναι προφανής: ένα μονό κατώφλι προκαλεί ταλάντωση του συστήματος όταν το φως βρίσκεται ακριβώς στο όριο, και η αντιμετώπιση είναι δύο διαφορετικές τιμές για τις δύο κατευθύνσεις μετάβασης, τεχνική γνωστή ως υστέρηση.

Η παρούσα υλοποίηση δεν περιλαμβάνει φωτοαντίσταση. Η ενότητα αυτή παρατίθεται επειδή το εξάρτημα εμφανίζεται σχεδόν σε όλες τις εργασίες που εξετάστηκαν και επειδή η προσθήκη του αποτελεί την πρώτη πρόταση επέκτασης του Κεφαλαίου 6.

2.8 Αυτόνομη τροφοδοσία με φωτοβολταϊκά

Ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας συνδυάζει τον έξυπνο έλεγχο με αυτόνομη τροφοδοσία από τον ήλιο [5], [8], [9], [11]. Ο λόγος είναι πρακτικός: ένας ιστός που δεν χρειάζεται καλωδίωση προς το δίκτυο μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε, και το κόστος της υποδομής διανομής συχνά ξεπερνά το κόστος του ίδιου του φωτιστικού.

2.8.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατασκευάζονται από δίσκους πυριτίου και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Τα μονοκρυσταλλικά δίνουν την υψηλότερη απόδοση, περίπου 15%, ακολουθούν τα πολυκρυσταλλικά με 14% και τα λεπτού υμενίου με 10,36% [9]. Σε εφαρμογές οδικού φωτισμού προτιμώνται τα μονοκρυσταλλικά, όχι επειδή η διαφορά απόδοσης είναι δραματική, αλλά επειδή για την ίδια παραγόμενη ισχύ καταλαμβάνουν μικρότερη επιφάνεια στην κορυφή του ιστού, όπου ο χώρος και το βάρος είναι περιορισμένα.

2.8.2 Συσσωρευτές

Η ενέργεια αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Οι συνηθέστερες επιλογές είναι μολύβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου και ιόντων ή πολυμερών λιθίου. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος κλειστού τύπου παραμένουν οι πιο διαδεδομένες σε ηλιακά συστήματα λόγω κόστους και ωριμότητας, με το μειονέκτημα ότι επιτρέπουν βάθος εκφόρτισης μόνο 20% έως 50% [11]. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μια μπαταρία 4,5 Ah προσφέρει διαθέσιμη χωρητικότητα γύρω στις 2 Ah αν θέλουμε λογική διάρκεια ζωής, και η διαστασιολόγηση πρέπει να γίνει με βάση αυτόν τον αριθμό και όχι τον ονομαστικό.

2.8.3 Ελεγκτές φόρτισης

Ανάμεσα στο πλαίσιο και τη μπαταρία παρεμβάλλεται ο ελεγκτής φόρτισης. Ο ρόλος του είναι διπλός: αποτρέπει την υπερφόρτιση από το πλαίσιο και τη βαθιά εκφόρτιση προς το φορτίο. Οι ελεγκτές τύπου PWM είναι φθηνότεροι και απλούστεροι, ενώ οι ελεγκτές μέγιστου σημείου ισχύος, γνωστοί ως MPPT, προσαρμόζουν το σημείο λειτουργίας του πλαισίου ώστε να εξάγουν τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ, με σημαντική διαφορά σε συνθήκες συννεφιάς ή χαμηλής γωνίας πρόσπτωσης.

Οι Nanavati κ.ά. [10] προτείνουν επιπλέον μηχανισμό παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου με σερβοκινητήρες. Το κέρδος σε παραγωγή είναι υπαρκτό, αλλά προσθέτει κινούμενα μέρη σε μια εγκατάσταση που υποτίθεται ότι λειτουργεί χωρίς συντήρηση για χρόνια, και αυτό είναι ένα trade-off που η εργασία τους δεν συζητά.

2.9 Δικτύωση, IoT και ανίχνευση βλαβών

Η επόμενη διαβάθμιση πολυπλοκότητας είναι η δικτύωση των ιστών. Με μια μονάδα GSM ή ασύρματης επικοινωνίας, κάθε ιστός γίνεται κόμβος τηλεμετρίας που στέλνει δεδομένα σε κεντρικό σύστημα [7]. Η πιο άμεσα χρήσιμη εφαρμογή δεν είναι η παρακολούθηση της κατανάλωσης αλλά η ανίχνευση βλαβών: όταν καεί ένας λαμπτήρας ή κοπεί μια γραμμή, το σύστημα στέλνει μήνυμα στο κέντρο συντήρησης αντί να περιμένει να το αναφέρει κάποιος περαστικός. Οι Nanavati κ.ά. [10] περιλαμβάνουν ακριβώς αυτή τη λειτουργία με ειδοποίηση SMS.

Σε πιο σύνθετες υλοποιήσεις, τα δεδομένα των αισθητήρων συνδυάζονται με κάμερες για αναγνώριση υπερβάσεων ταχύτητας ή πινακίδων, και ο έλεγχος της έντασης γίνεται με ελεγκτές ασαφούς λογικής που λαμβάνουν υπόψη την πυκνότητα κυκλοφορίας αντί για μεμονωμένα γεγονότα [7], [12]. Η παρούσα υλοποίηση δεν περιλαμβάνει μονάδα επικοινωνίας. Η αρχιτεκτονική όμως αφήνει ελεύθερες ακίδες και τη σειριακή θύρα, ώστε η προσθήκη να μην απαιτεί επανασχεδιασμό, και το θέμα επανέρχεται στις προτάσεις του Κεφαλαίου 6.

2.10 Φωτορύπανση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η συζήτηση για τον οδικό φωτισμό επικεντρώνεται σχεδόν πάντα στην κατανάλωση ενέργειας, επειδή αυτή εμφανίζεται στον λογαριασμό. Υπάρχει όμως και μια δεύτερη κατηγορία επιπτώσεων, η οποία δεν κοστολογείται αλλά είναι υπαρκτή, και την οποία ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού μειώνει χωρίς πρόσθετη προσπάθεια.

Ο όρος φωτορύπανση περιγράφει τον τεχνητό φωτισμό που εκπέμπεται εκεί όπου δεν χρειάζεται, είτε ως προς τον χώρο είτε ως προς τον χρόνο. Διακρίνεται σε τρεις μορφές. Η λάμψη ουρανού είναι το φως που κατευθύνεται ή ανακλάται προς τα πάνω και σκεδάζεται στην ατμόσφαιρα, δημιουργώντας τον χαρακτηριστικό πορτοκαλί θόλο πάνω από τις πόλεις. Η διείσδυση φωτός είναι το φως που πέφτει σε

ιδιοκτησίες όπου δεν προοριζόταν, τυπικά μέσα από τα παράθυρα κατοικιών δίπλα σε φωτισμένους δρόμους. Η θάμβωση είναι το υπερβολικά έντονο φως που μειώνει την ορατότητα αντί να την αυξάνει.

Η επίδραση στη νυχτόβια πανίδα είναι τεκμηριωμένη και συχνά υποτιμάται. Τα έντομα προσελκύονται από τις πηγές φωτός και εξαντλούνται πετώντας γύρω τους, με αποτέλεσμα την τοπική μείωση των πληθυσμών τους και, κατ' επέκταση, των ειδών που τρέφονται από αυτά. Τα μεταναστευτικά πουλιά, τα οποία προσανατολίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα άστρα, αποπροσανατολίζονται από τη λάμψη των αστικών κέντρων. Στα θηλαστικά, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου, ο τεχνητός φωτισμός τη νύχτα καταστέλλει την έκκριση μελατονίνης και διαταράσσει τον κιρκάδιο ρυθμό.

Ένα σύστημα που κρατά τους λαμπτήρες σε χαμηλή ένταση όταν ο δρόμος είναι άδειος μειώνει και τις τρεις μορφές φωτορύπανσης κατά το ίδιο ποσοστό που μειώνει την ενέργεια, δηλαδή στη συγκεκριμένη υλοποίηση κατά περίπου 80% στα διαστήματα αναμονής. Το όφελος αυτό είναι δωρεάν, με την έννοια ότι δεν απαιτεί καμία πρόσθετη σχεδίαση πέρα από αυτήν που γίνεται ήδη για ενεργειακούς λόγους.

Υπάρχει και ένα σημείο όπου οι δύο στόχοι δεν συμβαδίζουν. Η επιλογή ψυχρού λευκού φωτός, η οποία δικαιολογείται ενεργειακά επειδή δίνει ελαφρώς περισσότερα lumen ανά watt, επιδεινώνει τη φωτορύπανση επειδή η μπλε συνιστώσα σκεδάζεται περισσότερο στην ατμόσφαιρα και επηρεάζει εντονότερα τους βιολογικούς ρυθμούς. Αρκετοί δήμοι στην Ευρώπη έχουν στραφεί για τον λόγο αυτό σε θερμότερες αποχρώσεις, δεχόμενοι μια μικρή απώλεια απόδοσης. Πρόκειται για παράδειγμα του ότι η βελτιστοποίηση ενός μόνο μεγέθους δεν δίνει απαραίτητα τη συνολικά καλύτερη λύση.

2.11 Στρατηγικές ελέγχου

Ανάμεσα στο δίκτυο που ανάβει και σβήνει και στο δίκτυο που αντιδρά σε κάθε διερχόμενο όχημα υπάρχουν αρκετά ενδιάμεσα στάδια. Η βιβλιογραφία δεν τα διακρίνει πάντα καθαρά, οπότε αξίζει να καταγραφούν.

Ο έλεγχος ανάμματος και σβησίματος είναι το ελάχιστο. Ένα φωτοκύτταρο ή ένας χρονοδιακόπτης ενεργοποιεί το σύνολο του δικτύου. Η μόνη παράμετρος που ρυθμίζεται είναι η ώρα ή το κατώφλι φωτισμού, και η μόνη εξοικονόμηση προέρχεται από τη σωστή ρύθμισή τους. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι σε πολλές εγκαταστάσεις τα φώτα ανάβουν αρκετά πριν χρειαστεί και σβήνουν αρκετά μετά, με σπατάλη που φτάνει τη μία ώρα ημερησίως [8].

Ο χρονοπρογραμματισμένος έλεγχος έντασης προσθέτει ένα δεύτερο επίπεδο: η ένταση μειώνεται σε προκαθορισμένες ώρες, για παράδειγμα μετά τα μεσάνυχτα. Η υλοποίηση απαιτεί ρολόι πραγματικού χρόνου αλλά κανέναν αισθητήρα κίνησης, και η εξοικονόμηση είναι προβλέψιμη. Το μειονέκτημα είναι ότι το πρόγραμμα δεν προσαρμόζεται: μια νύχτα με ασυνήθιστη κίνηση φωτίζεται το ίδιο με μια νεκρή νύχτα.

Ο έλεγχος με ανίχνευση παρουσίας, στον οποίο ανήκει το σύστημα της παρούσας εργασίας, αντιδρά σε πραγματικά γεγονότα. Η εξοικονόμηση εξαρτάται από την πραγματική κυκλοφορία και όχι από παραδοχές, αλλά η επίδοση κρίνεται από την αξιοπιστία των αισθητήρων. Ένα σύστημα που χάνει το ένα δέκατο των διελεύσεων αφήνει τον δρόμο σκοτεινό σε αυτές τις περιπτώσεις, κάτι πολύ χειρότερο από το να είχε παραμείνει αναμμένο.

Ο προσαρμοστικός έλεγχος με ιστορικό συνδυάζει τα δύο προηγούμενα: το σύστημα καταγράφει τα γεγονότα ανίχνευσης, χτίζει προφίλ κυκλοφορίας και προσαρμόζει το επίπεδο αναμονής ανά ώρα και ανά ημέρα της εβδομάδας. Καμία από τις εργασίες που εξέτασα δεν υλοποιεί κάτι τέτοιο, αν και οι

Abdullah κ.ά. [7] κινούνται προς αυτή την κατεύθυνση συνδέοντας την ένταση με την ταχύτητα του αντικειμένου.

Τέλος, ο κεντρικά συντονισμένος έλεγχος αντιμετωπίζει το δίκτυο ως σύνολο. Ένα όχημα που ανιχνεύεται στον ιστό πέντε προαναγγέλλει την άφιξή του στον ιστό έξι, ο οποίος μπορεί να έχει ήδη ανεβάσει την ένταση πριν φτάσει. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί επικοινωνία μεταξύ των ιστών και είναι το λογικό επόμενο βήμα μετά τη δικτύωση που προτείνεται στο Κεφάλαιο 6.

2.12 Το ζήτημα των προτύπων

Ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού που εγκαθίσταται σε πραγματικό δρόμο πρέπει να συμμορφώνεται με τα πρότυπα οδικού φωτισμού, τα οποία ορίζουν ελάχιστα επίπεδα λαμπρότητας και ομοιομορφίας ανά κατηγορία οδού. Το κρίσιμο σημείο για τα προσαρμοστικά συστήματα είναι ότι τα πρότυπα αυτά επιτρέπουν πλέον μείωση της κατηγορίας φωτισμού όταν οι συνθήκες το δικαιολογούν, για παράδειγμα όταν η κυκλοφορία πέσει κάτω από κάποιο όριο. Η δυνατότητα αυτή είναι ακριβώς αυτό που νομιμοποιεί τη λειτουργία σε μειωμένη ένταση.

Η πρακτική συνέπεια για τη σχεδίαση είναι ότι το επίπεδο αναμονής δεν μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα. Πρέπει να αντιστοιχεί σε μια επιτρεπτή χαμηλότερη κατηγορία φωτισμού για τη συγκεκριμένη οδό, και η μετάβαση προς τα πάνω πρέπει να είναι αρκετά γρήγορη ώστε ο οδηγός να μη βρεθεί ποτέ σε υποφωτισμένο τμήμα. Το σύστημα της παρούσας εργασίας ικανοποιεί τη δεύτερη απαίτηση, με χρόνο απόκρισης κάτω των 70 ms και χρόνο ανόδου 200 ms, ενώ η πρώτη είναι ζήτημα παραμετροποίησης και φωτοτεχνικής μελέτης που ξεφεύγει από το αντικείμενο της εργασίας, όπως δηλώθηκε στην ενότητα 1.6.

2.13 Φωτοτεχνικά μεγέθη και κριτήρια επάρκειας

Η συζήτηση για την εξοικονόμηση ενέργειας δεν έχει νόημα χωρίς αναφορά στο επίπεδο φωτισμού που πρέπει να διατηρηθεί. Τα βασικά μεγέθη είναι τέσσερα. Η φωτεινή ροή, μετρημένη σε lumen, είναι η συνολική ποσότητα φωτός που εκπέμπει μια πηγή. Η ένταση φωτισμού, σε candela, είναι η φωτεινή ροή ανά μονάδα στερεάς γωνίας προς μια κατεύθυνση. Ο φωτισμός επιφανείας, σε lux, είναι η φωτεινή ροή που προσπίπτει ανά τετραγωνικό μέτρο. Η λαμπρότητα, σε candela ανά τετραγωνικό μέτρο, είναι το μέγεθος που αντιλαμβάνεται τελικά το μάτι του οδηγού και το μόνο που συνδέεται άμεσα με την ορατότητα.

Η φωτεινή απόδοση μιας πηγής μετριέται σε lumen ανά watt και είναι το μέγεθος που δικαιολογεί την αντικατάσταση των παλιών λαμπτήρων. Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως δίνει περίπου 15 lm/W, ένας λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης 100 έως 150 lm/W, και ένα σύγχρονο φωτιστικό LED πάνω από 150 lm/W. Η διαφορά μεταξύ νατρίου και LED δεν είναι τεράστια σε απόδοση, και το μεγαλύτερο μέρος του κέρδους σε μια αναβάθμιση προέρχεται από τη δυνατότητα ελέγχου και από την κατευθυντικότητα της δέσμης, όχι από την ίδια την απόδοση της πηγής.

Η κατευθυντικότητα αξίζει ξεχωριστή αναφορά. Ένας λαμπτήρας εκκένωσης εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις και χρειάζεται κάτοπτρο για να στραφεί το φως προς τον δρόμο, με απώλειες στη διαδικασία. Ένα LED εκπέμπει εξ ορισμού σε ημισφαίριο και με κατάλληλο φακό η δέσμη περιορίζεται στη λωρίδα. Το πρακτικό αποτέλεσμα είναι ότι ένα φωτιστικό LED χαμηλότερης ονομαστικής ισχύος μπορεί να δώσει τον ίδιο φωτισμό στο οδόστρωμα, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το φως που χάνεται προς τον ουρανό και τα παρακείμενα κτίρια.

Το κρίσιμο ερώτημα για ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού είναι αν το μειωμένο επίπεδο αναμονής παραμένει ασφαλές. Η απάντηση εξαρτάται από την κατηγορία της οδού και από το ποιος τη χρησιμοποιεί. Ένα επίπεδο 30% της πλήρους έντασης, το οποίο υιοθετούν και οι Siddiqui κ.ά. [2], θεωρείται επαρκές για πεζούς και ποδηλάτες σε δρόμους χαμηλής ταχύτητας, αλλά όχι για αρτηρίες με υψηλές ταχύτητες όπου η απόσταση ορατότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερη. Στο σύστημα της παρούσας εργασίας το επίπεδο αναμονής είναι παραμετροποιήσιμο ακριβώς για να μπορεί να προσαρμοστεί στην κατηγορία της οδού.

Υπάρχει και το ζήτημα της προσαρμογής του ματιού. Το ανθρώπινο μάτι χρειάζεται χρόνο για να προσαρμοστεί σε αλλαγές φωτεινότητας, και η προσαρμογή από το φως στο σκοτάδι είναι πολύ πιο αργή από την αντίστροφη. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα το οποίο σβήνει απότομα τα φώτα πίσω από ένα όχημα δημιουργεί περιοχή στην οποία ο οδηγός δεν βλέπει καλά για μερικά δευτερόλεπτα. Η ομαλή απόσβεση που υλοποιήθηκε στο λογισμικό, και περιγράφεται στην ενότητα 4.5.5, αντιμετωπίζει ακριβώς αυτό.

2.14 Μετρικές ενεργειακής αποτίμησης

Για τη σύγκριση συστημάτων φωτισμού χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις μετρικές. Η πρώτη είναι η ετήσια κατανάλωση ανά φωτιστικό σημείο, σε κιλοβατώρες, η οποία είναι εύκολη στη μέτρηση αλλά αγνοεί το αν ο φωτισμός είναι επαρκής. Η δεύτερη είναι η κατανάλωση ανά χιλιόμετρο οδού, η οποία επιτρέπει σύγκριση μεταξύ εγκαταστάσεων με διαφορετική πυκνότητα ιστών. Η τρίτη, και η πιο σωστή τεχνικά, είναι η κατανάλωση ανά μονάδα παρεχόμενου φωτισμού, δηλαδή watt ανά lux και ανά τετραγωνικό μέτρο.

Οι εργασίες που εξετάστηκαν χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά την πρώτη μετρική, εκφρασμένη ως ποσοστό μείωσης σε σχέση με τη λειτουργία πλήρους έντασης [1], [2], [7]. Η επιλογή αυτή είναι κατανοητή για πρωτότυπα εργαστηρίου αλλά κρύβει ένα πρόβλημα: ένα σύστημα μπορεί να εμφανίσει εντυπωσιακή μείωση κατανάλωσης απλώς επειδή φωτίζει λιγότερο από όσο πρέπει. Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί επίσης την πρώτη μετρική, με τη διαφορά ότι δηλώνει ρητά το επίπεδο αναμονής και τον ενεργό χρόνο πάνω στα οποία υπολογίζεται το ποσοστό.

Μια τέταρτη διάσταση, η οποία σπάνια αποτιμάται, είναι η επίδραση της λειτουργίας σε μειωμένη ένταση στη διάρκεια ζωής των φωτιστικών. Ένα LED που λειτουργεί στο 30% της ονομαστικής ισχύος έχει σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία επαφής, και επειδή η υποβάθμιση της φωτεινής ροής είναι ισχυρή συνάρτηση αυτής της θερμοκρασίας, η ωφέλιμη ζωή επιμηκώνεται. Το όφελος αυτό δεν εμφανίζεται στον λογαριασμό ρεύματος αλλά στο κόστος συντήρησης, το οποίο σε μεγάλες εγκαταστάσεις είναι συγκρίσιμο με το κόστος ενέργειας.

2.15 Ανασκόπηση συναφών εργασιών

Οι δώδεκα εργασίες που ακολουθούν επιλέχθηκαν με κριτήριο ότι περιγράφουν υλοποιημένο σύστημα και όχι μόνο πρόταση. Παρουσιάζονται με τη σειρά με την οποία μελετήθηκαν, και για κάθε μία σημειώνεται τι πήρα από αυτήν.

Οι Prakash κ.ά. [1] περιγράφουν σύστημα αυτόματου ελέγχου έντασης με LDR για τον διαχωρισμό ημέρας και νύχτας και υπέρυθρο αισθητήρα για την ανίχνευση κίνησης. Η λογική δύο επιπέδων έντασης που περιγράφουν είναι η βάση πάνω στην οποία χτίστηκε ο αλγόριθμος της παρούσας εργασίας. Η εργασία τους αναφέρει επίσης τη μέγιστη εμβέλεια των 11 μέτρων για τους αισθητήρες υπερίχων.

Οι Siddiqui κ.ά. [2] είναι πιο συγκεκριμένοι στα νούμερα. Το σύστημά τους διατηρεί τους λαμπτήρες στο 30% της έντασης όταν δεν ανιχνεύεται κίνηση, ώστε να παραμένει επαρκής φωτισμός για πεζούς, και μεταβαίνει στο 100% κατά τη διέλευση οχήματος. Χρησιμοποιούν LDR και υπέρυθρους τοποθετημένους στη βάση του ιστού. Η επιλογή του 30% ως επίπεδο αναμονής στη μακέτα προέρχεται από αυτή την εργασία.

Η τεχνική αναφορά «Arduino Based Smart Street Light System» [3] περιγράφει μια στοιχειώδη υλοποίηση με Arduino και LDR. Η αξία της είναι ότι δείχνει το ελάχιστο σύνολο εξαρτημάτων με το οποίο λειτουργεί ένα τέτοιο σύστημα, και χρησίμευσε ως σημείο σύγκρισης για το πόση πολυπλοκότητα προσθέτει η ανίχνευση κίνησης.

Οι Saad κ.ά. [4] παρουσιάζουν σύστημα αυτόματου ελέγχου με μικροελεγκτή και αναλύουν τόσο το υλικό όσο και τη λογική του λογισμικού. Η συνεισφορά τους στη δική μου δουλειά ήταν κυρίως στο σκεπτικό της μετάβασης από χειροκίνητο σε αυτόματο έλεγχο και στη συζήτηση της αξιοπιστίας υπό πραγματικές συνθήκες.

Οι Mukhtar και Kumar [5] συνδυάζουν φωτοβολταϊκή τροφοδοσία με αυτόματο έλεγχο έντασης σε λαμπτήρες LED. Η εργασία τους είναι η βασική αναφορά για την ενότητα 2.8 και για τη συζήτηση της αυτόνομης λειτουργίας.

Οι Balachandran κ.ά. [6] ξεχωρίζουν επειδή αντικαθιστούν τους υπέρυθρους με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, χρησιμοποιώντας μικροελεγκτή MSP430. Το επιχείρημά τους ότι οι υπέρυθροι δυσκολεύονται με πολλαπλά ταυτόχρονα οχήματα επαληθεύτηκε στις δικές μου δοκιμές, όπου δύο αντικείμενα που περνούσαν μαζί από την ίδια ζώνη έδιναν ένα μόνο γεγονός ανίχνευσης. Από την εργασία τους προέρχονται και τα στοιχεία για το ποσοστό του φωτισμού στον ενεργειακό λογαριασμό ενός δήμου.

Οι Abdullah κ.ά. [7] προτείνουν σύστημα όπου το επίπεδο έντασης εξαρτάται από την ταχύτητα του κινούμενου αντικείμενου: όσο ταχύτερο το αντικείμενο, τόσο υψηλότερη η ένταση, με διαφορετική αντιμετώπιση για πεζούς, ποδηλάτες και αυτοκίνητα. Αναφέρουν ότι οι διατάξεις ανίχνευσης κίνησης μπορούν να εξοικονομήσουν έως 40% της ενέργειας ανά μήνα, και ότι ο οδικός φωτισμός αντιστοιχεί περίπου στο 19% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Και τα δύο νούμερα χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς στο Κεφάλαιο 5.

Οι Kuamthab και Mustafa [8] αναπτύσσουν ηλιακό σύστημα με Arduino Uno, LDR και υπέρυθρο αισθητήρα, με ελεγκτή φόρτισης. Το ενδιαφέρον στοιχείο της εργασίας τους είναι η σύγκριση μετρήσεων φωτισμού μεταξύ πρωτοτύπου και πραγματικής εγκατάστασης: σε ύψος πέντε ποδιών κατέγραψαν 0,39 lux στην πραγματική εγκατάσταση έναντι 2,63 lux στο πρωτότυπο, διαφορά περίπου 85%. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική για τη δική μου εργασία, επειδή δείχνει πόσο προσεκτικά πρέπει να μεταφέρονται μετρήσεις από μακέτα σε πραγματική κλίμακα.

Οι Kumar, Sekhar και Subramanyam [9] παρουσιάζουν σχεδίαση με αισθητήρες και φωτοβολταϊκό πλαίσιο, με έμφαση στο ενεργειακό ισοζύγιο ανάμεσα σε παραγωγή και κατανάλωση. Από εκεί προέρχονται τα στοιχεία απόδοσης για τους τρεις τύπους φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Οι Nanavati κ.ά. [10] περιγράφουν σύστημα με αυτόματη ρύθμιση έντασης, παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου, αυτόματη μεταγωγή σε δίκτυο και ειδοποίηση βλαβών μέσω SMS. Είναι η πληρέστερη σε λειτουργίες από τις εργασίες που εξέτασα, και οι περισσότερες από τις προτάσεις επέκτασης του Κεφαλαίου 6 προέρχονται από αυτήν.

Οι Rahman, Mawya και Tashfia [11] παρουσιάζουν, στο πλαίσιο εργασίας Capstone, σύστημα με ηλιακή τροφοδοσία και δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο. Είναι η πιο εκτενής τεκμηρίωση από όσες μελετήθηκαν, με ανάλυση κόστους και οφέλους που λείπει από τις υπόλοιπες.

Οι Gurav κ.ά. [12] περιγράφουν σύστημα όπου, καθώς το αντικείμενο κινείται, ανάβουν διαδοχικά τα μπροστινά φώτα και σβήνουν τα πίσω, ένα προς ένα. Η υλοποίησή τους σε επίπεδο εργαστηριακής μακέτας είναι η πλησιέστερη στη δική μου, και η λογική διαδοχικής ενεργοποίησης του Κεφαλαίου 4 ακολουθεί τη δική τους περιγραφή.

Ο Πίνακας 2.2 συνοψίζει τις δώδεκα εργασίες ως προς τον μικροελεγκτή, την τεχνολογία ανίχνευσης, την τροφοδοσία και τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης.

Πίνακας 2.2: Συγκριτική επισκόπηση των δώδεκα εργασιών που εξετάστηκαν

Αναφ.	Μικροελεγκτής	Ανίχνευση	Τροφοδοσία	Απομ. έλεγχος
[1]	Arduino	LDR + IR	Δίκτυο	Όχι
[2]	Μικροελεγκτής	LDR + IR	Δίκτυο	Όχι
[3]	Arduino	LDR	Δίκτυο	Όχι
[4]	Μικροελεγκτής	LDR + IR	Δίκτυο	Όχι
[5]	Μικροελεγκτής	LDR + αισθ. κίνησης	Φωτοβολταϊκό	Όχι
[6]	MSP430	LDR + πιεζοηλεκτρικοί	Δίκτυο	Όχι
[7]	Ελεγκτής	LDR + IR (ταχύτητα)	Μπαταρία	Ναι
[8]	Arduino Uno	LDR + IR	Φωτοβολταϊκό + ελεγκτής	Όχι
[9]	Μικροελεγκτής	Αισθ. οχήματος	Φωτοβολταϊκό	Όχι
[10]	Μικροελεγκτής	LDR + αισθ. κίνησης	Φωτοβολταϊκό + sun tracking	Ναι (SMS)
[11]	Μικροελεγκτής	LDR + IR	Φωτοβολταϊκό + δίκτυο	Μερικώς
[12]	Μικροελεγκτής	LDR + IR	Φωτοβολταϊκό	Όχι
Παρούσα	Arduino Uno	3 × υπέρηχοι, χωρίς LDR	USB 5 V (Arduino)	Όχι (προτείνεται)

2.16 Τι λείπει από τη βιβλιογραφία

Από την ανασκόπηση προκύπτουν τρεις παρατηρήσεις.

Η πρώτη είναι ότι η αρχιτεκτονική έχει σταθεροποιηθεί. Σχεδόν όλες οι εργασίες χρησιμοποιούν LDR για τον διαχωρισμό ημέρας και νύχτας και έναν αισθητήρα κίνησης για τη ρύθμιση της έντασης [1], [2], [4], [10], [12]. Οι διαφορές είναι στην επιλογή του αισθητήρα και στο αν προστίθεται φωτοβολταϊκή τροφοδοσία, όχι στη βασική λογική.

Η δεύτερη είναι ότι λίγες εργασίες συνδυάζουν και τα δύο σκέλη με πραγματικές μετρήσεις. Άλλες επικεντρώνονται στη λογική ανίχνευσης [2], [10], [12] και άλλες στην αυτόνομη τροφοδοσία [5], [8], [9], [11], αλλά η ταυτόχρονη τεκμηρίωση και των δύο με μετρήσεις ρεύματος σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας είναι σπάνια.

Η τρίτη, και κατά τη γνώμη μου η σημαντικότερη, είναι ότι τα ποσοστά εξοικονόμησης που αναφέρονται συνήθως δεν συνοδεύονται από την παραδοχή κυκλοφορίας πάνω στην οποία υπολογίστηκαν. Ένα ποσοστό 40% δεν σημαίνει τίποτα αν δεν ξέρουμε για πόσες ώρες τη νύχτα ο

δρόμος θεωρήθηκε άδειος. Στο Κεφάλαιο 5 η εξοικονόμηση παρουσιάζεται μαζί με το σενάριο κυκλοφορίας που τη δίνει, και δείχνεται πώς μεταβάλλεται όταν αλλάξει αυτό το σενάριο.

2.17 Επίλογος

Το κεφάλαιο εξέτασε γιατί τα συμβατικά δίκτυα δεν ρυθμίζονται, πώς λειτουργεί ο έλεγχος έντασης με PWM στα LED, ποιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για ανίχνευση κίνησης και φωτεινότητας, και πώς προστίθεται αυτόνομη τροφοδοσία και δικτύωση. Η ανασκόπηση δώδεκα εργασιών έδειξε μια σταθερή αρχιτεκτονική και τρία σημεία στα οποία η παρούσα εργασία προσπαθεί να προσθέσει κάτι. Το επόμενο κεφάλαιο περνάει στα εξαρτήματα και στους υπολογισμούς.

Κεφάλαιο 3ο: Υλικό και ηλεκτρική μελέτη

3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο περιγράφει τα εξαρτήματα του συστήματος και τους υπολογισμούς που έγιναν πριν από τη συνδεσμολογία. Η σειρά αυτή δεν είναι τυχαία. Ένα λάθος στην τιμή μιας αντίστασης καταστρέφει ένα LED σε κλάσματα του δευτερολέπτου, και ένα λάθος στο ρεύμα βάσης καταστρέφει την ακίδα του μικροελεγκτή. Και τα δύο συνέβησαν στις πρώτες δοκιμές, πριν οργανωθεί ο υπολογισμός με τη μορφή που παρουσιάζεται εδώ.

3.2 Κριτήρια επιλογής εξαρτημάτων

Τα κριτήρια ήταν τέσσερα, με την ακόλουθη σειρά προτεραιότητας. Πρώτο, η διαθεσιμότητα: όλα τα εξαρτήματα έπρεπε να είναι εμπορικά διαθέσιμα σε τοπικά καταστήματα ηλεκτρονικών ή σε συνηθισμένα ηλεκτρονικά καταστήματα του διαδικτύου, ώστε η κατασκευή να μπορεί να επαναληφθεί. Δεύτερο, η απλότητα, με την έννοια ότι κάθε εξάρτημα να μπορεί να αντικατασταθεί από ισοδύναμο χωρίς αλλαγή στον υπόλοιπο σχεδιασμό. Τρίτο, η τεκμηρίωση: κάθε εξάρτημα έπρεπε να έχει διαθέσιμο φύλλο δεδομένων ώστε να είναι δυνατοί οι υπολογισμοί. Τέταρτο, η συμβατότητα με λογική 5 V, ώστε να αποφευχθούν μετατροπές στάθμης.

Το τελευταίο κριτήριο απέκλεισε ορισμένες πιο σύγχρονες επιλογές, όπως πλακέτες βασισμένες σε ESP32, οι οποίες λειτουργούν στα 3,3 V και θα απαιτούσαν προσαρμογή για τους αισθητήρες των 5 V. Η επιλογή αυτή είχε κόστος: ο ESP32 θα έδινε ενσωματωμένο Wi-Fi και θα καθιστούσε τη δικτύωση του Κεφαλαίου 6 τετριμμένη. Για την παρούσα εργασία η απλότητα προτιμήθηκε έναντι της επεκτασιμότητας.

3.3 Ο μικροελεγκτής Arduino Uno

Ο έλεγχος γίνεται από Arduino Uno, πλακέτα βασισμένη στον μικροελεγκτή ATmega328P. Τα πλεονεκτήματα της πλατφόρμας για μια εργασία αυτού του τύπου είναι το χαμηλό κόστος, το ανοιχτό λογισμικό, το μεγάλο σύνολο βιβλιοθηκών και το γεγονός ότι ο προγραμματισμός και η τροφοδοσία γίνονται από την ίδια θύρα USB.

Ο ATmega328P λειτουργεί στα 16 MHz και διαθέτει 32 KB μνήμης flash, από τα οποία περίπου μισό κιλομπάιτ καταλαμβάνει ο bootloader, 2 KB μνήμης SRAM και 1 KB EEPROM. Έχει 14 ψηφιακές ακίδες εισόδου και εξόδου, από τις οποίες έξι υποστηρίζουν έξοδο PWM, και έξι αναλογικές εισόδους με μετατροπέα 10 bit. Ο ενσωματωμένος ρυθμιστής τάσης επιτρέπει τροφοδοσία από εξωτερική πηγή έως 12 V.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά του Arduino Uno που αφορούν τη σχεδίαση

Χαρακτηριστικό	Τιμή	Σημασία για τη σχεδίαση
Μικροελεγκτής	ATmega328P	8-bit, αρκετός για τη λογική ελέγχου
Τάση λειτουργίας	5 V	Άμεση συμβατότητα με τους HC-SR04
Συχνότητα ρολογιού	16 MHz	Ο βρόχος περιορίζεται από τους αισθητήρες, όχι από τη CPU
Μνήμη flash / SRAM	32 KB / 2 KB	Ο κώδικας καταλαμβάνει 13% της flash και 12% της SRAM
Ψηφιακές ακίδες	14 (6 με PWM)	9 σε χρήση, 5 ελεύθερες
Αναλογικές εισοδοί	6 (10-bit)	Καμία σε χρήση, όλες διαθέσιμες
Ρεύμα ανά ακίδα	20 mA (μέγ. 40 mA)	Επιβάλλει τρανζίστορ και αντίσταση βάσης
Συνολικό ρεύμα ακίδων	200 mA	Απαγορεύει τροφοδοσία φορτίων από την πλακέτα
Συχνότητα PWM (9, 10, 11)	490 Hz	Πάνω από το όριο αντίληψης του ματιού

Δύο από τα όρια του πίνακα καθόρισαν τη σχεδίαση. Το πρώτο είναι το ρεύμα των 20 mA ανά ακίδα, με απόλυτο μέγιστο τα 40 mA. Μια ζώνη τεσσάρων LED απαιτεί περίπου 36 mA, δηλαδή υπερβαίνει το ονομαστικό όριο και πλησιάζει επικίνδυνα το απόλυτο, οπότε η οδήγηση μέσω τρανζίστορ δεν είναι επιλογή αλλά αναγκαιότητα. Το δεύτερο είναι το συνολικό ρεύμα των 200 mA για όλες τις ακίδες μαζί, το οποίο απαγορεύει την τροφοδοσία των αισθητήρων και των λαμπτήρων από την πλακέτα.

Ο συνολικός αριθμός ακίδων που απαιτεί το σύστημα είναι εννέα: έξι για τους τρεις αισθητήρες υπερήχων, δηλαδή δύο ανά αισθητήρα, και τρεις έξοδοι PWM για τις ζώνες. Παραμένουν ελεύθερες πέντε ψηφιακές ακίδες, τρεις έξοδοι PWM, και οι έξι αναλογικές εισοδοί στο σύνολό τους. Το περιθώριο αυτό είναι σημαντικό, επειδή κάθε μία από τις προτεινόμενες επεκτάσεις του Κεφαλαίου 6, από τη φωτοαντίσταση μέχρι τη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας, χωράει χωρίς αλλαγή πλατφόρμας.

3.4 Οι αισθητήρες

3.4.1 Αισθητήρας υπερήχων HC-SR04

Το σύστημα χρησιμοποιεί τρεις μονάδες HC-SR04, μία ανά ζώνη φωτισμού. Κάθε μονάδα έχει τέσσερις ακροδέκτες: τροφοδοσία, γείωση, Trigger και Echo. Ο μικροελεγκτής στέλνει παλμό 10 μs στο Trigger, η μονάδα εκπέμπει οκτώ κύκλους στα 40 kHz, και η ακίδα Echo παραμένει σε υψηλή στάθμη για διάστημα ίσο με τον χρόνο πτήσης του ήχου. Η απόσταση προκύπτει από τη σχέση:

$$d = \frac{(v \cdot t)}{2}, \text{ με } v \approx 343 \text{ m/s στους } 20^\circ \text{C} \quad (3.1)$$

Η διαίρεση με το δύο υπάρχει επειδή ο ήχος διανύει τη διαδρομή δύο φορές. Η ονομαστική εμβέλεια της μονάδας είναι από 2 cm έως 400 cm με ανάλυση περίπου 3 mm, και η κατανάλωση κατά τη μέτρηση είναι της τάξης των 15 mA.

Ο αισθητήρας υπερήχων είναι το μοναδικό στοιχείο αντίληψης του συστήματος. Η επιλογή τριών ομοειδών μονάδων, αντί συνδυασμού διαφορετικών τεχνολογιών, έγινε για τρεις λόγους. Πρώτον, ο υπέρυθρος αισθητήρας κορέννεται σε άμεσο φως και η μακέτα προορίζεται να λειτουργεί σε φωτεινό χώρο επίδειξης. Δεύτερον, ο υπερήχων δίνει αριθμητική απόσταση αντί για δυαδική ένδειξη, οπότε το κατώφλι ανίχνευσης ρυθμίζεται από λογισμικό και όχι με ποτενσιόμετρο σε κάθε μονάδα. Τρίτον, η ομοιομορφία απλοποιεί τον κώδικα: μία συνάρτηση ανάγνωσης εξυπηρετεί και τις τρεις ζώνες.

Η επιλογή αυτή δημιουργεί ένα πρόβλημα που δεν υπήρχε με έναν μόνο αισθητήρα και περιγράφεται στην ενότητα 4.7: τρεις πομποί που εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα μέσα στον ίδιο χώρο ακούει ο ένας τον άλλον.

Στη μακέτα η χρήσιμη εμβέλεια περιορίστηκε στα 40 cm με λογισμικό, τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο πλάτος του οδοστρώματος. Οι λόγοι εξηγούνται στην ενότητα 4.7, αλλά η ουσία είναι ότι μέσα σε έναν στεγασμένο χώρο ο παλμός βρίσκει πάντα κάτι να ανακλαστεί, και οι μεγαλύτερες τιμές δεν αντιστοιχούν σε αντικείμενο μέσα στη λωρίδα.

3.5 Το κύκλωμα φωτισμού

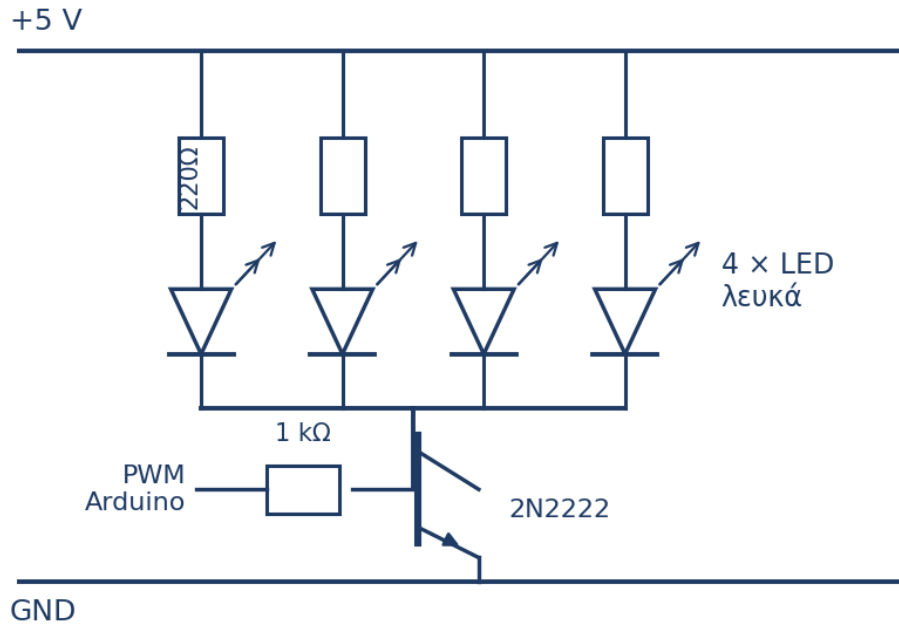
3.5.1 Λαμπτήρες LED

Χρησιμοποιήθηκαν λευκά LED των 5 mm με τάση ορθής φοράς 3,0 V έως 3,2 V και ονομαστικό ρεύμα 20 mA. Κάθε ζώνη έχει τέσσερα LED συνδεδεμένα παράλληλα, το καθένα με τη δική του αντίσταση 220 Ω σε σειρά, δηλαδή δώδεκα αντιστάσεις για δώδεκα λαμπτήρες, και το σύνολο κατανέμεται σε τρεις ζώνες κατά μήκος του δρόμου.

Η παράλληλη σύνδεση με ξεχωριστή αντίσταση ανά LED είναι σπάταλη σε εξαρτήματα αλλά απαραίτητη: αν τα τέσσερα LED μιας ζώνης μοιράζονταν μία αντίσταση, οι μικρές διαφορές στην τάση ορθής φοράς μεταξύ τους θα οδηγούσαν το ένα να τραβάει δυσανάλογα μεγάλο ρεύμα και να καίγεται πρώτο. Η ίδια λογική εξηγεί γιατί αποφεύχθηκε και η σύνδεση σε σειρά: με τροφοδοσία 5 V και τάση ορθής φοράς 3 V, δύο LED σε σειρά δεν άγουν καθόλου.

3.5.2 Οδήγηση με τρανζίστορ

Κάθε ζώνη ελέγχεται από ένα τρανζίστορ NPN τύπου 2N2222, το οποίο λειτουργεί ως διακόπτης μεταξύ κόρου και αποκοπής. Οι κάθοδοι των τεσσάρων LED ενώνονται και οδηγούνται στον συλλέκτη, ο εκπομπός συνδέεται στη γείωση, και η βάση οδηγείται από ακίδα PWM του μικροελεγκτή μέσω αντίστασης. Το Σχήμα 3.2 δείχνει τη διάταξη για μία ζώνη.



Σχήμα 3.1: Κύκλωμα οδήγησης μίας ζώνης τεσσάρων LED με τρανζίστορ 2N2222

Το 2N2222 αντέχει ρεύμα συλλέκτη έως 800 mA και έχει τυπικό συντελεστή ενίσχυσης ρεύματος πάνω από 100. Και τα δύο μεγέθη είναι με μεγάλο περιθώριο πάνω από τις απαιτήσεις των 36 mA ανά ζώνη. Η επιλογή τρανζίστορ αντί ρελέ έγινε για δύο λόγους: το ρελέ δεν μπορεί να ακολουθήσει σήμα PWM στα 490 Hz, και έχει μηχανικές επαφές που φθείρονται μετά από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες μεταγωγές, αριθμός που ένα σύστημα με ανίχνευση κίνησης φτάνει μέσα σε λίγους μήνες. Το τρανζίστορ, ως διάταξη στερεάς κατάστασης, δεν έχει αντίστοιχο όριο μεταγωγών.

3.6 Υπολογισμός αντιστάσεων

Η αντίσταση σε σειρά με κάθε LED προκύπτει από τον νόμο του Ohm εφαρμοσμένο στην τάση που απομένει αφού αφαιρεθούν οι πτώσεις των υπόλοιπων στοιχείων του βρόχου. Οι πτώσεις αυτές είναι δύο: η τάση ορθής φοράς του LED, περίπου 3,1 V για λευκό, και η τάση κορεσμού του τρανζίστορ ανάμεσα σε συλλέκτη και εκπομπό, περίπου 0,3 V. Η δεύτερη παραλείπεται συχνά και οδηγεί σε υπερεκτίμηση του ρεύματος κατά περίπου 15%.

$$I_{LED} = \frac{(V_{CC} - V_f - V_{CE(sat)})}{R} = \frac{(5 - 3,1 - 0,3)}{220} \approx 7,3 \text{ mA} \quad (3.2)$$

Η τιμή των 220 Ω επιλέχθηκε ως η τυπική εμπορική τιμή που δίνει ρεύμα κοντά στο ένα τρίτο του ονομαστικού των 20 mA. Η μακέτα δεν χρειάζεται τη μέγιστη φωτεινότητα, και η λειτουργία σε μειωμένο ρεύμα κρατά χαμηλά τη θερμοκρασία της επαφής, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τη διάρκεια ζωής.

Το κύκλωμα της βάσης χρειάζεται χωριστή συζήτηση, επειδή εδώ η αντίσταση δεν προστατεύει το φορτίο αλλά τον ίδιο τον μικροελεγκτή. Ανάμεσα σε κάθε ακίδα PWM και τη βάση του αντίστοιχου τρανζίστορ παρεμβάλλεται αντίσταση 1 kΩ.

Ο λόγος φαίνεται αν εξεταστεί τι θα συνέβαινε χωρίς αυτήν. Η επαφή βάσης-εκπομπού συμπεριφέρεται ως δίοδος: μόλις η τάση ξεπεράσει τα 0,7 V περίπου, το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά και περιορίζεται

μόνο από την εσωτερική αντίσταση της εξόδου του μικροελεγκτή, η οποία είναι της τάξης των 25 Ω. Η άμεση σύνδεση θα έδινε θεωρητικά ρεύμα βάσης:

$$I_B = \frac{(V_{OH} - V_{BE})}{R_{out}} = \frac{(5 - 0,7)}{25} \approx 170 \text{ mA} \quad (3.3)$$

Η τιμή αυτή είναι πολλαπλάσια του απόλυτου μεγίστου των 40 mA ανά ακίδα. Στην πράξη η έξοδος του μικροελεγκτή καταρρέει σε χαμηλότερη τάση και το ρεύμα δεν φτάνει εκεί, παραμένει όμως πάνω από τις προδιαγραφές. Ένα τέτοιο κύκλωμα λειτουργεί, αλλά η ακίδα καταπονείται σε κάθε παλμό, δηλαδή 490 φορές το δευτερόλεπτο, και η αστοχία εμφανίζεται μετά από ώρες συνεχούς λειτουργίας και όχι αμέσως.

Με την αντίσταση των 1 kΩ στη θέση της, το ρεύμα βάσης περιορίζεται σε:

$$I_B = \frac{(V_{OH} - V_{BE})}{R_B} = \frac{(5 - 0,7)}{1000} = 4,3 \text{ mA} \quad (3.4)$$

Το ρεύμα αυτό είναι άνετα κάτω από το όριο των 20 mA της ακίδας. Το κριτήριο για βέβαιο κορεσμό δεν είναι ο ονομαστικός συντελεστής ενίσχυσης αλλά ο λόγος του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα βάσης, ο οποίος πρέπει να παραμένει αρκετά κάτω από το είκοσι. Με τέσσερα LED των 7,3 mA το ρεύμα συλλέκτη είναι περίπου 29 mA, οπότε ο λόγος γίνεται 29 προς 4,3, δηλαδή περίπου επτά. Το τρανζίστορ οδηγείται επομένως βαθιά σε κόρο, με μεγάλο περιθώριο ακόμη και αν το συγκεκριμένο δείγμα βρίσκεται στο κάτω άκρο των προδιαγραφών.

Η ίδια αντίσταση εξυπηρετεί και έναν δεύτερο σκοπό. Επειδή το τρανζίστορ οδηγείται σε κόρο και όχι στη γραμμική περιοχή, η ακριβής τιμή του ρεύματος βάσης δεν επηρεάζει τη φωτεινότητα: αρκεί να είναι πάνω από το ελάχιστο. Αυτό σημαίνει ότι η διασπορά μεταξύ των τριών τρανζίστορ δεν μεταφράζεται σε διαφορά φωτεινότητας μεταξύ των ζωνών, κάτι που θα συνέβαινε αν λειτουργούσαν ως ενισχυτές.

3.7 Τροφοδοσία από τον μικροελεγκτή

Το σύστημα έχει μία και μόνο πηγή τάσης: τη θύρα USB του Arduino. Ο μικροελεγκτής, οι τρεις αισθητήρες και οι δώδεκα λαμπτήρες τροφοδοτούνται όλοι από τα 5 V της πλακέτας, και δεν υπάρχει καμία εξωτερική μονάδα τροφοδοσίας.

Η επιλογή δοκιμάστηκε πριν υιοθετηθεί, επειδή η πρώτη αντίδραση σε μια τέτοια διάταξη είναι ότι το Arduino δεν αντέχει το φορτίο. Η ανησυχία αυτή προέρχεται από σύγχυση δύο διαφορετικών ορίων, τα οποία αξίζει να διαχωριστούν.

Το πρώτο όριο είναι τα 200 mA για το άθροισμα των ακίδων εισόδου και εξόδου. Αφορά το ρεύμα που περνά μέσα από το ολοκληρωμένο ATmega328P, δηλαδή μέσα από τα τρανζίστορ εξόδου του κάθε ακίδας. Στο σύστημα το ρεύμα αυτό είναι μόνο τα τρία ρεύματα βάσης των τρανζίστορ, δηλαδή περίπου 13 mA συνολικά. Το ρεύμα των λαμπτήρων δεν περνά ποτέ από ακίδα: μπαίνει από την ακίδα 5V, διασχίζει τα LED και τα τρανζίστορ, και καταλήγει στη γείωση. Η ακίδα ελέγχου το κατευθύνει χωρίς να το μεταφέρει, και αυτός ακριβώς είναι ο λόγος ύπαρξης του τρανζίστορ.

Το δεύτερο όριο είναι η ικανότητα της ίδιας της ακίδας 5V. Όταν η πλακέτα τροφοδοτείται από USB, η τάση αυτή έρχεται απευθείας από τη θύρα μέσω μιας επαναφερόμενης ασφάλειας των 500 mA, χωρίς να περνά από τον ρυθμιστή τάσης της πλακέτας. Το διαθέσιμο ρεύμα είναι επομένως ό,τι δίνει η θύρα, μείον την κατανάλωση της ίδιας της πλακέτας.

Ο Πίνακας 3.3 δίνει την ανάλυση των διαδρομών και των ορίων.

Πίνακας 3.2: Διαδρομές ρεύματος και όρια τροφοδοσίας

Στοιχείο	Διαδρομή	Ρεύμα	Παρατήρηση
ATmega328P και πλακέτα	Εσωτερικά από τα 5 V	14 mA	Σταθερό σε κάθε κατάσταση
3 × HC-SR04	Ακίδα 5V → αισθητήρες	45 mA	Δεν περνά από ακίδες I/O
12 LED, λευκά, πλήρης ένταση	Ακίδα 5V → LED → τρανζίστορ → GND	88 mA	Το ρεύμα περνά από τον συλλέκτη, όχι από την ακίδα ελέγχου
3 ρεύματα βάσης	Ακίδες 9, 10, 11	13 mA	Το μόνο φορτίο που επιβαρύνει τις ακίδες I/O
Σύνολο από τη θύρα USB	—	≈ 160 mA	Δυσμενέστερη κατάσταση, τρεις ζώνες στο 100%
Όριο πολυσφάλειας USB	—	500 mA	Περιθώριο άνω του τριπλάσιου
Όριο αθροίσματος ακίδων I/O	—	200 mA	Σε χρήση μόλις 13 mA

Το συμπέρασμα είναι ότι η δυσμενέστερη κατάσταση, με τις τρεις ζώνες σε πλήρη ένταση, απαιτεί περίπου 160 mA, δηλαδή κάτω από το ένα τρίτο της ικανότητας της θύρας και κάτω από το ένα δέκατο του κρίσιμου ορίου των ακίδων. Η μονή πηγή τροφοδοσίας είναι επομένως επαρκής με μεγάλο περιθώριο.

Πέρα από την επάρκεια, η λύση αυτή έχει και ένα πλεονέκτημα που δεν είναι προφανές. Με μία μόνο πηγή, το πρόβλημα της κοινής γείωσης εξαφανίζεται εξ ορισμού: όλα τα κυκλώματα μοιράζονται αναγκαστικά την ίδια αναφορά, οπότε δεν υπάρχει περιθώριο για την κατηγορία σφαλμάτων που περιγράφεται στην ενότητα 4.7. Το ίδιο ισχύει και για τον θόρυβο: οι αισθητήρες υπερήχων μετρούν χρόνο πτήσης και είναι ευαίσθητοι σε διακυμάνσεις της τροφοδοσίας τους, οπότε το να μοιράζονται την ίδια καθαρή τάση με τον μικροελεγκτή που τους διαβάζει βελτιώνει την ποιότητα των μετρήσεων.

Ο περιορισμός της επιλογής είναι η επεκτασιμότητα. Με έξι ζώνες αντί για τρεις, το ρεύμα των λαμπτήρων θα διπλασιαζόταν και το περιθώριο θα στένευε αισθητά. Σε μια τέτοια επέκταση, ή σε μετάβαση σε λαμπτήρες πραγματικής ισχύος, η ξεχωριστή τροφοδοσία του φορτίου γίνεται αναγκαία, με τον κανόνα ότι οι γειώσεις των δύο πηγών ενώνονται πάντα μεταξύ τους και τα θετικά ποτέ.

3.8 Τροφοδοσία και ισοζύγιο ρευμάτων

Με μοναδική πηγή τη θύρα USB, το ισοζύγιο ρευμάτων ανάγεται στο άθροισμα των φορτίων. Η γείωση όλων των breadboards ενώνεται με την ακίδα GND του Arduino, ώστε τα σήματα Echo και οι εκπομποί των τρανζίστορ να έχουν κοινή αναφορά με τον μικροελεγκτή.

Ο Πίνακας 3.2 δείχνει την αντιστοίχιση των ακίδων του μικροελεγκτή με τα εξαρτήματα, όπως ορίζεται στις σταθερές του κώδικα του Παραρτήματος Α.

Πίνακας 3.3: Αντιστοίχιση ακίδων του Arduino Uno με τα εξαρτήματα

Ακίδα	Τύπος	Εξάρτημα	Λειτουργία
D2	Ψηφιακή έξοδος	HC-SR04 ζώνης 1 (Trig)	Εκπομπή παλμού
D3	Ψηφιακή είσοδος	HC-SR04 ζώνης 1 (Echo)	Λήψη ηχούς
D4	Ψηφιακή έξοδος	HC-SR04 ζώνης 2 (Trig)	Εκπομπή παλμού
D5	Ψηφιακή είσοδος	HC-SR04 ζώνης 2 (Echo)	Λήψη ηχούς
D6	Ψηφιακή έξοδος	HC-SR04 ζώνης 3 (Trig)	Εκπομπή παλμού
D7	Ψηφιακή είσοδος	HC-SR04 ζώνης 3 (Echo)	Λήψη ηχούς

D9	Έξοδος PWM	Τρανζίστορ ζώνης 1	Έλεγχος έντασης 4 λαμπτήρων
D10	Έξοδος PWM	Τρανζίστορ ζώνης 2	Έλεγχος έντασης 4 λαμπτήρων
D11	Έξοδος PWM	Τρανζίστορ ζώνης 3	Έλεγχος έντασης 4 λαμπτήρων

Ο Πίνακας 3.3 παρουσιάζει το ισοζύγιο ρευμάτων για τις τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος.

Πίνακας 3.4: Υπολογιστικό ισοζύγιο ρευμάτων ανά κατάσταση λειτουργίας

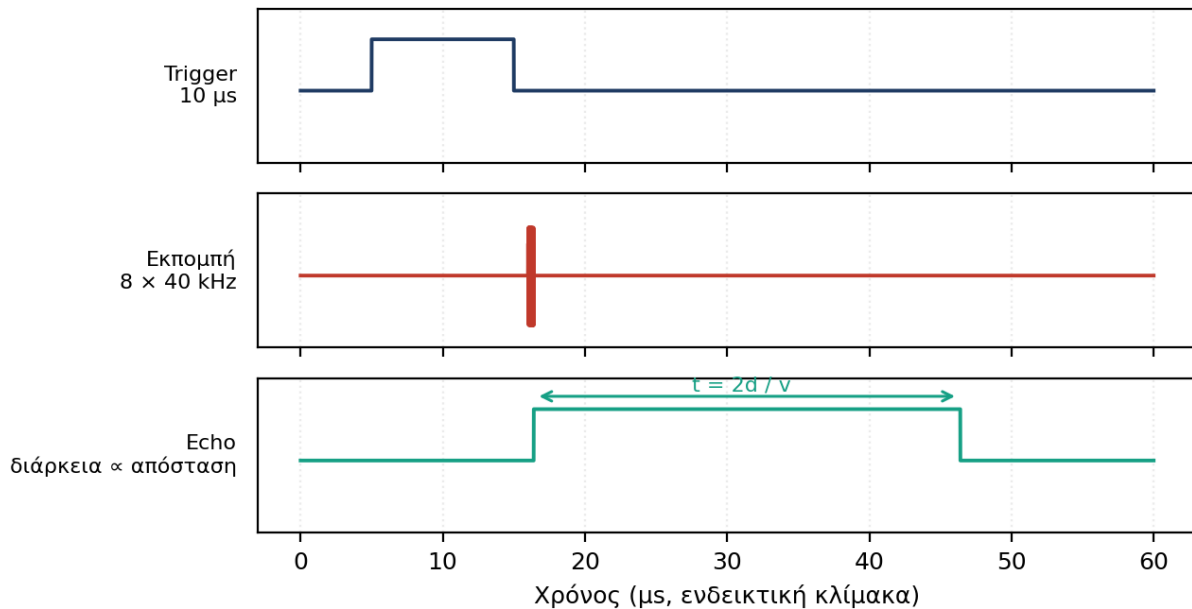
Κατάσταση	Μικροελ. (mA)	Αισθητήρες (mA)	Ζώνες LED (mA)	Σύνολο (mA)	Ισχύς (W)
Αναμονή, 3 ζώνες στο 10%	14	45	8,9	67,9	0,34
1 ζώνη στο 100%	14	45	35,2	94,2	0,47
2 ζώνες στο 100%	14	45	61,4	120,4	0,60
3 ζώνες στο 100%	14	45	87,6	146,6	0,73

Το πιο ενδιαφέρον στοιχείο του πίνακα είναι ότι στην κατάσταση αναμονής, όπου οι λαμπτήρες λειτουργούν στο 30%, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος δεν καταναλώνεται από τους λαμπτήρες αλλά από τους αισθητήρες και τον μικροελεγκτή. Αυτό αντιστρέφει τη διαίσθηση με την οποία ξεκίνησα τη σχεδίαση, και σε πραγματική εγκατάσταση με λαμπτήρες δεκάδων watt η αναλογία θα ήταν εντελώς διαφορετική. Η παρατήρηση σχολιάζεται ξανά στην ενότητα 5.7, επειδή επηρεάζει το πόσο ασφαλής είναι η μεταφορά των αποτελεσμάτων της μακέτας σε πραγματική κλίμακα.

3.9 Χρονισμός και φύλλο δεδομένων του HC-SR04

Επειδή ο αισθητήρας υπερήχων είναι το μοναδικό στοιχείο αντίληψης του συστήματος και επειδή η ακρίβεια της μέτρησης καθορίζει άμεσα τη συμπεριφορά του φωτισμού, αξίζει να καταγραφεί αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του σε επίπεδο χρονισμού.

Η μονάδα δεν επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω κάποιου πρωτοκόλλου. Η ανταλλαγή πληροφορίας γίνεται αποκλειστικά με τη διάρκεια δύο παλμών, όπως δείχνει το Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.2: Χρονισμός του αισθητήρα HC-SR04: παλμός Trigger, ριπή υπερήχων και παλμός Echo

Ο κύκλος ξεκινά από τον μικροελεγκτή, ο οποίος θέτει την ακίδα Trigger σε υψηλή στάθμη για τουλάχιστον 10 μ s. Η μονάδα ανιχνεύει την ακμή, εκπέμπει οκτώ διαδοχικούς κύκλους στα 40 kHz από τον πομπό της, και αμέσως μετά θέτει την ακίδα Echo σε υψηλή στάθμη. Η ακίδα αυτή παραμένει υψηλή μέχρι να ληφθεί η ηχώ από τον δέκτη, ή μέχρι να παρέλθει το εσωτερικό χρονικό όριο της μονάδας αν δεν επιστρέψει τίποτα.

Η διάρκεια του παλμού Echo είναι επομένως ο χρόνος πτήσης του ήχου προς το αντικείμενο και πίσω. Ο μικροελεγκτής τον μετράει με τη συνάρτηση pulseIn, η οποία μπλοκάρει την εκτέλεση μέχρι να ολοκληρωθεί ο παλμός ή μέχρι να λήξει το χρονικό όριο που της δίνεται ως όρισμα.

Η μετατροπή σε απόσταση χρησιμοποιεί τον συντελεστή 0,0343 εκατοστά ανά μικροδευτερόλεπτο, ο οποίος αντιστοιχεί σε ταχύτητα ήχου 343 μέτρων ανά δευτερόλεπτο, και διαίρεση με το δύο επειδή ο ήχος διανύει τη διαδρομή δύο φορές. Για παράδειγμα, παλμός Echo διάρκειας 350 μ s αντιστοιχεί σε απόσταση περίπου 6 εκατοστών.

Τρία στοιχεία του φύλλου δεδομένων επηρέασαν άμεσα τη σχεδίαση. Το πρώτο είναι η ελάχιστη αξιόπιστη απόσταση, η οποία δίνεται ως 2 εκατοστά. Κάτω από αυτήν, η ηχώ επιστρέφει πριν ο δέκτης προλάβει να ηρεμήσει από την εκπομπή, και η μέτρηση είναι άκυρη. Το κάτω όριο των 4 εκατοστών που χρησιμοποιεί ο κώδικας βρίσκεται σκόπιμα πάνω από αυτήν την τιμή.

Το δεύτερο είναι η γωνία δέσμης, τυπικά περίπου 15 μοιρών. Η μονάδα δεν βλέπει μια λεπτή ακτίνα αλλά έναν κώνο, οπότε ένα αντικείμενο εκτός της λωρίδας αλλά μέσα στον κώνο μπορεί να ανιχνευθεί. Στη μακέτα η γωνία αυτή είναι στην πράξη ευεργετική, επειδή αυξάνει την πιθανότητα να πιαστεί το όχημα ανεξάρτητα από την ακριβή θέση του στο πλάτος του δρόμου.

Το τρίτο είναι ο συνιστώμενος ελάχιστος χρόνος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές μετρήσεις, ο οποίος δίνεται ως 60 ms. Η τιμή αυτή δεν είναι αυθαίρετη: αντιστοιχεί στον χρόνο που χρειάζεται ώστε οι ανακλάσεις της προηγούμενης εκπομπής να έχουν αποσβεστεί αρκετά ώστε να μην εκληφθούν ως ηχώ της επόμενης. Η καθυστέρηση των 60 ms που χρησιμοποιεί ο κώδικας ανάμεσα στους τρεις αισθητήρες προέρχεται ακριβώς από αυτή τη σύσταση, και αντιμετωπίζει ταυτόχρονα και τη διαφωνία μεταξύ διαφορετικών μονάδων.

Ένας τέταρτος παράγοντας δεν αναφέρεται στο φύλλο δεδομένων αλλά προκύπτει από τη φυσική: η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται από τη θερμοκρασία κατά περίπου 0,17% ανά βαθμό Κελσίου. Μια μέτρηση βαθμονομημένη στους 20 βαθμούς εμφανίζει σφάλμα περίπου 3% στους 0 βαθμούς και αντίστοιχο σφάλμα αντίθετου προσήμου στους 40. Για τη μακέτα, όπου το παράθυρο ανίχνευσης έχει εύρος έξι εκατοστών, το σφάλμα αυτό είναι αμελητέο. Σε εξωτερική εγκατάσταση με μεγαλύτερες αποστάσεις θα απαιτούσε αντιστάθμιση με αισθητήρα θερμοκρασίας.

3.10 Εναλλακτικές επιλογές που εξετάστηκαν

Πριν οριστικοποιηθεί η σύνθεση του υλικού εξετάστηκαν εναλλακτικές για τρία από τα εξαρτήματα.

Για τον μικροελεγκτή, οι υποψήφιοι ήταν το Arduino Nano, το ESP32 και το Raspberry Pi Pico. Το Nano είναι ηλεκτρικά ταυτόσημο με το Uno σε μικρότερο περίβλημα, αλλά η έλλειψη υποδοχών καθιστά τη συνδεσμολογία σε breadboard πιο επιρρεπή σε λάθη κατά τη φάση των δοκιμών. Το ESP32 προσφέρει Wi-Fi, Bluetooth και δεκαέξι κανάλια PWM με ρυθμιζόμενη ανάλυση, αλλά λειτουργεί στα 3,3 V, οπότε η έξοδος Echo των αισθητήρων των 5 V θα απαιτούσε διαιρέτες τάσης. Το Raspberry Pi Pico έχει παρόμοιο ζήτημα στάθμης. Η επιλογή του Uno έγινε για την ηλεκτρική ομοιογένεια στα 5 V.

Για τον διακόπτη ισχύος, εναλλακτική ήταν το MOSFET λογικού επιπέδου τύπου IRLZ44N. Το MOSFET έχει πολύ χαμηλότερη αντίσταση αγωγής, άρα μικρότερες απώλειες, και δεν απαιτεί ρεύμα οδήγησης παρά μόνο φορτίο πύλης. Για ρεύματα της τάξης των 36 mA η διαφορά είναι αμελητέα, και το 2N2222 προτιμήθηκε λόγω διαθεσιμότητας. Σε κλιμάκωση προς πραγματικά φωτιστικά η σχέση αντιστρέφεται και το MOSFET γίνεται η μόνη λογική επιλογή, κάτι που σημειώνεται και στις προτάσεις του Κεφαλαίου 6.

Για την ανίχνευση κίνησης, εξετάστηκαν οι υπέρυθροι αισθητήρες εμποδίου και ο αισθητήρας παθητικών υπέρυθρων τύπου HC-SR501. Οι πρώτοι απορρίφθηκαν για τους λόγους της ενότητας 3.4.1. Ο δεύτερος απορρίφθηκε επειδή ανιχνεύει θερμά σώματα, οπότε ένα μοντέλο αυτοκινήτου δεν δίνει κανένα σήμα, και επειδή έχει χρόνο σταθεροποίησης μερικών δευτερολέπτων μετά από κάθε ενεργοποίηση, ο οποίος τον καθιστά ακατάλληλο για διαδοχικές γρήγορες διελεύσεις.

Εξετάστηκε επίσης η προσθήκη φωτοαντίστασης για τον διαχωρισμό ημέρας και νύχτας, λειτουργία που έχουν σχεδόν όλα τα συστήματα της βιβλιογραφίας. Δεν συμπεριλήφθηκε στην τελική υλοποίηση, με αποτέλεσμα το σύστημα να λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο μέρα και νύχτα. Οι ενεργειακές συνέπειες της απουσίας της αποτιμώνται ποσοτικά στην ενότητα 5.5 και η προσθήκη της αποτελεί την πρώτη πρόταση του Κεφαλαίου 6.

3.11 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και διαδρομές καλωδίων

Η μακέτα λειτουργεί σε χαμηλή τάση και δεν παρουσιάζει κίνδυνο για τον χρήστη. Υπάρχει όμως ένα ζήτημα που επηρεάζει τη λειτουργία και προέκυψε κατά τις δοκιμές.

Στην πρώτη διάταξη τα καλώδια των αισθητήρων ήταν δεμένα σε δέσμη μαζί με τα καλώδια τροφοδοσίας των ζωνών. Η μεταγωγή PWM στα 490 Hz με απότομα μέτωπα παράγει αρμονικές σε αρκετά υψηλότερες συχνότητες, οι οποίες συζεύγνυνται χωρητικά στα γειτονικά καλώδια. Το σύμπτωμα ήταν σποραδικές ψευδείς ανιχνεύσεις που συνέβαιναν μόνο τη στιγμή που κάποια ζώνη άλλαζε επίπεδο, δηλαδή ακριβώς όταν το κύκλωμα ήταν πιο θορυβώδες.

Η λύση ήταν ο διαχωρισμός των διαδρομών, με τα καλώδια σήματος να ακολουθούν διαφορετική πλευρά της βάσης από τα καλώδια ισχύος και με όσο το δυνατόν μικρότερο μήκος παράλληλης

διαδρομής. Η κατανομή του κυκλώματος σε τρία διαμερίσματα, το οποίο επιβλήθηκε από τη γεωμετρία της μακέτας, βοήθησε εδώ: κάθε ζώνη έχει τα δικά της καλώδια ισχύος μέσα στο δικό της διαμέρισμα, και μόνο τα σήματα προς τον μικροελεγκτή διασχίζουν τα χωρίσματα.

3.12 Αξιοπιστία και θερμική συμπεριφορά

Η λειτουργία σε μειωμένη ένταση για το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου έχει μια παρενέργεια που δεν αφορά την ενέργεια: μειώνει τη μέση θερμοκρασία της επαφής των LED. Η διάρκεια ζωής ενός LED καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από αυτή τη θερμοκρασία, οπότε ένα σύστημα που λειτουργεί στο 30% για οκτώ από τις δώδεκα ώρες θα έχει αισθητά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ένα που λειτουργεί συνεχώς στο 100%.

Στο κύκλωμα οδήγησης, η ισχύς που καταναλώνει το τρανζίστορ σε κόρο είναι το γινόμενο του ρεύματος συλλέκτη επί την τάση κορεσμού, δηλαδή περίπου $0,036 \text{ A} \times 0,3 \text{ V} = 11 \text{ mW}$. Πρόκειται για αμελητέο ποσό που δεν απαιτεί ψύκτρα. Οι αντιστάσεις των 220Ω καταναλώνουν $2 \text{ V} \times 9,1 \text{ mA} = 18 \text{ mW}$ η καθεμία, επίσης πολύ κάτω από την ονομαστική ισχύ των 250 mW των αντιστάσεων άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν.

Ένα ζήτημα που εξετάστηκε ήταν ο κίνδυνος ανεπιθύμητων επανεκκινήσεων του μικροελεγκτή λόγω απότομης αύξησης του ρεύματος όταν οι τρεις ζώνες μεταβαίνουν ταυτόχρονα στην πλήρη ένταση. Η μετάβαση αυτή προσθέτει περίπου 79 mA μέσα σε ένα πέρασμα του βρόχου. Το μέγεθος είναι μικρό σε σχέση με την ικανότητα της θύρας USB, και η αιχμή απορροφάται από τους πυκνωτές αποσύζευξης της ίδιας της πλακέτας, οπότε το φαινόμενο δεν παρατηρήθηκε. Θα γινόταν όμως πραγματικό ζήτημα σε επέκταση με περισσότερες ζώνες ή με λαμπτήρες μεγαλύτερης ισχύος, και τότε η ενδεδειγμένη λύση είναι ξεχωριστή τροφοδοσία για το φορτίο, με τις γειώσεις ενωμένες.

3.13 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα εξαρτήματα του συστήματος, οι υπολογισμοί των αντιστάσεων και του ρεύματος βάσης, το ισοζύγιο ρευμάτων ανά κατάσταση λειτουργίας, το κόστος και η θερμική συμπεριφορά. Το βασικό εύρημα, ότι στη συγκεκριμένη κλίμακα το κύκλωμα ελέγχου καταναλώνει περισσότερο από τους ίδιους τους λαμπτήρες, προέκυψε από τους υπολογισμούς και όχι από τη βιβλιογραφία. Το επόμενο κεφάλαιο περιγράφει την κατασκευή.

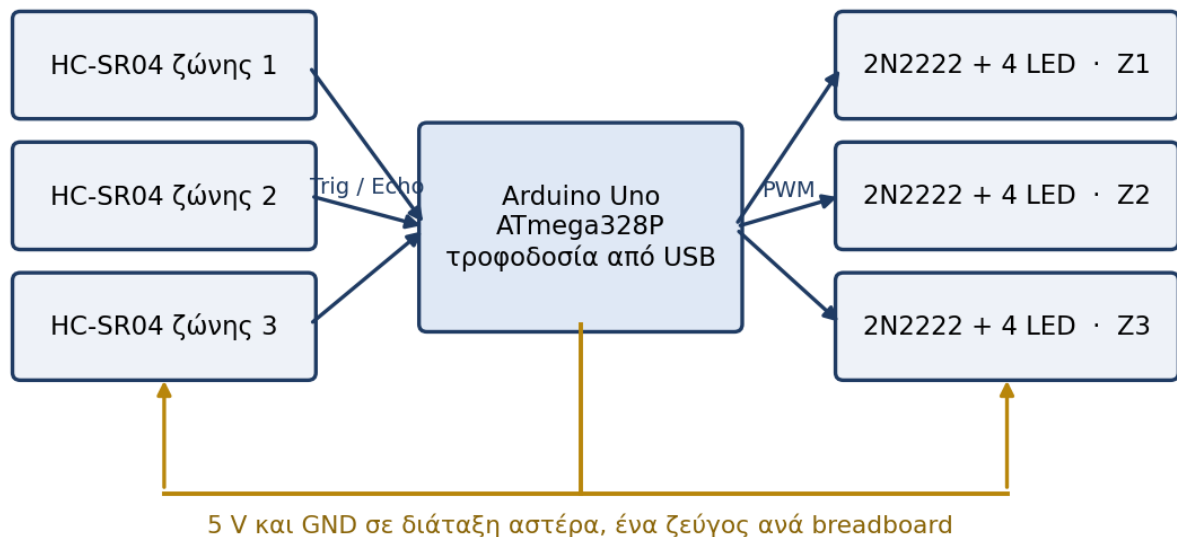
Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση και υλοποίηση της μακέτας

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο περιγράφει την κατασκευή: την αρχιτεκτονική του συστήματος, τη γεωμετρία της μακέτας, τη συνδεσμολογία, τη δομή του λογισμικού και τα προβλήματα που εμφανίστηκαν όταν συνδέθηκαν όλα μαζί. Η τελευταία ενότητα είναι ίσως η πιο χρήσιμη για όποιον επιχειρήσει κάτι παρόμοιο, επειδή τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα δεν αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

4.2 Αρχιτεκτονική του συστήματος

Η αρχιτεκτονική χωρίζεται σε τρία υποσυστήματα. Το υποσύστημα εισόδων περιλαμβάνει αποκλειστικά τους τρεις αισθητήρες υπερήχων, έναν ανά ζώνη. Το υποσύστημα ελέγχου είναι ο μικροελεγκτής, ο οποίος εκτελεί τον αλγόριθμο απόφασης. Το υποσύστημα εξόδων και ισχύος αποτελείται από τα τρία τρανζίστορ και τις τρεις ζώνες των τεσσάρων λαμπτήρων. Δεν υπάρχει ξεχωριστή μονάδα τροφοδοσίας: ρεύμα και για τα τρία υποσυστήματα δίνει η θύρα USB μέσω της ίδιας της πλακέτας του μικροελεγκτή. Το Σχήμα 4.1 δείχνει τη διάταξη.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος SmartStreet

Η δομή είναι σκόπιμα επαναλαμβανόμενη. Κάθε ζώνη είναι ένα αυτοτελές σύνολο από έναν αισθητήρα, ένα τρανζίστορ και τέσσερις λαμπτήρες, πάνω στο δικό της breadboard, και συνδέεται με τον μικροελεγκτή μόνο μέσω τριών καλωδίων σήματος. Η επιλογή αυτή έχει δύο συνέπειες: η προσθήκη τέταρτης ζώνης απαιτεί μόνο ένα ακόμη breadboard και τρεις ελεύθερες ακίδες, και η αποσφαλμάτωση απομονώνεται σε ένα διαμέρισμα κάθε φορά.

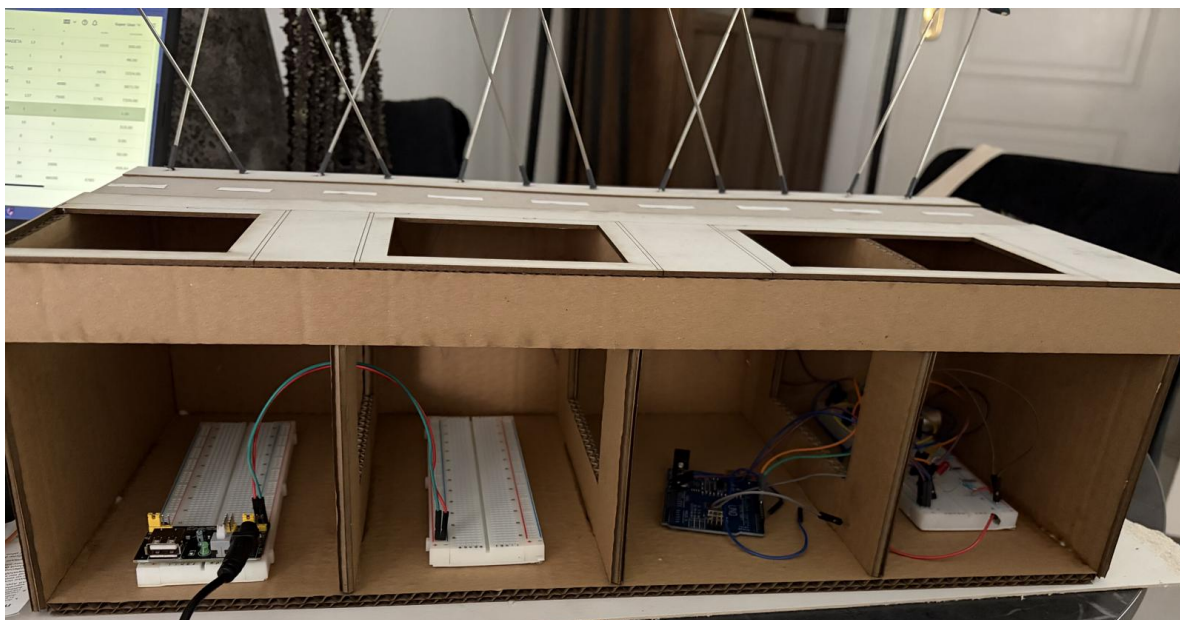
Η ροή της πληροφορίας είναι μονόδρομη από τους αισθητήρες προς τους λαμπτήρες, χωρίς καμία ανάδραση. Το σύστημα δεν γνωρίζει ούτε πόσο φως παράγει ούτε πόσο φως υπάρχει ήδη στο

περιβάλλον. Η δεύτερη αυτή έλλειψη είναι σκόπιμη επιλογή απλότητας και όχι παράλειψη, έχει όμως ενεργειακό κόστος που ποσοτικοποιείται στο Κεφάλαιο 5.

4.3 Η φυσική μακέτα

4.3.1 Γεωμετρία και υλικά

Η μακέτα κατασκευάστηκε από κυματοειδές χαρτόνι και λεπτή χαρτονένια επιφάνεια, σε ορθογώνιο σχήμα που αναπαριστά ευθύγραμμο τμήμα οδικής αρτηρίας. Το σχήμα αυτό προτιμήθηκε έναντι μιας κλειστής, οβάλ διαδρομής που εξεταζόταν αρχικά, επειδή αντιστοιχεί καλύτερα στην πραγματική περίπτωση χρήσης: ένας δρόμος με διαδοχικές ζώνες φωτισμού τις οποίες το όχημα διασχίζει με τη σειρά. Το Σχήμα 4.2 δείχνει την ολοκληρωμένη κατασκευή.



Σχήμα 4.2: Το κέλυφος της μακέτας, με το οδόστρωμα, τους ιστούς φωτισμού και τα διαμερίσματα των ηλεκτρονικών

Η κατασκευή έχει δύο επίπεδα. Το κάτω είναι ένα κιβώτιο χωρισμένο εσωτερικά με κατακόρυφα χαρτονένια χωρίσματα σε διαμερίσματα, καθένα από τα οποία φιλοξενεί μία λειτουργική μονάδα. Το άνω επίπεδο είναι το ίδιο το οδόστρωμα, βαμμένο σε ανοιχτό χρώμα, με διακεκομμένη διαχωριστική γραμμή ζωγραφισμένη κατά μήκος του άξονα.

Στο οδόστρωμα έχουν ανοιχτεί τρία ορθογώνια παράθυρα, ένα πάνω από κάθε διαμέρισμα ηλεκτρονικών. Ο ρόλος τους είναι διπλός. Επιτρέπουν πρόσβαση στα κυκλώματα χωρίς αποσυναρμολόγηση της μακέτας, κάτι που αποδείχθηκε απαραίτητο κατά τη βαθμονόμηση, και επιτρέπουν στον θεατή να δει την υλοποίηση κατά την επίδειξη. Η δεύτερη λειτουργία δεν ήταν στον αρχικό σχεδιασμό αλλά αποδείχθηκε από τις πιο χρήσιμες ιδιότητες της κατασκευής.

4.3.2 Οι ιστοί φωτισμού

Στην τελική κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν έτοιμοι ιστοί μοντελισμού, από αυτούς που διατίθενται για μακέτες σιδηροδρομικού μοντελισμού. Καθένας έχει μεταλλικό στέλεχος, καμπύλο βραχίονα και μικρό περίβλημα φωτιστικού στην άκρη, μέσα στο οποίο βρίσκεται το LED, με τα καλώδια να διατρέχουν το εσωτερικό του στελέχους και να βγαίνουν από τη βάση.

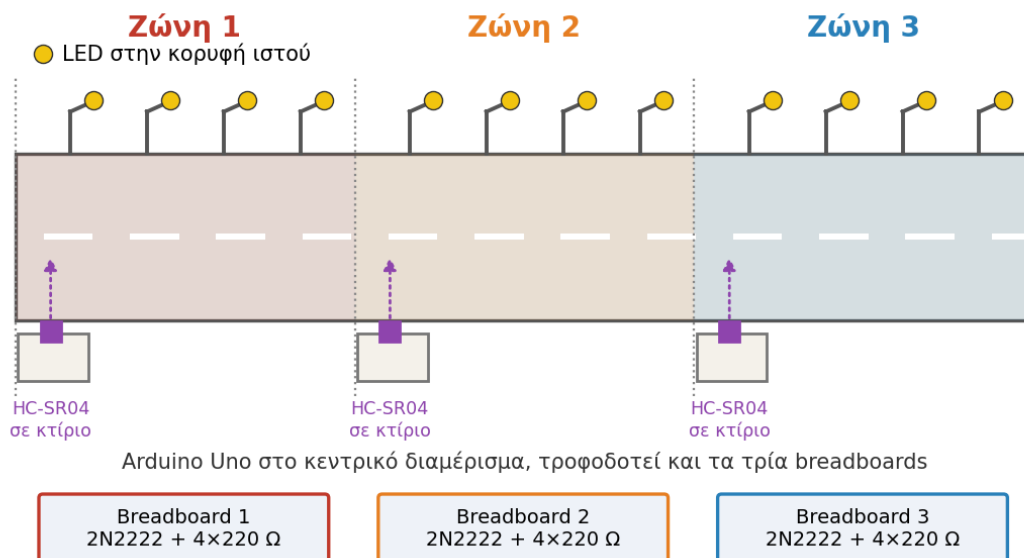
Η επιλογή έγινε μετά από δοκιμή αυτοσχέδιων ιστών από λυγισμένο μεταλλικό σύρμα, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στη φάση των δοκιμών και φαίνονται σε φωτογραφία της ενότητας 4.3. Οι έτοιμοι ιστοί υπερτερούν σε δύο σημεία: το φωτιστικό περίβλημα κατευθύνει τη δέσμη προς το οδόστρωμα αντί να την αφήνει να διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις, και το ύψος με τη γωνία του βραχίονα είναι σε σωστή αναλογία προς την κλίμακα του δρόμου. Το αποτέλεσμα αναπαράγει τη γεωμετρία μιας πραγματικής εγκατάστασης, όπου το φως πέφτει από ύψος και υπό γωνία και σχηματίζει διακριτούς κύκλους φωτισμού στο οδόστρωμα.

Οι δώδεκα ιστοί τοποθετήθηκαν σε μία σειρά κατά μήκος της μίας πλευράς του δρόμου, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, και ομαδοποιήθηκαν σε τρεις ζώνες των τεσσάρων. Η μονόπλευρη διάταξη είναι η συνηθέστερη σε πραγματικούς δρόμους δύο λωρίδων, όπου το πλάτος του οδοστρώματος δεν δικαιολογεί διπλή σειρά ιστών. Τα καλώδια κάθε ιστού περνούν από οπή στη βάση του και καταλήγουν στο breadboard της ζώνης του.

4.3.3 Χωροθέτηση του εξοπλισμού

Ο εσωτερικός χώρος χωρίζεται σε διαμερίσματα με τον ακόλουθο τρόπο. Το πρώτο διαμέρισμα, στο ένα άκρο, φιλοξενεί το breadboard της πρώτης ζώνης. Το δεύτερο φιλοξενεί το breadboard της δεύτερης ζώνης. Ένα ενδιάμεσο διαμέρισμα παραμένει κενό και λειτουργεί ως δίοδος για τη δρομολόγηση των καλωδίων. Το επόμενο φιλοξενεί τον μικροελεγκτή, τοποθετημένο κεντρικά ώστε τα καλώδια σήματος προς τις τρεις ζώνες να έχουν παρόμοιο μήκος. Το τελευταίο φιλοξενεί το breadboard της τρίτης ζώνης.

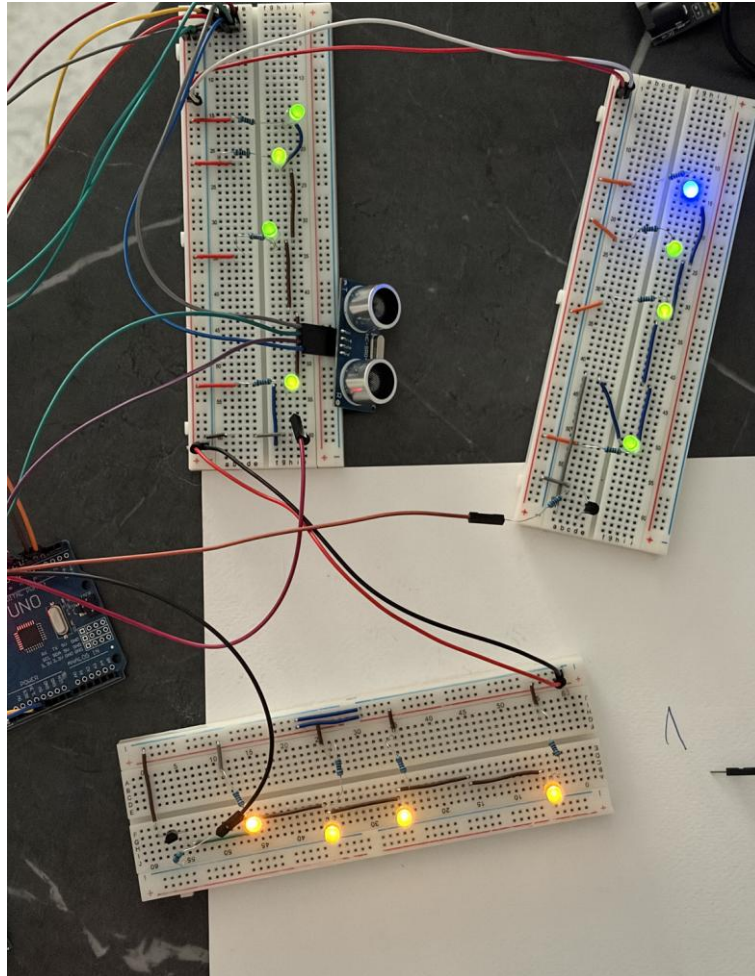
Η κατανομή σε τρία ξεχωριστά breadboards, αντί για ένα μεγάλο, δεν ήταν αισθητική επιλογή αλλά προέκυψε από τη γεωμετρία: κάθε ζώνη λαμπτήρων βρίσκεται πάνω από το δικό της τμήμα του δρόμου, οπότε το κύκλωμά της τοποθετήθηκε ακριβώς από κάτω. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα καλώδια των λαμπτήρων παραμένουν κοντά, και μόνο τα σήματα ελέγχου διασχίζουν τη μακέτα.



Σχήμα 4.3: Κάτοψη της μακέτας με τη διάταξη των τριών ζωνών, των αισθητήρων και των διαμερισμάτων. Η φωτογραφία δείχνει το κέλυφος της μακέτας σε ενδιάμεσο στάδιο, πριν από την τελική τοποθέτηση των κυκλωμάτων.

4.3.4 Από τον πάγκο στη μακέτα

Η ανάπτυξη έγινε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη, το κύκλωμα συναρμολογήθηκε και δοκιμάστηκε πάνω σε πάγκο εργασίας, με τα τρία breadboards ελεύθερα, πρόχειρη καλωδίωση και λαμπτήρες διαφόρων χρωμάτων από όσους ήταν διαθέσιμοι. Το Σχήμα 4.4 δείχνει τη φάση αυτή.



Σχήμα 4.4: Η πρώτη φάση, με τα τρία breadboards σε πάγκο εργασίας και δοκιμαστικούς λαμπτήρες

Η φάση αυτή είχε σκοπό την επαλήθευση της λογικής και όχι την αισθητική. Τα προβλήματα των ενοτήτων 4.7 και 4.8 εντοπίστηκαν και λύθηκαν εδώ, όπου η πρόσβαση σε κάθε καλώδιο ήταν άμεση και η αφαίρεση ενός εξαρτήματος ζήτημα δευτερολέπτων.

Στη δεύτερη φάση το σύνολο μεταφέρθηκε στη μακέτα. Οι λαμπτήρες αντικαταστάθηκαν από λευκούς και τοποθετήθηκαν μέσα στα περιβλήματα των ιστών, η καλωδίωση κόπηκε στα σωστά μήκη και δρομολογήθηκε κάτω από το οδόστρωμα, και τα τρία breadboards με τον μικροελεγκτή τοποθετήθηκαν στα διαμερίσματα της βάσης. Τα Σχήματα 4.5 έως 4.8 δείχνουν το αποτέλεσμα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.



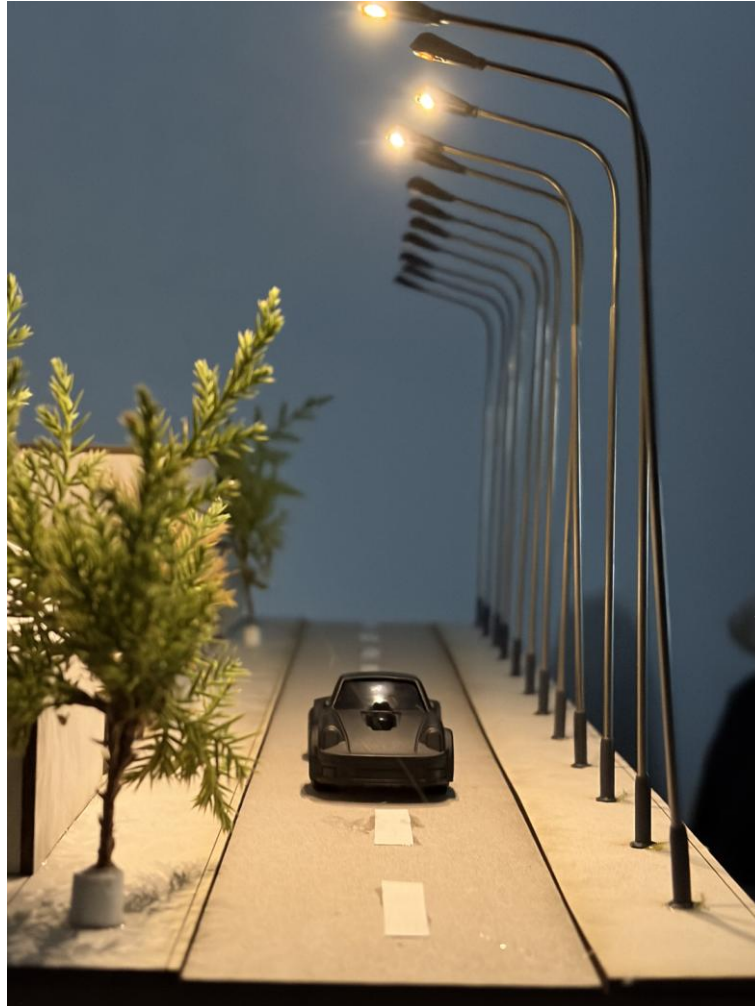
Σχήμα 4.5: Η ολοκληρωμένη μακέτα σε λειτουργία, με τους δώδεκα ιστούς αναμμένους κατά μήκος του δρόμου



Σχήμα 4.6: Άποψη της μακέτας με τα κτίρια, τη βλάστηση και το όχημα δοκιμών



Σχήμα 4.7: Λεπτομέρεια της ζώνης φωτισμού, με τον φωτεινό κύκλο κάθε ιστού στο οδόστρωμα



Σχήμα 4.8: Το όχημα δοκιμών μέσα στη ζώνη ανίχνευσης, με τους λαμπτήρες σε πλήρη ένταση

Πέρα από τα ηλεκτρονικά, η μακέτα συμπληρώθηκε με στοιχεία σκηνογραφίας: κτίρια από χαρτόνι, δέντρα μοντελισμού και ένα όχημα υπό κλίμακα το οποίο χρησιμοποιείται ως αντικείμενο δοκιμής. Τα στοιχεία αυτά δεν έχουν λειτουργικό ρόλο, εξυπηρετούν όμως δύο σκοπούς. Δίνουν στον θεατή αίσθηση κλίμακας, χωρίς την οποία ένας δρόμος τριάντα εκατοστών δεν διαβάζεται ως δρόμος. Και, πιο πρακτικά, τα κτίρια της απέναντι πλευράς φιλοξενούν τους τρεις αισθητήρες υπερήχων, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε ανοίγματα στη βάση τους και στραμμένοι προς το οδόστρωμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.

Η λογική λειτουργίας και η συνδεσμολογία δεν άλλαξαν κατά τη μεταφορά. Οι μόνες διαφορές ανάμεσα στις δύο φάσεις είναι το χρώμα των λαμπτήρων, με τις ηλεκτρικές συνέπειες που περιγράφονται στην ενότητα 4.7, και η τακτοποίηση της καλωδίωσης.

4.4 Συνδεσμολογία

Για την αποφυγή λαθών υιοθετήθηκε χρωματική κωδικοποίηση: κόκκινο για τα 5 V, μαύρο ή σκούρο για τις γειώσεις, και διακριτά χρώματα για τα σήματα. Η σύμβαση τηρήθηκε στα καλώδια τροφοδοσίας χωρίς εξαίρεση. Στα καλώδια σήματος προς τον μικροελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά χρώματα ανά ζώνη, ώστε η οπτική επιθεώρηση να δείχνει άμεσα ποιο καλώδιο ανήκει πού.

4.4.1 Τροφοδοσία και κοινή γείωση

Η τροφοδοσία και των τριών breadboards προέρχεται από την ακίδα 5V του Arduino, και η γείωσή τους από την ακίδα GND. Με μία μόνο πηγή, το ζήτημα της κοινής αναφοράς λύνεται από μόνο του.

Ο τρόπος διανομής επιλέχθηκε συνειδητά. Κάθε breadboard τροφοδοτείται με το δικό του ζεύγος καλωδίων απευθείας από την πλακέτα, σε διάταξη αστέρα, και όχι αλυσιδωτά με το ρεύμα να περνά από το ένα breadboard στο επόμενο. Η διαφορά δεν αφορά το συνολικό ρεύμα, το οποίο είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις, αλλά δύο άλλα μεγέθη.

Το πρώτο είναι η πτώση τάσης. Σε αλυσιδωτή σύνδεση, το ρεύμα και των τριών ζωνών διασχίζει τα καλώδια και τις επαφές του πρώτου breadboard, το ρεύμα των δύο ζωνών τα καλώδια του δεύτερου, και ούτω καθεξής. Οι επαφές ενός breadboard έχουν αντίσταση της τάξης των δεκάδων milliohm η καθεμία, αλλά σε σειρά και με πλήρες ρεύμα η πτώση γίνεται αισθητή, με αποτέλεσμα η τρίτη ζώνη να λειτουργεί σε χαμηλότερη τάση από την πρώτη και να φαίνεται λίγο πιο σκοτεινή.

Το δεύτερο είναι η απομόνωση βλαβών. Στην αλυσίδα, μια χαλαρή επαφή στο πρώτο breadboard αφήνει χωρίς τροφοδοσία και τα τρία, με σύμπτωμα που μοιάζει με γενική βλάβη. Στη διάταξη αστέρα, η ίδια χαλαρή επαφή επηρεάζει μόνο τη ζώνη της, και ο εντοπισμός είναι άμεσος. Η ενότητα αυτή διατηρείται επειδή στη διάρκεια της ανάπτυξης η διάταξη ήταν διαφορετική, και το πρόβλημα που προέκυψε τότε είναι από τα πιο διδακτικά της εργασίας.

Σε ενδιάμεση φάση της ανάπτυξης δοκιμάστηκε διάταξη με ξεχωριστές πλακέτες τροφοδοσίας για τα breadboards, ενώ το Arduino τροφοδοτούνταν από USB. Χωρίς σύνδεση των δύο γειώσεων, δύο ανεξάρτητα κυκλώματα του συστήματος καταρρέουν ταυτόχρονα.

Το πρώτο είναι η ανάγνωση του αισθητήρα. Ο HC-SR04 παράγει το σήμα Echo ως τάση ως προς τη δική του γείωση. Αν η γείωση αυτή δεν ταυτίζεται με τη γείωση του μικροελεγκτή, η συνάρτηση pulseIn δεν έχει σημείο αναφοράς για να κρίνει τι είναι υψηλή και τι χαμηλή στάθμη, και επιστρέφει μηδέν σε κάθε κλήση.

Το δεύτερο είναι η οδήγηση του τρανζίστορ. Το 2N2222 άγει με βάση την τάση ανάμεσα σε βάση και εκπομπό. Η ακίδα του Arduino δίνει 5 V ως προς τη γείωση του Arduino, ενώ ο εκπομπός κάθεται στη γείωση της πλακέτας τροφοδοσίας. Χωρίς κοινή αναφορά η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο σημεία είναι απροσδιόριστη και το τρανζίστορ μένει κλειστό.

Ο κανόνας διατυπώνεται σε μία πρόταση: οι γειώσεις όλων των πηγών ενώνονται πάντα μεταξύ τους, τα θετικά τους ποτέ. Η τελική διάταξη με μοναδική πηγή τον ίδιο τον μικροελεγκτή κάνει τον κανόνα αυτόματα σεβαστό, και ήταν ένας από τους λόγους που προτιμήθηκε.

4.4.2 Σύνδεση των αισθητήρων και δομή κόμβων

Η προφανής υλοποίηση, δηλαδή η αλυσιδωτή σύνδεση των τριών αισθητήρων ο ένας μετά τον άλλον, απορρίφθηκε. Μια αλυσίδα έχει τόσα σημεία αστοχίας όσα και οι κρίκοι της, και μια χαλαρή επαφή στον πρώτο αισθητήρα αφήνει χωρίς τροφοδοσία και τους τρεις, με σύμπτωμα που μοιάζει με βλάβη λογισμικού.

Αντ' αυτού χρησιμοποιήθηκαν δύο κατακόρυφες στήλες του breadboard ως κόμβοι διανομής. Στη στήλη της τροφοδοσίας καταλήγουν ένα καλώδιο από την ακίδα 5V του Arduino και τα τρία καλώδια VCC των αισθητήρων. Στη στήλη της γείωσης καταλήγουν ένα καλώδιο από την ακίδα GND και τα

τρία καλώδια GND των αισθητήρων, ενώ από την ίδια στήλη αναχωρούν και τα καλώδια προς τις ράγες του αρνητικού των τριών breadboards.

Με τη διάταξη αυτή κάθε αισθητήρας έχει τη δική του απευθείας διαδρομή προς την πλακέτα. Βλάβη ή χαλαρή επαφή σε έναν δεν παρασύρει τους άλλους δύο, και ο εντοπισμός του υπαίτιου γίνεται με απλή αφαίρεση ενός καλωδίου τη φορά.

Οι ακίδες Trigger και Echo κάθε αισθητήρα οδηγούνται απευθείας στις ψηφιακές ακίδες του μικροελεγκτή, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2. Ο μικροελεγκτής δεν έχει κανένα άλλο συνδεδεμένο εξάρτημα εισόδου.

4.4.3 Σύνδεση των ζωνών φωτισμού

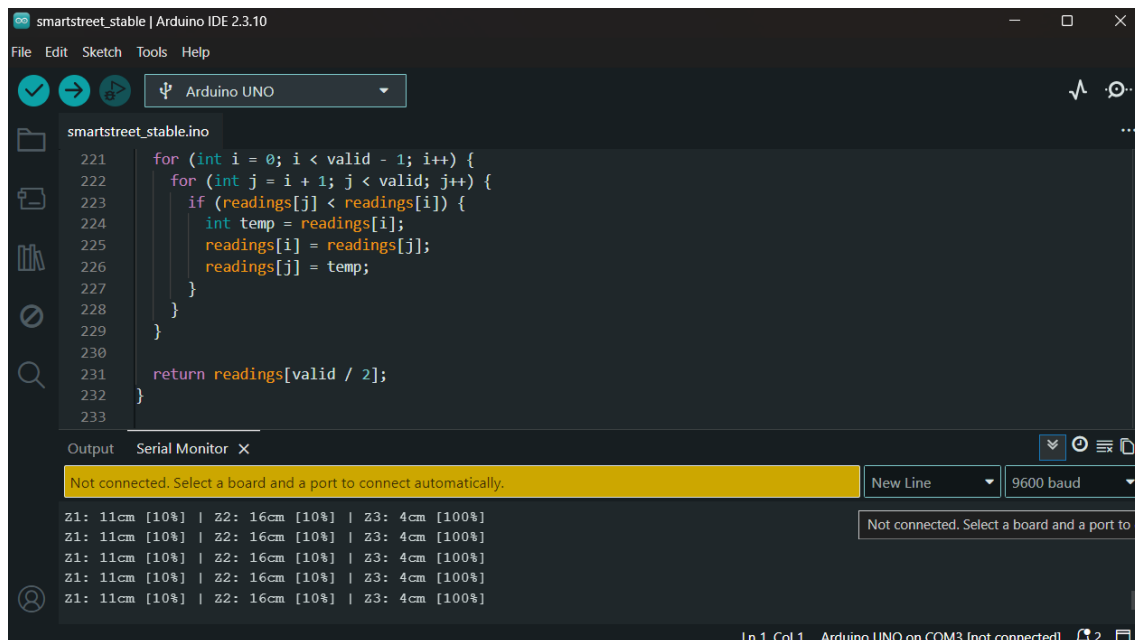
Κάθε ζώνη έχει τέσσερα LED παράλληλα, με μία αντίσταση $220\ \Omega$ στην άνοδο του καθενός. Οι τέσσερις κάθοδοι ενώνονται σε κοινή γραμμή που καταλήγει στον συλλέκτη του 2N2222. Ο εκπομπός πηγαίνει στη γείωση και η βάση συνδέεται μέσω αντίστασης $1\ \text{k}\Omega$ σε ακίδα PWM, για τους λόγους που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.6. Οι τρεις ζώνες χρησιμοποιούν τις ακίδες 9, 10 και 11, όλες με δυνατότητα PWM και όλες οδηγούμενες από τον ίδιο μετρητή του μικροελεγκτή, οπότε λειτουργούν στην ίδια συχνότητα.

Η ομοιομορφία αυτή δεν ήταν δεδομένη. Οι ακίδες 5 και 6 του Uno λειτουργούν στα 980 Hz ενώ οι υπόλοιπες στα 490 Hz, επειδή οδηγούνται από διαφορετικούς μετρητές. Αν οι τρεις ζώνες μοιράζονταν ακίδες από διαφορετικούς μετρητές, θα εμφάνιζαν διαφορετική συμπεριφορά σε βιντεοσκόπηση, κάτι ανεπιθύμητο για μια κατασκευή που προορίζεται για επίδειξη. Η επιλογή των 9, 10 και 11 αποφεύγει το ζήτημα.

4.5 Το λογισμικό ελέγχου

4.5.1 Το περιβάλλον ανάπτυξης

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έγινε με το Arduino IDE, στην έκδοση 2.3.10. Πρόκειται για το επίσημο, ανοιχτού κώδικα περιβάλλον ανάπτυξης της πλατφόρμας, το οποίο ενσωματώνει τον επεξεργαστή κειμένου, τον μεταγλωττιστή, το εργαλείο μεταφόρτωσης και τη σειριακή οθόνη σε μία εφαρμογή.



Σχήμα 4.9: Το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE κατά τη μεταγλώττιση του κώδικα ελέγχου

Η ροή εργασίας είναι απλή και επαναλαμβανόμενη. Από το μενού επιλέγεται η πλακέτα, εδώ Arduino Uno, και η σειριακή θύρα στην οποία είναι συνδεδεμένη. Το πρώτο κουμπί μεταγλωττίζει τον κώδικα και αναφέρει τυχόν σφάλματα χωρίς να τον στείλει στην πλακέτα, ενώ το δεύτερο μεταγλωττίζει και μεταφορτώνει. Η σειριακή οθόνη ανοίγει σε ξεχωριστό παράθυρο και εμφανίζει ό,τι τυπώνει ο κώδικας με την εντολή `Serial.print`.

Δύο χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος αποδείχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμα κατά την ανάπτυξη. Το πρώτο είναι η σειριακή οθόνη, η οποία ήταν το βασικό εργαλείο διάγνωσης σε όλα τα προβλήματα που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.7: χωρίς αυτήν, ένας αισθητήρας που δεν αποκρίνεται και ένας αισθητήρας που αποκρίνεται λάθος είναι δύο καταστάσεις οπτικά ταυτόσημες.

Το δεύτερο είναι η αναφορά χρήσης μνήμης που τυπώνεται μετά από κάθε επιτυχή μεταγλώττιση. Ο κώδικας ελέγχου καταλαμβάνει 4.318 bytes, δηλαδή το 13% της διαθέσιμης μνήμης προγράμματος των 32 KB, ενώ οι καθολικές μεταβλητές δεσμεύουν 258 bytes, δηλαδή το 12% της μνήμης SRAM, αφήνοντας 1.790 bytes ελεύθερα για τις τοπικές μεταβλητές. Τα νούμερα αυτά δείχνουν ότι η πλατφόρμα είναι υπεραρκετή για την εφαρμογή, με περιθώριο για σημαντική επέκταση της λογικής χωρίς αλλαγή υλικού.

Η γλώσσα είναι ουσιαστικά C++ με ένα λεπτό στρώμα βιβλιοθηκών που κρύβει τους καταχωρητές του μικροελεγκτή πίσω από συναρτήσεις όπως οι `digitalWrite`, `analogWrite` και `pulseIn`. Ο κώδικας της εργασίας δεν χρησιμοποιεί καμία εξωτερική βιβλιοθήκη πέρα από τις ενσωματωμένες, επιλογή που τον κάνει αυτάρκη και μεταφέρσιμο σε οποιαδήποτε εγκατάσταση του περιβάλλοντος χωρίς προηγούμενη λήψη εξαρτήσεων.

4.5.2 Δομή του κώδικα

Ο κώδικας γράφτηκε σε Embedded C στο περιβάλλον του Arduino IDE και οργανώθηκε σε τρία μέρη. Το πρώτο είναι οι δηλώσεις σταθερών, όπου συγκεντρώνονται όλες οι παράμετροι που ενδέχεται να χρειαστεί να αλλάξουν: οι ακίδες, τα κατώφλια της φωτοαντίστασης, τα επίπεδα έντασης, η μέγιστη

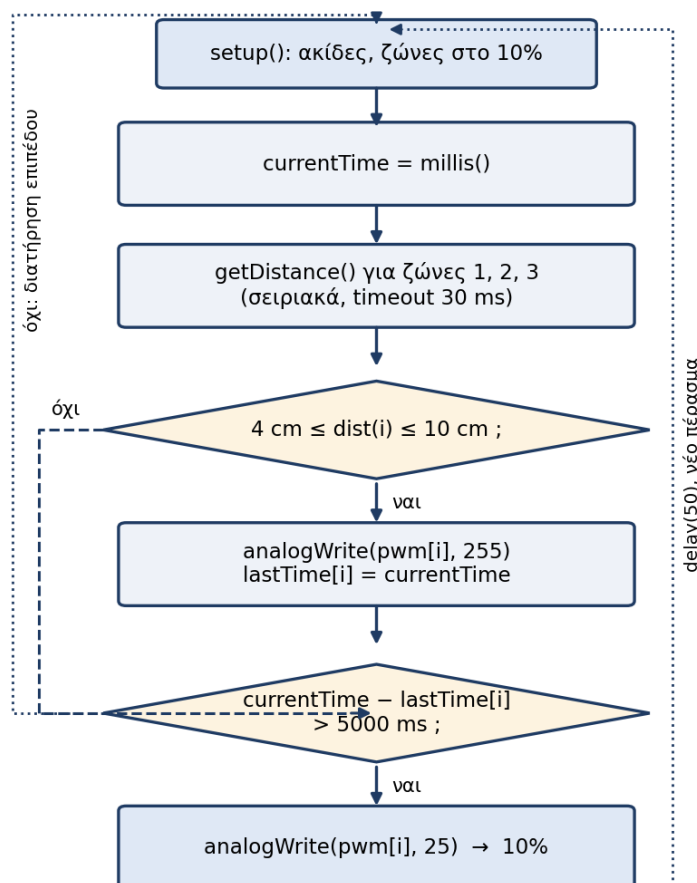
απόσταση ανίχνευσης και οι χρόνοι. Το δεύτερο είναι η ρουτίνα αρχικοποίησης. Το τρίτο είναι ο κύριος βρόχος.

Επειδή οι τρεις ζώνες είναι πανομοιότυπες, όλες οι μεταβλητές κατάστασης δηλώθηκαν ως πίνακες τριών θέσεων και όλες οι συναρτήσεις δέχονται τον αριθμό της ζώνης ως όρισμα. Ο κώδικας που χειρίζεται τρεις ζώνες είναι έτσι σχεδόν ίδιος σε μήκος με τον κώδικα για μία, και η προσθήκη τέταρτης ζώνης απαιτεί αλλαγή σε δύο γραμμές.

4.5.3 Ο αλγόριθμος ελέγχου

Ο κύριος βρόχος εκτελεί την ακόλουθη ακολουθία. Καταγράφει τον τρέχοντα χρόνο μέσω της `millis` και στη συνέχεια διαβάζει διαδοχικά τους τρεις αισθητήρες υπερήχων. Για κάθε ζώνη στην οποία η μετρούμενη απόσταση βρίσκεται μέσα στο παράθυρο των 4 έως 10 εκατοστών, η αντίστοιχη έξοδος τίθεται στο 100% και σημειώνεται η χρονική στιγμή της ανίχνευσης. Για κάθε ζώνη στην οποία έχουν περάσει πέντε δευτερόλεπτα από την τελευταία ανίχνευση, η έξοδος επιστρέφει στο επίπεδο αναμονής. Ο βρόχος κλείνει με καθυστέρηση 50 ms και επαναλαμβάνεται. Το Σχήμα 4.10 παρουσιάζει τη ροή.

Δεν υπάρχει διάκριση ημέρας και νύχτας. Το σύστημα εκτελεί την ίδια ακολουθία συνεχώς, από τη στιγμή που θα τροφοδοτηθεί μέχρι να αποσυνδεθεί.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου

Η απουσία διάκρισης ημέρας και νύχτας είναι η σημαντικότερη λειτουργική έλλειψη της υλοποίησης, και έχει ενεργειακό κόστος που ποσοτικοποιείται στην ενότητα 5.5. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσθήκη της θα ήταν ιδιαίτερα αποδοτική με τη συγκεκριμένη επιλογή αισθητήρα: ο υπερήχων καταναλώνει αισθητά μόνο τη στιγμή που εκπέμπει, οπότε η απλή παράλειψη της κλήσης της `getDistance` κατά τη διάρκεια της ημέρας θα μείωνε πραγματικά την κατανάλωση, σε αντίθεση με έναν υπέρυθρο πομπό που εκπέμπει ούτως ή άλλως.

4.5.4 Διαδοχική ενεργοποίηση των αισθητήρων

Με τρεις αισθητήρες υπερήχων στον ίδιο χώρο, η ταυτόχρονη εκπομπή είναι λάθος. Αν δύο μονάδες εκπέμπουν μαζί, καθεμία μπορεί να λάβει την ηχώ της άλλης και να αναφέρει απόσταση που δεν αντιστοιχεί σε τίποτα μπροστά της. Το φαινόμενο ονομάζεται διαφωνία και είναι το κύριο πρόβλημα των συστοιχιών υπερήχων.

Η αντιμετώπιση στον κώδικα είναι η αυστηρά σειριακή ανάγνωση: ο βρόχος ενεργοποιεί τον πρώτο αισθητήρα, περιμένει την ηχώ ή τη λήξη του χρονικού ορίου, και μόνο μετά προχωράει στον δεύτερο. Ανάμεσα σε δύο μετρήσεις παρεμβάλλεται μικρό διάστημα ώστε να αποσβεστούν οι ανακλάσεις της προηγούμενης. Το κόστος είναι στον χρόνο του βρόχου, ο οποίος αναλύεται στην ενότητα που ακολουθεί.

4.5.5 Μη μπλοκάρουσα χρονομέτρηση

Η πρώτη έκδοση του κώδικα χρησιμοποιούσε την εντολή `delay` για τον χρόνο παραμονής σε πλήρη ένταση. Το αποτέλεσμα ήταν ότι, όσο μια ζώνη περίμενε, ο μικροελεγκτής δεν έκανε τίποτα άλλο: δεν διάβαζε τους υπόλοιπους αισθητήρες και δεν ενημέρωνε τις άλλες ζώνες. Ένα αντικείμενο που περνούσε γρήγορα από δύο ζώνες ενεργοποιούσε μόνο την πρώτη.

Η λύση ήταν η αντικατάσταση της `delay` με σύγκριση χρονοσφραγίδων μέσω της `millis`. Κάθε ζώνη κρατάει τη στιγμή της τελευταίας ανίχνευσης, και σε κάθε πέρασμα του βρόχου ελέγχεται αν έχει παρέλθει ο χρόνος αναμονής. Ο χρόνος αυτός ορίστηκε στα 3 δευτερόλεπτα: μικρότερος έκανε τον φωτισμό να σβήνει πριν το αντικείμενο βγει από τη ζώνη, μεγαλύτερος κρατούσε τις ζώνες αναμμένες χωρίς λόγο.

Ο χρόνος ενός πλήρους περάσματος του βρόχου καθορίζεται από τους αισθητήρες. Κάθε μέτρηση διαρκεί από λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου, όταν υπάρχει κοντινό αντικείμενο, έως το χρονικό όριο των 25 ms όταν δεν επιστρέφει ηχώ. Με τρεις διαδοχικές μετρήσεις και τα ενδιάμεσα διαστήματα, το χειρότερο πέρασμα διαρκεί περίπου 85 ms. Ο αριθμός αυτός είναι αποδεκτός για την εφαρμογή, αφού ένα όχημα χρειάζεται πολύ περισσότερο για να διασχίσει μια ζώνη, αλλά θα γινόταν περιοριστικός αν οι ζώνες αυξάνονταν σε δέκα ή δεκαπέντε.

4.5.6 Φιλτράρισμα και αποφυγή ψευδών ανιχνεύσεων

Ο αισθητήρας υπερήχων δίνει περιστασιακά τιμές που δεν αντιστοιχούν σε τίποτα, είτε λόγω ανάκλασης σε κάποιο τοίχωμα είτε λόγω αποτυχίας λήψης της ηχούς είτε λόγω της ηχούς γειτονικού αισθητήρα. Η πρώτη έκδοση του κώδικα δεχόταν κάθε μεμονωμένη μέτρηση ως έγκυρη, με αποτέλεσμα οι ζώνες να αναβοσβήνουν ακόμη και με ακίνητο αντικείμενο μπροστά τους. Στην τελική έκδοση εφαρμόζονται τρία επίπεδα φιλτραρίσματος μέσα στην ίδια συνάρτηση μέτρησης.

Το πρώτο είναι χρονικό. Το όριο αναμονής της `pulseIn` ορίζεται στα 20 ms, τιμή που αντιστοιχεί σε απόσταση περίπου τριών μέτρων. Κάθε ηχώ που θα έφτανε αργότερα προέρχεται σχεδόν σίγουρα από ανάκλαση σε απομακρυσμένο αντικείμενο και απορρίπτεται πριν καν υπολογιστεί απόσταση.

Το δεύτερο είναι γεωμετρικό. Μια μέτρηση γίνεται δεκτή μόνο αν η υπολογισμένη απόσταση βρίσκεται μεταξύ 2 και 400 εκατοστών, δηλαδή μέσα στο ονομαστικό εύρος λειτουργίας της μονάδας. Τιμές εκτός αυτού είναι εξ ορισμού άκυρες.

Το τρίτο είναι στατιστικό και είναι το ουσιαστικό. Κάθε αισθητήρας διαβάζεται τρεις φορές διαδοχικά, με δέκα χιλιοστά του δευτερολέπτου απόσταση μεταξύ των δειγμάτων. Τα έγκυρα δείγματα ταξινομούνται και επιστρέφεται η μεσαία τιμή. Το φίλτρο διαμέσου, σε αντίθεση με τον μέσο όρο, απορρίπτει εντελώς μια μεμονωμένη ακραία τιμή αντί να την ενσωματώσει μειωμένη: αν δύο από τα τρία δείγματα λένε επτά εκατοστά και το τρίτο λέει διακόσια, το αποτέλεσμα είναι επτά και όχι εβδομήντα.

Ο κώδικας μετράει επιπλέον πόσα από τα τρία δείγματα ήταν έγκυρα και επιστρέφει την ένδειξη απουσίας μόνο όταν αποτύχουν και τα τρία. Η ανοχή αυτή είναι που κάνει τη ζώνη να παραμένει σταθερά αναμμένη όταν το αντικείμενο είναι ακίνητο μέσα στο πεδίο του αισθητήρα, κατάσταση στην οποία οι χαμένες μετρήσεις είναι συχνές.

4.5.7 Ομαλή μετάβαση της έντασης

Στην αρχική υλοποίηση η ζώνη περνούσε ακαριαία από το επίπεδο αναμονής στο 100% και, μετά τα πέντε δευτερόλεπτα, εξίσου ακαριαία πίσω. Το άναμμα ήταν αποδεκτό, το σβήσιμο όμως ήταν οπτικά απότομο και, σε πραγματική εγκατάσταση, θα ήταν επικίνδυνο: η ξαφνική πτώση φωτεινότητας προκαλεί στιγμιαία μείωση της οπτικής οξύτητας του οδηγού που μόλις πέρασε.

Η τελική έκδοση διατηρεί την ακαριαία άνοδο και αντικαθιστά το απότομο σβήσιμο με γραμμική απόσβεση. Η λογική υλοποιείται εξ ολοκλήρου ως συνάρτηση του χρόνου που έχει περάσει από την τελευταία ανίχνευση, χωρίς μεταβλητές κατάστασης μετάβασης. Για τα πρώτα πέντε δευτερόλεπτα η ζώνη μένει στο 100%. Στα επόμενα δύο, το επίπεδο μειώνεται γραμμικά από το 255 προς το 26 με βάση το κλάσμα του χρόνου απόσβεσης που έχει διανυθεί. Μετά το πέρας των επτά δευτερολέπτων συνολικά, η ζώνη σταθεροποιείται στο επίπεδο αναμονής.

Η επιλογή να εξαρτάται το επίπεδο αποκλειστικά από τη διαφορά χρόνου, και όχι από βήματα ανά πέρασμα του βρόχου, έχει πρακτικό πλεονέκτημα: η διάρκεια της απόσβεσης παραμένει σταθερά δύο δευτερόλεπτα ανεξάρτητα από το πόσο γρήγορα τρέχει ο βρόχος. Αν η απόσβεση υλοποιούνταν με σταθερό βήμα ανά πέρασμα, κάθε αλλαγή στον αριθμό των αισθητήρων ή στους χρόνους αναμονής θα άλλαζε και την ταχύτητά της.

Αν το αντικείμενο επανεμφανιστεί κατά τη διάρκεια της απόσβεσης, η χρονοσφραγίδα ανανεώνεται και η ζώνη επιστρέφει αμέσως στο 100%, χωρίς ενδιάμεση κατάσταση.

4.6 Δομή του πηγαίου κώδικα

Ο κώδικας του Παραρτήματος Α οργανώνεται σε τις δηλώσεις σταθερών και μεταβλητών κατάστασης, τη ρουτίνα `setup`, τον βρόχο `loop` και τρεις βοηθητικές συναρτήσεις: την `updateZone` που αποφασίζει το επίπεδο μιας ζώνης, την `getDistance` που εκτελεί τη φιλτραρισμένη μέτρηση, και την `printZone` που τυπώνει την κατάσταση στη σειριακή θύρα.

Οι σταθερές ορίζουν τις ακίδες των τριών αισθητήρων και των τριών εξόδων PWM, τα δύο επίπεδα φωτεινότητας, και τον χρόνο παραμονής σε πλήρη ένταση. Οι μεταβλητές κατάστασης είναι τρεις χρονοσφραγίδες τύπου unsigned long, μία ανά ζώνη, οι οποίες κρατούν τη στιγμή της τελευταίας ανίχνευσης.

Η setup θέτει τις ακίδες των Trigger ως εξόδους και των Echo ως εισόδους, τις τρεις ακίδες PWM ως εξόδους, και γράφει σε αυτές το επίπεδο αναμονής. Το σύστημα ξεκινά επομένως με τους δώδεκα λαμπτήρες αναμμένους στο 10% και όχι σβηστούς, κάτι που κάνει ορατό ότι τροφοδοτήθηκε σωστά. Δηλώνει επίσης ρητά την ακίδα 13 ως έξοδο σε χαμηλή στάθμη, για τον λόγο που εξηγείται στην ενότητα 4.7, και τυπώνει ένα μήνυμα εκκίνησης στη σειριακή θύρα.

Η συνάρτηση getDistance δέχεται τις ακίδες Trigger και Echo ενός αισθητήρα και επιστρέφει την απόσταση σε εκατοστά. Στέλνει παλμό 10 μs, μετράει τη διάρκεια της υψηλής στάθμης του Echo με την pulseIn και χρονικό όριο 30 ms, και μετατρέπει τον χρόνο σε απόσταση πολλαπλασιάζοντας με 0,034 και διαιρώντας με δύο. Αν δεν επιστραφεί ηχώ, η pulseIn επιστρέφει μηδέν και η συνάρτηση επιστρέφει την τιμή 999, η οποία βρίσκεται εκτός του παραθύρου ανίχνευσης και ερμηνεύεται σωστά ως απουσία αντικειμένου.

Η loop καλεί την getDistance τρεις φορές, μία ανά ζώνη, με σαράντα χιλιοστά του δευτερολέπτου απόσταση μεταξύ τους, και στη συνέχεια καλεί την updateZone για καθεμία. Κλείνει τυπώνοντας την κατάσταση και των τριών ζωνών και με μια σύντομη καθυστέρηση.

Η updateZone δέχεται τη χρονοσφραγίδα της ζώνης ως αναφορά και όχι ως αντίγραφο, ώστε να μπορεί να την ανανεώσει. Χάρη σε αυτό η λογική απόφασης, δηλαδή ανίχνευση, παραμονή, απόσβεση και επιστροφή στην αναμονή, γράφεται μία φορά και καλείται τρεις. Η ίδια συνάρτηση επιστρέφει το επίπεδο που έγραψε, ώστε να είναι διαθέσιμο για την εκτύπωση.

Η δομή έχει τρία πλεονεκτήματα. Είναι σύντομη και ευανάγνωστη, δεν χρησιμοποιεί καμία εξωτερική βιβλιοθήκη, και οι τρεις ζώνες είναι πραγματικά ανεξάρτητες επειδή καθεμία έχει τη δική της χρονοσφραγίδα και το δικό της επίπεδο. Η προσθήκη τέταρτης ζώνης απαιτεί τρεις γραμμές δηλώσεων και τρεις κλήσεις, χωρίς καμία αλλαγή στη λογική.

4.7 Παρακολούθηση μέσω σειριακής θύρας

Ο κώδικας τυπώνει σε κάθε πέρασμα του βρόχου την κατάσταση και των τριών ζωνών στη σειριακή θύρα, με ταχύτητα 9600 baud. Η δυνατότητα αυτή δεν είναι απαραίτητη για τη λειτουργία, αλλά ήταν το βασικό εργαλείο σε όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης και παραμένει χρήσιμη κατά την επίδειξη.

Η κάθε γραμμή περιέχει, για κάθε ζώνη, τη μετρούμενη απόσταση σε εκατοστά και το τρέχον επίπεδο φωτεινότητας στην κλίμακα από μηδέν έως 255. Η αντιπαράθεση των δύο μεγεθών στην ίδια γραμμή είναι ακριβώς αυτό που κάνει την έξοδο χρήσιμη: επιτρέπει να διαπιστωθεί αμέσως αν μια ζώνη που δεν άναψε δεν άναψε επειδή ο αισθητήρας δεν είδε τίποτα, ή επειδή είδε κάτι αλλά η λογική απόφασης το απέρριψε.

Η διάκριση αυτή είναι θεμελιώδης για τη διάγνωση. Ένας αισθητήρας που δεν αποκρίνεται και ένας αισθητήρας που αποκρίνεται λάθος είναι δύο καταστάσεις οπτικά ταυτόσημες, αφού και στις δύο ο λαμπτήρας μένει σβηστός. Χωρίς σειριακή έξοδο, ο μόνος τρόπος να ξεχωρίσουν είναι η αφαίρεση εξαρτημάτων ένα προς ένα.

Τρία μοτίβα εμφανίστηκαν στην έξοδο κατά την ανάπτυξη και αξίζει να καταγραφούν, επειδή το καθένα δείχνει προς διαφορετική αιτία. Το πρώτο είναι σταθερή ένδειξη 999 σε όλες τις ζώνες, δηλαδή απουσία

ηχούς παντού. Όταν συνέβη αυτό, η αιτία ήταν η απουσία κοινής γείωσης, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.7: ο μικροελεγκτής δεν είχε σημείο αναφοράς για να διαβάσει το σήμα Echo.

Το δεύτερο είναι λογικές τιμές απόστασης σε μία ζώνη και ταυτόχρονα σε μια γειτονική, χωρίς να υπάρχει αντικείμενο μπροστά από τη δεύτερη. Το μοτίβο αυτό είναι η υπογραφή της ακουστικής διαφωνίας, και εξαφανίστηκε μόλις προστέθηκε η καθυστέρηση των 60 ms.

Το τρίτο είναι σταθερές τιμές γύρω από μια συγκεκριμένη απόσταση με άδειο δρόμο, οι οποίες αντιστοιχούν σε ανάκλαση από κάποιο τοίχωμα ή χώρισμα της κατασκευής και όχι σε αντικείμενο. Η παρατήρηση αυτών ακριβώς των τιμών, με το οδόστρωμα πρώτα ανοιχτό και μετά κλειστό, οδήγησε στην επιλογή του παραθύρου των 4 έως 10 εκατοστών.

Ένα σημείο που αξίζει προσοχή είναι ότι η ίδια η εκτύπωση κοστίζει χρόνο. Η αποστολή μιας γραμμής των πενήντα περίπου χαρακτήρων στα 9600 baud διαρκεί περίπου 50 ms, χρόνος συγκρίσιμος με τις καθυστερήσεις που έχουν εισαχθεί σκόπιμα στον βρόχο. Η σειριακή έξοδος επομένως δεν είναι παθητικός παρατηρητής: επιβραδύνει το σύστημα που παρατηρεί. Για μετρήσεις χρόνου απόκρισης θα έπρεπε να απενεργοποιηθεί, ή να αυξηθεί η ταχύτητα της θύρας σε 115200 baud, οπότε ο χρόνος αποστολής πέφτει κάτω από 5 ms.

4.8 Προβλήματα που εμφανίστηκαν

Τέσσερα προβλήματα άξιζαν χωριστή αναφορά, και το πρώτο κόστισε το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου της υλοποίησης.

Ο αισθητήρας λειτουργούσε άψογα όταν συνδεόταν απευθείας στο Arduino, με το VCC στα 5V, το Trigger στην ακίδα 2, το Echo στην ακίδα 3 και τη γείωση στο GND. Μόλις όμως η τροφοδοσία περνούσε μέσω breadboard, σταματούσε να δίνει μετρήσεις: η σειριακή έξοδος τύπωνε συνεχώς την ένδειξη απουσίας ηχούς. Η συμπεριφορά ήταν απόλυτα επαναλήψιμη και το κύκλωμα φαινομενικά σωστό.

Η αιτία ήταν η απουσία κοινής γείωσης. Το Arduino τροφοδοτούνταν από USB και οι ράγες των breadboards από ξεχωριστές πλακέτες, με κάθε πηγή να έχει τη δική της γείωση και χωρίς καμία σύνδεση ανάμεσά τους. Οι δύο μηχανισμοί μέσω των οποίων αυτό καταστρέφει τη λειτουργία αναλύθηκαν στην ενότητα 4.5.1.

Η διόρθωση ήταν ένα καλώδιο. Το γεγονός ότι το σύμπτωμα, δηλαδή ένας αισθητήρας που δεν αποκρίνεται, δείχνει προς εντελώς λάθος κατεύθυνση, είναι ο λόγος που το πρόβλημα άντεξε τόσο. Η εμπειρία αυτή οδήγησε τελικά στην απόφαση να τροφοδοτηθεί ολόκληρο το σύστημα από τον μικροελεγκτή, επιλογή που εξαλείφει τη συγκεκριμένη κατηγορία σφαλμάτων αντί να την αντιμετωπίζει.

Το δεύτερο ήταν η ακουστική διαφωνία. Τρεις πομποί που εκπέμπουν στα 40 kHz μέσα στον ίδιο στεγασμένο χώρο ακούει ο ένας τον άλλον, και ο δεύτερος αισθητήρας μπορεί να λάβει ως δική του ηχώ τον παλμό του πρώτου. Η αντιμετώπιση είναι διπλή. Πρώτον, χρονική απόσταση: ο κώδικας παρεμβάλλει καθυστέρηση σαράντα χιλιοστών του δευτερολέπτου ανάμεσα σε κάθε δύο διαδοχικές μετρήσεις, ώστε οι ανακλάσεις της προηγούμενης να έχουν αποσβεστεί πριν ξεκινήσει η επόμενη. Δεύτερον, στατιστική: το φίλτρο διαμέσου της ενότητας 4.6.5 απορρίπτει αυτόματα μια μεμονωμένη μέτρηση που προήλθε από ξένη ηχώ, αφού είναι απίθανο να εμφανιστεί και στα τρία δείγματα. Ο συνδυασμός των δύο αποδείχθηκε αρκετός. Το κόστος είναι στον χρόνο του βρόχου και αναλύεται στην ενότητα 5.4.

Το τρίτο ήταν το ενσωματωμένο LED της πλακέτας. Η ενδεικτική λυχνία που φέρει την ένδειξη L έμενε μόνιμα αναμμένη, σύμπτωμα που αρχικά εκλήφθηκε ως ένδειξη βλάβης. Η εκτέλεση του τυπικού παραδείγματος Blink επιβεβαίωσε ότι η πλακέτα ήταν υγιής. Η εξήγηση βρίσκεται στη διαφορά ανάμεσα σε γνήσιες και συμβατές πλακέτες: στις γνήσιες η λυχνία οδηγείται μέσω τελεστικού ενισχυτή, ενώ σε πολλές συμβατές κρέμεται απευθείας στην ακίδα 13 και ανάβει όταν η ακίδα μένει αδιαμόρφωτη ως είσοδος. Η αντιμετώπιση είναι δύο γραμμές στη ρουτίνα αρχικοποίησης, οι οποίες δηλώνουν την ακίδα ως έξοδο και τη θέτουν σε χαμηλή στάθμη.

Το τέταρτο ήταν το στενό παράθυρο ανίχνευσης. Ο κώδικας δέχεται ως έγκυρη μόνο απόσταση μεταξύ 4 και 10 εκατοστών, εύρος που βρίσκεται κοντά στο κάτω όριο λειτουργίας του HC-SR04. Ένα αντικείμενο που περνάει πιο μακριά δεν ανιχνεύεται καθόλου, και το άνω όριο επιλέχθηκε εμπειρικά ώστε να αντιστοιχεί στο πλάτος της λωρίδας. Κάθε αλλαγή στη γεωμετρία ή στη θέση του αισθητήρα απαιτεί επαναρύθμισή του.

Ένα πέμπτο ζήτημα προέκυψε από τη χρήση λαμπτήρων διαφορετικών χρωμάτων στο πειραματικό στάδιο. Η τάση ορθής φοράς εξαρτάται από το υλικό της επαφής και άρα από το χρώμα: ένα κόκκινο LED έχει περίπου 1,9 V, ένα πράσινο ή κίτρινο περίπου 2,1 V, ενώ ένα λευκό ή μπλε φτάνει τα 3,0 έως 3,2 V. Με την ίδια αντίσταση των 220 Ω, το πράσινο διαρρέεται από περίπου 12 mA και το λευκό από περίπου 7 mA.

Η συνέπεια είναι διπλή. Οι ζώνες με λαμπτήρες διαφορετικού χρώματος δεν έχουν την ίδια κατανάλωση, οπότε οι υπολογισμοί του Κεφαλαίου 5 ισχύουν αυστηρά μόνο για την τελική διάταξη με λευκούς λαμπτήρες. Και, λιγότερο προφανές, η μετάβαση σε λευκούς λαμπτήρες μειώνει το συνολικό ρεύμα κατά περίπου το ένα τρίτο, δηλαδή αυξάνει ακόμη περισσότερο το ήδη άνετο περιθώριο της τροφοδοσίας.

Παραμένει τέλος η αδυναμία διάκρισης δύο αντικειμένων μέσα στην ίδια ζώνη, η οποία δεν αντιμετωπίστηκε. Ο αισθητήρας επιστρέφει την απόσταση του πλησιέστερου εμποδίου και τίποτα άλλο. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν έχει πρακτική σημασία, αφού και τα δύο οχήματα χρειάζονται τον ίδιο φωτισμό, θα είχε όμως σημασία αν το σύστημα ρύθμιζε την ένταση ανάλογα με την πυκνότητα της κυκλοφορίας.

4.9 Διαδικασία συναρμολόγησης και ελέγχου

Η συναρμολόγηση έγινε σταδιακά, με έλεγχο σε κάθε βήμα, και όχι με ολοκληρωμένη συνδεσμολογία και δοκιμή στο τέλος. Η προσέγγιση αυτή προέκυψε μετά την πρώτη αποτυχημένη απόπειρα, όπου συνδέθηκαν όλα ταυτόχρονα και το σύστημα απλώς δεν λειτούργησε, χωρίς να υπάρχει τρόπος να εντοπιστεί ποιο από τα δεκάδες πιθανά σφάλματα ευθυνόταν.

Η μέθοδος που δούλεψε τελικά ήταν η σταδιακή απομόνωση, δηλαδή η αφαίρεση μεταβλητών μέχρι να μείνει μία.

Πρώτο βήμα: ελάχιστο πρόγραμμα, ένας μόνο αισθητήρας συνδεδεμένος απευθείας στο Arduino, κανένα LED. Επιβεβαιώθηκε ότι η μονάδα και ο κώδικας ανάγνωσης λειτουργούν.

Δεύτερο βήμα: ο ίδιος ακριβώς κώδικας, με τη μοναδική διαφορά ότι η τροφοδοσία του αισθητήρα περνούσε μέσω breadboard. Εδώ εμφανίστηκε η αστοχία, και η απομόνωση της μεταβλητής έδειξε ότι το πρόβλημα ήταν στην τροφοδοσία και όχι στον αισθητήρα ή στο λογισμικό.

Τρίτο βήμα, το καθοριστικό: γράφτηκε διαγνωστικό πρόγραμμα που δοκίμαζε χωριστά το κύκλωμα των λαμπτήρων, με πέντε αναβοσβήσιμα μέσα στη ρουτίνα αρχικοποίησης και εντελώς ανεξάρτητα

από οποιαδήποτε ανάγνωση αισθητήρα. Τα LED άναψαν κανονικά, γεγονός που απέδειξε ότι τρανζίστορ, αντιστάσεις και λαμπτήρες ήταν σωστά συνδεδεμένα και περιορίσει την έρευνα αποκλειστικά στην τροφοδοσία του αισθητήρα.

Τέταρτο βήμα: αφού η πρώτη ζώνη λειτούργησε πλήρως, προστέθηκαν η δεύτερη και η τρίτη. Η προσθήκη της δεύτερης ήταν που ανέδειξε την ακουστική διαφωνία, πρόβλημα που δεν υπάρχει καθόλου με μία ζώνη.

Το συμπέρασμα από τη διαδικασία είναι ότι το χρήσιμο διαγνωστικό δεν είναι αυτό που ελέγχει αν το σύστημα δουλεύει, αλλά αυτό που απομονώνει ένα υποσύστημα και απαντά με βεβαιότητα αν φταίει ή όχι.

4.10 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση αφορά ουσιαστικά μία παράμετρο, το παράθυρο ανίχνευσης, και έγινε με προσωρινή προσθήκη εντολών Serial.print στη loop ώστε να καταγράφονται οι τρεις μετρούμενες αποστάσεις σε πραγματικό χρόνο.

Με άδειο δρόμο, οι τιμές των τριών αισθητήρων συγκεντρώνονταν αρκετά πάνω από τα 10 εκατοστά ή επέστρεφαν την τιμή σφάλματος, ανάλογα με το αν ο παλμός έβρισκε κάποιο τοίχωμα της κατασκευής. Με το δοκιμαστικό αντικείμενο μέσα στη λωρίδα, οι τιμές έπεφταν σταθερά στην περιοχή των 5 έως 8 εκατοστών. Το παράθυρο των 4 έως 10 εκατοστών επιλέχθηκε ώστε να περικλείει άνετα τη δεύτερη περιοχή και να αποκλείει την πρώτη.

Η διαδικασία επαναλήφθηκε μετά την τοποθέτηση του καλύμματος του οδοστρώματος, επειδή το κλειστό πλέον περιβάλλον άλλαξε τις ανακλάσεις και μετακίνησε τις τιμές του άδειου δρόμου. Πρόκειται για την πιο ευαίσθητη ρύθμιση της κατασκευής: κάθε μετακίνηση αισθητήρα ή αλλαγή στη γεωμετρία απαιτεί επανάληψή της.

4.11 Οδηγός χρήσης

Το σύστημα λειτουργεί αυτόνομα μετά τον αρχικό προγραμματισμό και δεν απαιτεί καμία ενέργεια από τον χρήστη. Για την εγκατάσταση, ο κώδικας του Παραρτήματος Α μεταγλωττίζεται και μεταφορτώνεται στο Arduino μέσω του Arduino IDE και καλωδίου USB. Το ίδιο καλώδιο USB τροφοδοτεί και ολόκληρο το σύστημα, οπότε δεν απαιτείται δεύτερη σύνδεση. Με την τροφοδοσία, ο μικροελεγκτής εκτελεί τη ρουτίνα αρχικοποίησης και μπαίνει στον κύριο βρόχο.

Για βαθμονόμηση ή συντήρηση, οι παράμετροι που ενδέχεται να χρειαστεί να αλλάξουν είναι συγκεντρωμένες στην αρχή του αρχείου: τα δύο επίπεδα έντασης, τα δύο άκρα του παραθύρου ανίχνευσης και ο χρόνος παραμονής σε πλήρη ένταση. Η πρόσβαση στα κυκλώματα για έλεγχο γίνεται από τα τρία παράθυρα του οδοστρώματος, χωρίς αποσυναρμολόγηση.

4.12 Επίλογος

Το κεφάλαιο περιέγραψε την αρχιτεκτονική, την κατασκευή της μακέτας, τη συνδεσμολογία και το λογισμικό. Οι πιο ουσιαστικές αποφάσεις της υλοποίησης, δηλαδή η σειριακή ανάγνωση των αισθητήρων, η μη μπλοκάρουσα χρονομέτρηση μέσω της millis και η οριοθέτηση του παραθύρου ανίχνευσης, προέκυψαν όλες από αστοχίες που εμφανίστηκαν κατά τη δοκιμή και όχι από τον αρχικό σχεδιασμό. Το επόμενο κεφάλαιο αποτιμά τι πετυχαίνει το σύστημα που προέκυψε.

Κεφάλαιο 5ο: Λειτουργικός έλεγχος και υπολογιστική αποτίμηση

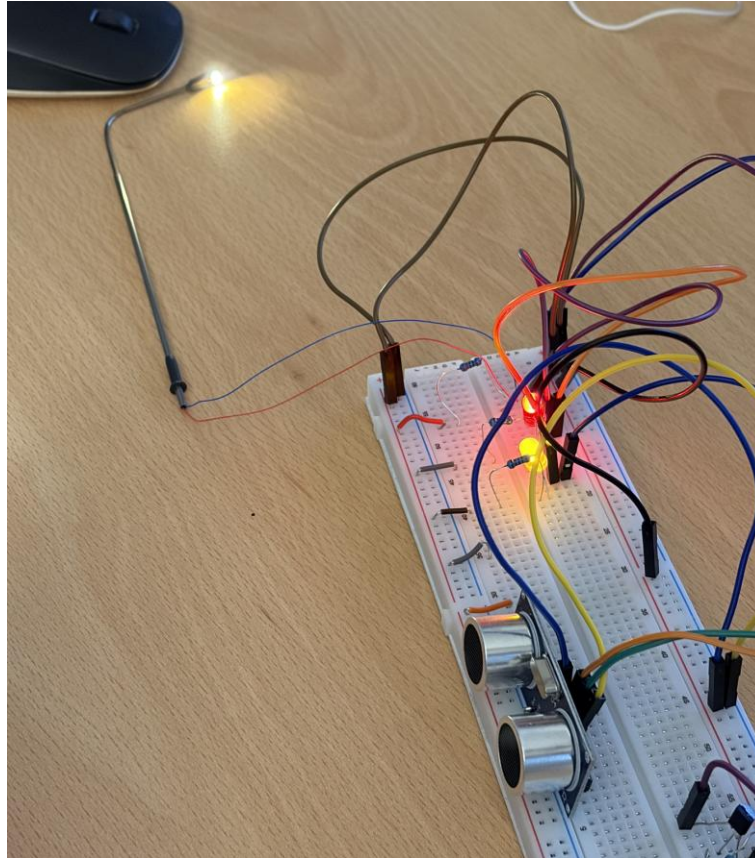
5.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αποτιμά τι πετυχαίνει το σύστημα που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η αποτίμηση γίνεται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο είναι ο λειτουργικός έλεγχος, δηλαδή η επαλήθευση ότι η αλυσίδα από τον αισθητήρα μέχρι τον λαμπτήρα συμπεριφέρεται όπως σχεδιάστηκε. Το δεύτερο είναι ο υπολογισμός των ηλεκτρικών μεγεθών και της εξοικονόμησης ενέργειας από τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων και τις παραμέτρους του κώδικα.

Πρέπει να δηλωθεί εξαρχής ότι δεν πραγματοποιήθηκε συστηματική εκστρατεία μετρήσεων. Κατά την ανάπτυξη έγιναν ορισμένοι σποραδικοί έλεγχοι με πολύμετρο, κυρίως για την επιβεβαίωση της τάσης τροφοδοσίας και τον εντοπισμό των σφαλμάτων της ενότητας 4.7, χωρίς όμως καταγραφή σε μορφή που να επιτρέπει στατιστική επεξεργασία. Όλες επομένως οι αριθμητικές τιμές των ενοτήτων που ακολουθούν είναι υπολογιστικές: προκύπτουν από τα φύλλα δεδομένων των εξαρτημάτων, από τους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 3 και από τις σταθερές του κώδικα του Παραρτήματος Α, και παρουσιάζονται ως αναμενόμενες τιμές. Η συστηματική πειραματική επαλήθευσή τους συζητείται στην ενότητα 5.8.

5.2 Λειτουργικός έλεγχος

Ο έλεγχος έγινε σε δύο φάσεις, πρώτα σε πρωτότυπο πάνω σε breadboard και στη συνέχεια στην ολοκληρωμένη μακέτα. Το Σχήμα 5.1 δείχνει την πρώτη φάση, όπου δοκιμάστηκε η αλυσίδα ανίχνευσης με έναν αισθητήρα και δοκιμαστικούς λαμπτήρες, ανάμεσα στους οποίους ένας τοποθετημένος στην κορυφή λυγισμένου σύρματος ώστε να προσομοιώνει τη γεωμετρία ιστού πριν αγοραστούν οι έτοιμοι.



Σχήμα 5.1: Η πρώτη φάση δοκιμών, με τον αισθητήρα υπερήχων και δοκιμαστικό λαμπτήρα σε αυτοσχέδιο ιστό. Ο έλεγχος επιβεβαίωσε τέσσερα σημεία. Πρώτον, ότι ο αισθητήρας ανιχνεύει αξιόπιστα αντικείμενο που περνάει μπροστά του μέσα στο παράθυρο των 4 έως 10 εκατοστών, και ότι η ένδειξη επανέρχεται μόλις το αντικείμενο απομακρυνθεί. Δεύτερον, ότι η μετάβαση των λαμπτήρων στην πλήρη ένταση γίνεται χωρίς αντιληπτή καθυστέρηση. Τρίτον, ότι μετά την παρέλευση των πέντε δευτερολέπτων οι λαμπτήρες επιστρέφουν στο επίπεδο αναμονής χωρίς να σβήνουν εντελώς. Τέταρτον, ότι οι τρεις ζώνες λειτουργούν ανεξάρτητα, δηλαδή η ενεργοποίηση της μίας δεν επηρεάζει τις άλλες.

Το τέταρτο σημείο ήταν αυτό που απαίτησε τη μεγαλύτερη προσπάθεια. Στην πρώτη έκδοση της συνδεσμολογίας οι ζώνες δύο και τρία άναβαν μαζί, φαινόμενο που οφειλόταν στη διαφωνία μεταξύ των αισθητήρων και περιγράφηκε στην ενότητα 4.7.

Ο λειτουργικός αυτός έλεγχος είναι ποιοτικός. Επιβεβαιώνει ότι η λογική ελέγχου λειτουργεί, δεν ποσοτικοποιεί όμως ούτε την αξιοπιστία της ανίχνευσης ούτε την κατανάλωση. Για την αξιοπιστία θα απαιτούνταν συστηματική επανάληψη διελεύσεων με καταγραφή επιτυχιών και αστοχιών, και για την κατανάλωση πολύμετρο σε σειρά με τη γραμμή τροφοδοσίας.

5.3 Ανάλυση του κώδικα ελέγχου

Ο κώδικας του Παραρτήματος Α είναι αυτός που εκτελείται στη μακέτα. Επειδή οι παράμετροί του καθορίζουν άμεσα τα ενεργειακά αποτελέσματα των επόμενων ενοτήτων, αξίζει να καταγραφούν ρητά.

Το επίπεδο αναμονής ορίζεται από τη σταθερά dimLevel στην τιμή 26 σε κλίμακα 0 έως 255, δηλαδή κύκλο λειτουργίας 10,2%, τον οποίο στη συνέχεια αναφέρουμε ως 10%. Η πλήρης ένταση είναι 255. Το παράθυρο ανίχνευσης είναι από 4 έως 10 εκατοστά, ο χρόνος παραμονής σε πλήρη ένταση μετά την

τελευταία ανίχνευση είναι 5 δευτερόλεπτα, και η απόσβεση που ακολουθεί διαρκεί άλλα 2 δευτερόλεπτα.

Για τον υπολογισμό της ενέργειας σημασία έχει ότι η ζώνη δεν περνά ακαριαία από το 100% στο 10%. Ανάμεσά τους μεσολαβούν δύο δευτερόλεπτα γραμμικής απόσβεσης, κατά τη διάρκεια των οποίων η μέση ένταση είναι περίπου το 55% της πλήρους. Η συνεισφορά τους στο ημερήσιο ισοζύγιο είναι μικρή, αφού πρόκειται για δύο δευτερόλεπτα ανά διέλευση, και για τον λόγο αυτό οι υπολογισμοί που ακολουθούν τα προσμετρούν στον ενεργό χρόνο.

Ο χρόνος ενός πλήρους περάσματος του βρόχου καθορίζεται από τους αισθητήρες και από τις σκόπιμες καθυστερήσεις, όχι από τον επεξεργαστή. Κάθε κλήση της `getDistance` εκτελεί τρία δείγματα, καθένα από τα οποία διαρκεί από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου με κοντινό αντικείμενο έως το όριο των 20 ms χωρίς ηχώ, συν 10 ms απόσταση μεταξύ των δειγμάτων. Μία μέτρηση κοστίζει επομένως από 33 έως 90 ms. Σε αυτά προστίθενται δύο καθυστερήσεις των 40 ms ανάμεσα στους τρεις αισθητήρες και μία των 20 ms στο τέλος του βρόχου.

Το άθροισμα δίνει πέρασμα από περίπου 200 ms με κοντινά αντικείμενα έως περίπου 370 ms με άδειο δρόμο, δηλαδή ρυθμό δειγματοληψίας τριών έως πέντε μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο ανά ζώνη. Ο αριθμός αυτός είναι επαρκής για την ταχύτητα με την οποία διέρχεται ένα μοντέλο οχήματος στη μακέτα, αλλά αποτελεί τον κύριο περιορισμό επεκτασιμότητας του συστήματος: με έξι ζώνες ο βρόχος θα ξεπερνούσε το μισό δευτερόλεπτο και η απόκριση θα γινόταν ορατά καθυστερημένη. Η αντιμετώπιση σε μεγαλύτερη κλίμακα δεν είναι η μείωση των καθυστερήσεων ή των δειγμάτων, τα οποία υπάρχουν για λόγο, αλλά η χρήση αισθητήρων που δεν διαφωνούν μεταξύ τους ή η κατανομή των ζωνών σε περισσότερες μικροελεγκτές.

Τρεις σχεδιαστικές επιλογές του κώδικα αξίζει να σχολιαστούν. Η πρώτη είναι η χρήση της `millis` αντί της `delay` για τη χρονομέτρηση των πέντε δευτερολέπτων. Αν ο χρόνος αναμονής υλοποιούνταν με `delay`, ο μικροελεγκτής θα σταματούσε να διαβάξει τους υπόλοιπους αισθητήρες για όλο αυτό το διάστημα, και ένα όχημα που περνούσε γρήγορα από δύο ζώνες θα ενεργοποιούσε μόνο την πρώτη. Με τη σύγκριση χρονοσφραγίδων ο βρόχος δεν σταματά ποτέ και οι τρεις ζώνες παραμένουν πραγματικά ανεξάρτητες.

Η δεύτερη είναι η κοινή συνάρτηση `updateZone`, η οποία δέχεται τη χρονοσφραγίδα και τη σημαία κατάστασης της ζώνης ως αναφορές. Χάρη σε αυτό η λογική γράφεται μία φορά και καλείται τρεις, αντί να επαναλαμβάνεται αυτούσια, οπότε κάθε μελλοντική αλλαγή γίνεται σε ένα μόνο σημείο.

Η τρίτη αφορά μια συμπεριφορά που προκύπτει χωρίς να έχει προγραμματιστεί ρητά. Αν ένα όχημα εγκαταλείψει τη διαδρομή μετά την πρώτη ζώνη, οι ζώνες δύο και τρία απλώς δεν ενεργοποιούνται ποτέ, ενώ η πρώτη επιστρέφει μόνη της στο επίπεδο αναμονής μετά τα πέντε δευτερόλεπτα. Δεν χρειάστηκε καμία ειδική λογική για την περίπτωση αυτή: προκύπτει από το ότι κάθε ζώνη κρίνεται αποκλειστικά από τον δικό της αισθητήρα και τον δικό της χρονομετρητή. Η ανεξαρτησία των ζωνών, που επιλέχθηκε για λόγους απλότητας, αποδείχθηκε ότι λύνει δωρεάν ένα πρόβλημα που σε κεντρικά συντονισμένη υλοποίηση θα απαιτούσε ρητό χειρισμό.

Σημαντικό είναι επίσης το χρονικό όριο των 20 ms στην `pulseIn`. Χωρίς αυτό, μια αποτυχημένη λήψη ηχούς θα άφηνε τη συνάρτηση να περιμένει επ' αόριστον και ο βρόχος θα πάγωνε. Με το όριο, η αποτυχία κοστίζει 20 ms και επιστρέφεται η τιμή 999, η οποία βρίσκεται εκτός του παραθύρου ανίχνευσης και ερμηνεύεται σωστά ως απουσία αντικειμένου. Η ίδια τιμή επιστρέφεται και όταν η υπολογισμένη απόσταση βγει εκτός του φυσικού εύρους λειτουργίας της μονάδας, δηλαδή κάτω από 2

ή πάνω από 400 εκατοστά, έλεγχος που απορρίπτει προφανώς άκυρες μετρήσεις πριν αυτές φτάσουν στη λογική απόφασης.

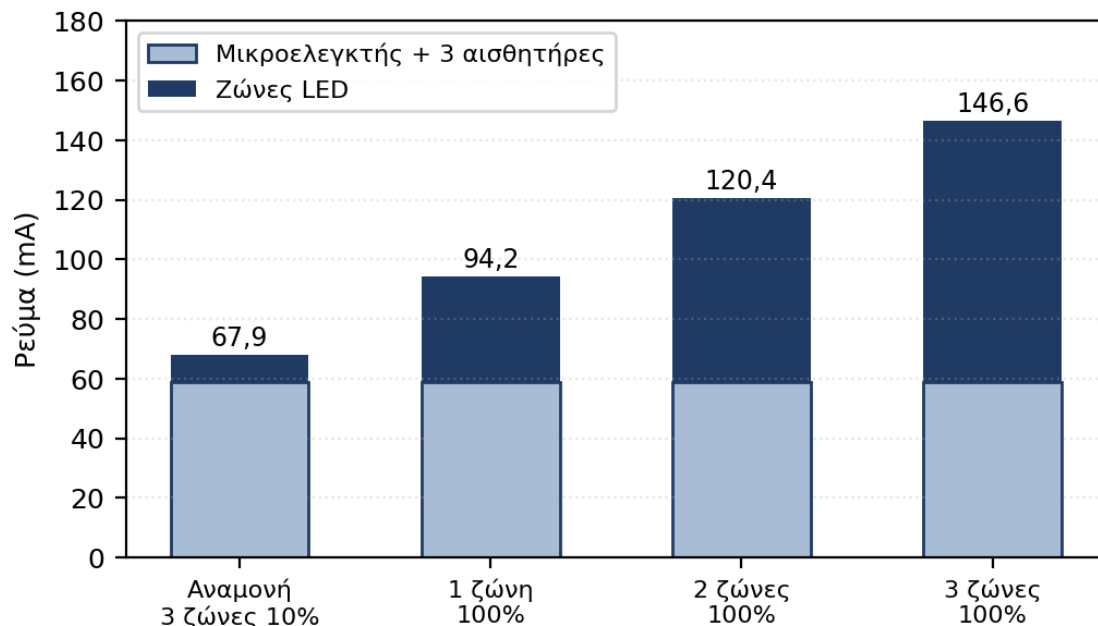
Ο κώδικας τυπώνει τέλος στη σειριακή θύρα την κατάσταση και των τριών ζωνών σε κάθε πέρασμα, με τη μορφή απόστασης και τρέχοντος επιπέδου φωτεινότητας. Η δυνατότητα αυτή δεν χρειάζεται για τη λειτουργία, αλλά ήταν το βασικό εργαλείο κατά τη βαθμονόμηση και παραμένει χρήσιμη για επίδειξη, αφού επιτρέπει να φανεί τι βλέπει το σύστημα τη στιγμή που αντιδρά.

5.4 Αναμενόμενα ηλεκτρικά μεγέθη

Ο Πίνακας 5.1 δίνει τα αναμενόμενα ρεύματα ανά κατάσταση λειτουργίας, υπολογισμένα από τις τιμές του Κεφαλαίου 3 και τις σταθερές του κώδικα. Το ρεύμα κάθε λαμπτήρα λαμβάνεται ίσο με 7,3 mA στην πλήρη ένταση, όπως προέκυψε από τη σχέση 3.2, και μειωμένο στο 10,2% αυτής της τιμής στην κατάσταση αναμονής. Το ρεύμα των αισθητήρων επιβαρύνει το Arduino και όχι τις πλακέτες τροφοδοσίας, σύμφωνα με την κατανομή της ενόττητας 3.8.

Πίνακας 5.1: Αναμενόμενο ρεύμα και ισχύς ανά κατάσταση λειτουργίας

Κατάσταση	Μικροελ. (mA)	Αισθητήρες (mA)	Ζώνες LED (mA)	Σύνολο (mA)	Ισχύς (W)
Αναμονή, 3 ζώνες στο 10%	14	45	8,9	67,9	0,34
1 ζώνη στο 100%	14	45	35,2	94,2	0,47
2 ζώνες στο 100%	14	45	61,4	120,4	0,60
3 ζώνες στο 100%	14	45	87,6	146,6	0,73



Σχήμα 5.2: Αναμενόμενο συνολικό ρεύμα ανά κατάσταση λειτουργίας

Δύο παρατηρήσεις προκύπτουν από τον πίνακα. Η πρώτη είναι ότι κάθε ζώνη που μεταβαίνει από την αναμονή στην πλήρη ένταση προσθέτει περίπου 26 mA, και η σχέση παραμένει γραμμική με τον αριθμό των ενεργών ζωνών, όπως αναμένεται από την ανεξαρτησία τους.

Η δεύτερη είναι πιο ενδιαφέρουσα. Το πάγιο ρεύμα του μικροελεγκτή και των τριών αισθητήρων, περίπου 59 mA, είναι επτά φορές μεγαλύτερο από το συνολικό ρεύμα των δώδεκα λαμπτήρων σε κατάσταση αναμονής, το οποίο είναι μόλις 8,9 mA. Με άλλα λόγια, στην κλίμακα της μακέτας το κύκλωμα που αποφασίζει πότε χρειάζεται φως καταναλώνει πολλαπλάσια από το κύκλωμα που παράγει το φως. Το εύρημα δεν ήταν προφανές πριν γίνει ο υπολογισμός, επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα της επόμενης ενότητας, και επανέρχεται στα συμπεράσματα.

5.5 Εκτίμηση εξοικονόμησης ενέργειας

Η ενέργεια που καταναλώνεται σε ένα χρονικό διάστημα δίνεται από:

$$E = P \cdot t = V \cdot I \cdot t \quad (5.1)$$

Για τη σύγκριση χρησιμοποιείται σενάριο δώδεκα ωρών νυχτερινής λειτουργίας. Στο συμβατικό σύστημα και οι τρεις ζώνες λειτουργούν στο 100% για όλες τις δώδεκα ώρες. Στο σύστημα SmartStreet οι ζώνες λειτουργούν στο 10%, εκτός από τα διαστήματα πραγματικής κίνησης, οπότε η ζώνη μέσα στην οποία βρίσκεται το αντικείμενο ανεβαίνει στο 100% ενώ οι υπόλοιπες δύο παραμένουν στο 10%.

Ο υπολογισμός γίνεται σε δύο επίπεδα, και η διάκριση είναι ουσιώδης. Στο πρώτο συγκρίνεται μόνο το υποσύστημα φωτισμού, δηλαδή η ενέργεια των λαμπτήρων. Στο δεύτερο προστίθεται η κατανάλωση του μικροελεγκτή και των αισθητήρων, την οποία το συμβατικό σύστημα δεν έχει καθόλου. Ο Πίνακας 5.2 δίνει τα αποτελέσματα για ενεργό χρόνο τεσσάρων ωρών, δηλαδή για δρόμο με κίνηση το ένα τρίτο της νύχτας.

Πίνακας 5.2: Αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας για ενεργό χρόνο 4 ωρών

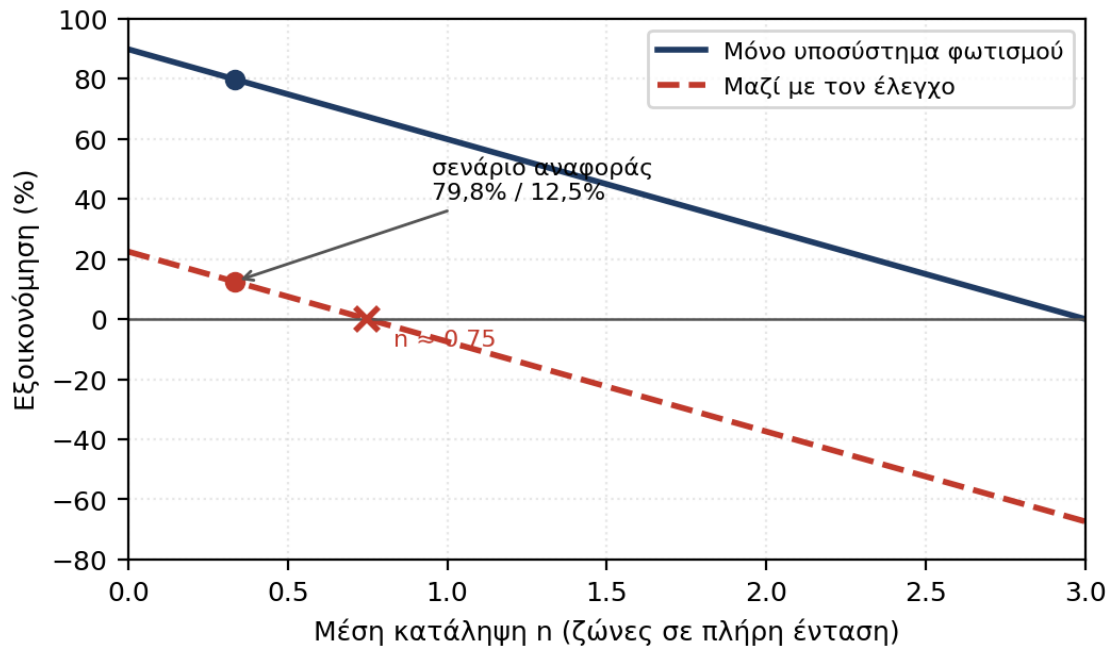
Μέγεθος	Συμβατικό	SmartStreet	Διαφορά
Ενέργεια λαμπτήρων, 12 h νύχτας	5,26 Wh	1,06 Wh	-79,8%
Ενέργεια ελέγχου, 12 h νύχτας	0,00 Wh	3,54 Wh	+3,54 Wh
Σύνολο νύχτας	5,26 Wh	4,60 Wh	-12,5%
Λειτουργία κατά την ημέρα	0,00 Wh	4,08 Wh	+4,08 Wh
Σύνολο εικοσιτετραώρου	5,26 Wh	8,68 Wh	+65,1%

Στο υποσύστημα φωτισμού η μείωση είναι 79,8%. Όταν προστεθεί η κατανάλωση του ελέγχου, πέφτει στο 12,5%. Η διαφορά μεταξύ των δύο αριθμών είναι ολόκληρη η κατανάλωση του μικροελεγκτή και των αισθητήρων, και δείχνει πόσο σημαντικό είναι να δηλώνεται ποιο ακριβώς μέγεθος συγκρίνεται όταν αναφέρεται ποσοστό εξοικονόμησης.

Η τελευταία γραμμή του πίνακα καταγράφει το πιο δυσάρεστο εύρημα. Το σύστημα δεν διαθέτει αισθητήρα φωτεινότητας, οπότε λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο μέρα και νύχτα: οι λαμπτήρες παραμένουν αναμμένοι στο 10% και οι αισθητήρες συνεχίζουν να εκπέμπουν επ' αόριστον. Σε βάση εικοσιτετραώρου η συνολική κατανάλωση φτάνει τις 8,68 Wh έναντι 5,26 Wh ενός συμβατικού συστήματος που σβήνει την αυγή, δηλαδή το σύστημα καταναλώνει περίπου 65% περισσότερο.

Το εύρημα δεν αναιρεί την αρχιτεκτονική. Δείχνει ότι ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού χωρίς κριτήριο ημέρας και νύχτας είναι ημιτελές, όσο καλά και αν λειτουργεί η ανίχνευση κίνησης. Η προσθήκη μιας φωτοαντίστασης, ενός αστρονομικού ρολογιού ή ακόμη και ενός απλού εξωτερικού χρονοδιακόπτη μηδενίζει και τις δύο συνιστώσες της ημερήσιας κατανάλωσης. Το ζήτημα επανέρχεται ως πρώτη πρόταση στο Κεφάλαιο 6, και το Παράρτημα Β δείχνει την απαιτούμενη τροποποίηση του κώδικα.

Κανένα από τα ποσοστά αυτά δεν είναι σταθερό. Εξαρτώνται από το πόσες ζώνες βρίσκονται κατά μέσο όρο σε πλήρη ένταση στη διάρκεια της νύχτας, μέγεθος που ονομάζουμε μέση κατάληψη και συμβολίζουμε με n . Το Σχήμα 5.3 δείχνει τη μεταβολή της εξοικονόμησης καθώς το n πηγαίνει από μηδέν έως τρία.



Σχήμα 5.3: Εξοικονόμηση ενέργειας ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης των ζωνών

Στο ένα άκρο, με τελείως άδειο δρόμο, η εξοικονόμηση στο υποσύστημα φωτισμού φτάνει το 89,8%, δηλαδή ακριβώς το ποσοστό που ορίζει η επιλογή του 10% ως επιπέδου αναμονής. Στο άλλο άκρο, όταν και οι τρεις ζώνες είναι διαρκώς κατειλημμένες, η εξοικονόμηση μηδενίζεται. Η σχέση είναι γραμμική και δίνεται από τη σχέση 89,8% επί ένα μείον n προς τρία.

Η καμπύλη που περιλαμβάνει την κατανάλωση του ελέγχου βρίσκεται 67 εκατοστιαίες μονάδες χαμηλότερα και τέμνει τον άξονα κοντά στο n ίσο με 0,75. Δηλαδή, στην κλίμακα της μακέτας, το σύστημα παύει να είναι ωφέλιμο μόλις κατά μέσο όρο περισσότερο από τα τρία τέταρτα μιας ζώνης βρίσκονται σε πλήρη ένταση. Στην ενότητα 5.8 εξηγείται γιατί το όριο αυτό είναι τεχνούργημα της κλίμακας και όχι της αρχιτεκτονικής.

5.6 Η επιλογή του επιπέδου αναμονής

Το επίπεδο αναμονής είναι η μοναδική παράμετρος που επηρεάζει την εξοικονόμηση χωρίς να αλλάζει τίποτα στο υλικό. Ο κώδικας το ορίζει στο 10%, τιμή αρκετά χαμηλότερη από το 30% που υιοθετούν οι Siddiqui κ.ά. [2] ως επίπεδο ασφαλείας για πεζούς. Ο Πίνακας 5.3 δείχνει τι σημαίνει η επιλογή αυτή.

Πίνακας 5.3: Επίδραση του επιπέδου αναμονής στην εξοικονόμηση

Επίπεδο αναμονής	10% (τρέχον, 26/255)	30% (βιβλιογραφία [2])	50%
Ενέργεια λαμπτήρων, 12 h	1,06 Wh	1,99 Wh	2,92 Wh
Μείωση φωτισμού	-79,8%	-62,2%	-44,4%
Ετήσιο όφελος ανά ιστό 60 W	192 kWh	149 kWh	107 kWh
Επάρκεια για πεζούς	οριακή	επαρκής	άνετη

Η επιλογή είναι πραγματικό trade-off και όχι τεχνική λεπτομέρεια. Το 10% δίνει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση αλλά αφήνει τον δρόμο σε επίπεδο φωτισμού που, σε πραγματική εγκατάσταση, δύσκολα θα θεωρούνταν επαρκές για πεζό ή ποδηλάτη. Το 30% της βιβλιογραφίας θυσιάζει δεκαοκτώ εκατοστιαίες μονάδες εξοικονόμησης για αισθητά ασφαλέστερο επίπεδο αναμονής.

Για τη μακέτα, όπου το ζητούμενο είναι η επίδειξη της αρχής λειτουργίας και όπου η αντίθεση μεταξύ αναμονής και πλήρους έντασης πρέπει να είναι ορατή στον θεατή, το 10% είναι εύλογη επιλογή. Για πραγματική εγκατάσταση η τιμή θα έπρεπε να προκύψει από φωτοτεχνική μελέτη και όχι από την επιθυμία για εντυπωσιακό ποσοστό. Η αλλαγή απαιτεί τροποποίηση μίας σταθεράς στον κώδικα.

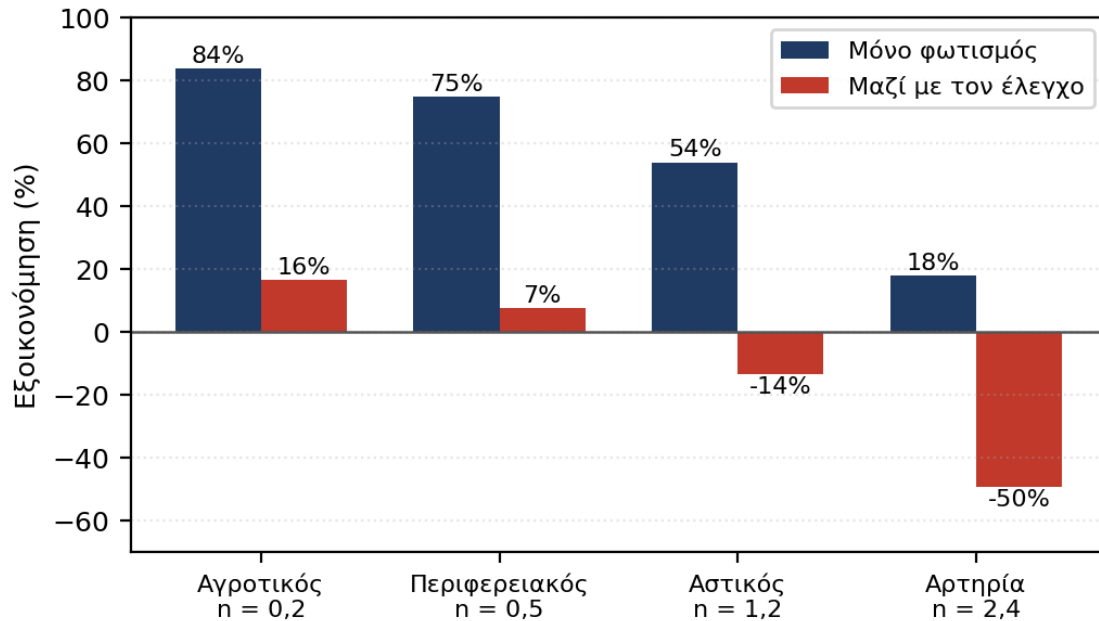
5.7 Ανάλυση ευαισθησίας σε τρεις τύπους οδού

Το σενάριο των τεσσάρων ωρών ενεργού χρόνου που χρησιμοποιήθηκε στην ενότητα 5.5 είναι μία μόνο υπόθεση. Επειδή το συμπέρασμα της εργασίας είναι ακριβώς ότι το ποσοστό εξοικονόμησης δεν έχει νόημα χωρίς τη δηλωμένη παραδοχή του, αξίζει να εξεταστούν και άλλα σενάρια.

Ο Πίνακας 5.5 δίνει τα αποτελέσματα για τέσσερις τύπους οδού, χαρακτηρισμένους από τη μέση κατάληψη n , δηλαδή τον μέσο αριθμό ζωνών που βρίσκονται σε πλήρη ένταση στη διάρκεια της νύχτας. Οι τιμές του n αντιστοιχούν σε εκτιμήσεις και όχι σε μετρήσεις κυκλοφορίας.

Πίνακας 5.4: Εξοικονόμηση για τέσσερις τύπους οδού

Τύπος οδού	Μέση κατάληψη n	Ενέργεια λαμπτήρων	Μείωση φωτισμού	Μείωση με έλεγχο
Αγροτικός, ελάχιστη κίνηση	0,2	0,85 Wh	-83,8%	-16,4%
Περιφερειακός, μέτρια κίνηση	0,5	1,33 Wh	-74,8%	-7,4%
Αστικός δρόμος γειτονιάς	1,2	2,42 Wh	-53,9%	+13,5%
Κεντρική αρτηρία	2,4	4,32 Wh	-17,9%	+49,5%



Σχήμα 5.4: Εξοικονόμηση ενέργειας ανά τύπο οδού, με και χωρίς την κατανάλωση του ελέγχου

Το πρώτο σενάριο, ο αγροτικός δρόμος με ελάχιστη νυχτερινή κίνηση, είναι η περίπτωση για την οποία ένα τέτοιο σύστημα σχεδιάζεται. Ένα όχημα κάθε μερικά λεπτά σημαίνει ότι ο δρόμος βρίσκεται σχεδόν πάντα στο επίπεδο αναμονής, και η εξοικονόμηση στο υποσύστημα φωτισμού πλησιάζει το θεωρητικό όριο του 89,8%.

Το δεύτερο, ο περιφερειακός δρόμος, δίνει ακόμη πολύ καλό αποτέλεσμα στο υποσύστημα φωτισμού, αλλά το συνολικό ποσοστό έχει ήδη πέσει κάτω από το δέκα τοις εκατό στην κλίμακα της μακέτας.

Το τρίτο και το τέταρτο είναι διδακτικά ακριβώς επειδή είναι αρνητικά. Σε αστικό δρόμο γειτονιάς και σε κεντρική αρτηρία, η κατανάλωση των αισθητήρων υπερβαίνει το όφελος από τη μειωμένη λειτουργία των λαμπτήρων, και το σύστημα καταναλώνει περισσότερο από ένα συμβατικό δίκτυο. Πρέπει να τονιστεί ότι το αποτέλεσμα αυτό ισχύει για την κλίμακα της μακέτας. Με φωτιστικά πραγματικής ισχύος οι στήλες του ελέγχου γίνονται αμελητέες και μόνο η πρώτη σειρά αριθμών έχει σημασία.

Η γενική διατύπωση που προκύπτει είναι απλή: το σύστημα αποδίδει όσο ο δρόμος είναι πράγματι άδειος, και η απόφαση για την εγκατάστασή του θα έπρεπε να προηγείται από καταγραφή της νυχτερινής κυκλοφορίας και όχι από επιλογή προμηθευτή.

5.8 Σύγκριση με απλό χρονοδιακόπτη μείωσης

Μια εύλογη ένσταση στην αρχιτεκτονική είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος του οφέλους θα μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς κανέναν αισθητήρα, με έναν απλό χρονοδιακόπτη που μειώνει την ένταση μετά τα μεσάνυχτα. Η λύση αυτή είναι φθηνότερη, απλούστερη και χρησιμοποιείται ήδη σε πραγματικές εγκαταστάσεις, οπότε αξίζει να συγκριθεί.

Ας υποθεθεί χρονοδιακόπτης που κρατά τους λαμπτήρες στο 100% για τις πρώτες πέντε ώρες της νύχτας και τους μειώνει στο 30% για τις υπόλοιπες επτά. Η ενέργεια του υποσυστήματος φωτισμού γίνεται τότε το 70,8% της σταθερής λειτουργίας, δηλαδή η μείωση είναι 29,2%. Το σύστημα SmartStreet, στο ίδιο σενάριο των τεσσάρων ωρών ενεργού χρόνου, δίνει μείωση 79,8%.

Η διαφορά δεν οφείλεται στην τεχνολογία αλλά στη διάκριση ανάμεσα σε δύο διαφορετικά ερωτήματα. Ο χρονοδιακόπτης απαντά στο ερώτημα «τι ώρα είναι», το οποίο συσχετίζεται μόνο κατά προσέγγιση με το πραγματικό ερώτημα. Το σύστημα με αισθητήρες απαντά στο ερώτημα «περνάει κάποιος τώρα», το οποίο είναι το ερώτημα που έχει σημασία. Ένας δρόμος μπορεί να είναι άδειος στις έντεκα και να έχει κίνηση στις τρεις, και ο χρονοδιακόπτης θα κάνει λάθος και στις δύο περιπτώσεις.

Υπάρχει και μια ουσιαστική διαφορά ως προς την ασφάλεια, η οποία λειτουργεί υπέρ της λύσης με αισθητήρες και συχνά αγνοείται. Ο χρονοδιακόπτης αφήνει τον δρόμο στο μειωμένο επίπεδο και όταν περνάει όχημα, δηλαδή θυσιάζει ορατότητα ακριβώς τη στιγμή που χρειάζεται. Το σύστημα με ανίχνευση δίνει πλήρη ένταση σε κάθε πραγματική διέλευση, οπότε πετυχαίνει ταυτόχρονα μεγαλύτερη εξοικονόμηση και καλύτερο φωτισμό όταν αυτός απαιτείται.

Το τίμημα είναι η πολυπλοκότητα και η αξιοπιστία. Ο χρονοδιακόπτης δεν έχει τίποτα να αστοχήσει πέρα από το ίδιο του το ρολόι, ενώ το σύστημα με αισθητήρες έχει τρία σημεία όπου η ανίχνευση μπορεί να αποτύχει, και κάθε αποτυχία αφήνει τον δρόμο σκοτεινό ενώ περνάει κάποιος. Η ποσοτικοποίηση αυτής της αξιοπιστίας, η οποία δεν έγινε στην παρούσα εργασία, είναι το στοιχείο που θα έκρινε τη σύγκριση σε πραγματική εφαρμογή.

5.9 Οικονομική αποτίμηση σε πραγματική κλίμακα

Πέρα από την ενεργειακή επίδοση, έχει ενδιαφέρον μια εκτίμηση του χρόνου απόσβεσης σε πραγματική εγκατάσταση. Ο υπολογισμός βασίζεται σε παραδοχές και δεν υποκαθιστά οικονομοτεχνική μελέτη, δίνει όμως τάξη μεγέθους.

Ας θεωρήσουμε ιστό με φωτιστικό LED ονομαστικής ισχύος 60 W, ο οποίος λειτουργεί κατά μέσο όρο έντεκα ώρες τη νύχτα, δηλαδή περίπου 4.000 ώρες τον χρόνο. Με σταθερή λειτουργία πλήρους έντασης, η ετήσια κατανάλωση είναι:

$$E_{\text{σταθερό}} = 0,060 \text{ kW} \times 4.000 \text{ h} = 240 \text{ kWh ανά ιστό ετησίως}$$

(5.2)

Με τη λογική του SmartStreet, επίπεδο αναμονής 30% και μέση κατάληψη ένα τρίτο, η μέση ισχύς πέφτει στο 37,8% της ονομαστικής, δηλαδή σε περίπου 22,7 W, και η ετήσια κατανάλωση γίνεται 91 kWh. Η διαφορά είναι 149 kWh ανά ιστό ετησίως. Σε αυτή την κλίμακα η κατανάλωση των ηλεκτρονικών ελέγχου, περίπου 0,3 W ή 2,6 kWh τον χρόνο, είναι κάτω από το 2% του οφέλους και δεν αλλάζει ουσιαστικά τον υπολογισμό.

Το πρόσθετο κόστος ανά ιστό για τα ηλεκτρονικά ελέγχου, δηλαδή μικροελεγκτής, αισθητήρας, διάταξη οδήγησης και περίβλημα, εκτιμάται σε 20 έως 35 ευρώ σε ποσότητα, χωρίς την εργασία εγκατάστασης. Με τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για δημοτικό καταναλωτή της τάξης των 0,15 ευρώ ανά κιλοβατώρα, η ετήσια εξοικονόμηση είναι περίπου 22 ευρώ ανά ιστό, και ο χρόνος απόσβεσης του υλικού κυμαίνεται από έναν έως δύο χρόνια.

Ο υπολογισμός αγνοεί την εργασία εγκατάστασης, η οποία σε υπάρχουσα εγκατάσταση μπορεί να ξεπερνά το κόστος του υλικού, καθώς και το όφελος από τη μειωμένη συντήρηση λόγω μεγαλύτερης διάρκειας ζωής των φωτιστικών. Οι δύο παράγοντες δρουν σε αντίθετες κατευθύνσεις και δεν αποτιμώνται χωρίς στοιχεία συγκεκριμένης εγκατάστασης. Το χρήσιμο συμπέρασμα είναι ότι ο χρόνος απόσβεσης βρίσκεται σε τάξη μεγέθους ετών και όχι δεκαετιών.

5.10 Σύγκριση με τη βιβλιογραφία

Οι Abdullah κ.ά. [7] αναφέρουν εξοικονόμηση έως 40% ανά μήνα από διατάξεις ανίχνευσης κίνησης. Το 79,8% της παρούσας εργασίας για το υποσύστημα φωτισμού είναι σημαντικά υψηλότερο, και η διαφορά εξηγείται από τρεις παράγοντες. Πρώτον, το επίπεδο αναμονής του 10% είναι χαμηλότερο από όσο συνήθως χρησιμοποιείται. Δεύτερον, η παραδοχή για τον ενεργό χρόνο, τέσσερις από τις δώδεκα ώρες, είναι πιθανώς πιο ευνοϊκή από τη δική τους, την οποία όμως δεν δηλώνουν. Τρίτον, η διαίρεση σε τρεις ανεξάρτητες ζώνες σημαίνει ότι κάθε διέλευση ανεβάζει στο 100% μόνο το ένα τρίτο της εγκατάστασης.

Αν εξισώσουμε το επίπεδο αναμονής στο 30% που χρησιμοποιούν οι Siddiqui κ.ά. [2], η δική μας εξοικονόμηση πέφτει στο 62,2%, τιμή πολύ πιο κοντά στα δημοσιευμένα μεγέθη. Η άσκηση αυτή δείχνει ότι η σύγκριση ποσοστών χωρίς κοινές παραδοχές δεν έχει νόημα, και είναι ακριβώς το σημείο που επισημάνθηκε στο Κεφάλαιο 2.

Το 12,5% που προκύπτει όταν προσμετρηθεί ο έλεγχος είναι πολύ χαμηλότερο από το 40% των Abdullah κ.ά. Δεν είναι όμως σαφές αν συμπεριλαμβάνουν την κατανάλωση των αισθητήρων στον υπολογισμό τους, και η ίδια ασάφεια υπάρχει σχεδόν σε όλες τις εργασίες που εξετάστηκαν.

5.11 Περιορισμοί της μελέτης

Τέσσερις περιορισμοί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάγνωση των αποτελεσμάτων.

Ο πρώτος και σοβαρότερος είναι ότι τα ηλεκτρικά μεγέθη δεν επαληθεύτηκαν συστηματικά. Οι τιμές των Πινάκων 5.1 και 5.2 προκύπτουν από φύλλα δεδομένων και υπολογισμούς, και οι λίγοι έλεγχοι που έγιναν με πολύμετρο κατά την ανάπτυξη δεν καταγράφηκαν με τρόπο που να επιτρέπει σύγκριση. Η αναμενόμενη απόκλιση δεν είναι μεγάλη, επειδή τα κυκλώματα είναι απλά και τα εξαρτήματα λειτουργούν με άνετο περιθώριο, αλλά παραμένει άγνωστη. Δύο πηγές απόκλισης αναμένονται: η πτώση τάσης στα καλώδια και στην τάση κορεσμού των τρανζίστορ, η οποία μειώνει ελαφρώς το πραγματικό ρεύμα, και η ανοχή 5% των αντιστάσεων, η οποία διασπείρει τις τιμές ανά ζώνη. Η πιο αβέβαιη τιμή είναι η κατανάλωση των αισθητήρων, η οποία εξαρτάται από τον ρυθμό εκπομπής και επομένως από τον χρόνο του βρόχου. Η μέτρηση του ρεύματος στις τέσσερις καταστάσεις του Πίνακα 5.1, με πολύμετρο σε σειρά στη γραμμή των 5 V, είναι η πρώτη εργασία που θα έπρεπε να γίνει σε συνέχεια της παρούσας.

Ο δεύτερος αφορά την κλίμακα, και εξηγεί την απόσταση ανάμεσα στα δύο ποσοστά της ενότητας 5.5. Στη μακέτα οι δώδεκα λαμπτήρες τραβούν 8,9 mA σε αναμονή ενώ ο έλεγχος τραβάει 59 mA. Σε πραγματική εγκατάσταση με φωτιστικά των 60 W ο λόγος αντιστρέφεται κατά τρεις τάξεις μεγέθους, και το συνολικό ποσοστό εξοικονόμησης πρακτικά ταυτίζεται με αυτό του υποσυστήματος φωτισμού. Το ποσοστό του υποσυστήματος φωτισμού είναι επομένως η τιμή που μεταφέρεται σε πραγματική κλίμακα, ενώ το συνολικό χαρακτηρίζει τη μακέτα και μόνο.

Ο τρίτος αφορά τις συνθήκες. Ο λειτουργικός έλεγχος έγινε σε εσωτερικό χώρο, με σταθερή θερμοκρασία και χωρίς βροχή, ομίχλη, σκόνη ή ρεύματα αέρα. Η ταχύτητα του ήχου μεταβάλλεται περίπου 0,17% ανά βαθμό Κελσίου, οπότε σε εξωτερικές συνθήκες το παράθυρο ανίχνευσης θα μετατοπιζόταν αισθητά μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού.

Ο τέταρτος αφορά τις παραδοχές του σεναρίου. Ο ενεργός χρόνος των τεσσάρων ωρών είναι εκτίμηση και όχι μέτρηση. Σε πραγματικό δρόμο θα προέκυπτε από καταγραφή κυκλοφορίας, και το ποσοστό θα

άλλαζε αναλόγως. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει ολόκληρη την καμπύλη αντί για μία μόνο τιμή.

5.12 Επίλογος

Ο λειτουργικός έλεγχος επιβεβαίωσε ότι η αλυσίδα ανίχνευσης, απόφασης και οδήγησης λειτουργεί όπως σχεδιάστηκε για τις τρεις ανεξάρτητες ζώνες. Ο υπολογισμός έδωσε αναμενόμενη εξοικονόμηση 79,8% στο υποσύστημα φωτισμού για το σενάριο των τεσσάρων ωρών ενεργού χρόνου, ποσοστό που πέφτει στο 12,5% όταν προσμετρηθεί ο έλεγχος και γίνεται αρνητικό σε βάση εικοσιτετραώρου, επειδή η τρέχουσα έκδοση του κώδικα δεν διακρίνει ημέρα από νύχτα. Παράλληλα αναδείχθηκαν δύο ζητήματα: η κατανάλωση των αισθητήρων σε σχέση με το μέγεθος του φορτίου στη συγκεκριμένη κλίμακα, και η εξάρτηση του ποσοστού από παραδοχές που σπάνια δηλώνονται. Και τα δύο επανέρχονται στα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Η εργασία έδειξε ότι ένα σύστημα προσαρμοστικού οδικού φωτισμού μπορεί να υλοποιηθεί με τυπικά, ευρέως διαθέσιμα εξαρτήματα και να μειώσει την ενέργεια του φωτισμού κατά 79,8% σε σενάριο δρόμου με μέτρια νυχτερινή κίνηση. Το ίδιο σύστημα, στην κλίμακα της μακέτας και με προσμετρημένη την κατανάλωση των αισθητήρων, πετυχαίνει μόλις 12,5%. Η απόσταση ανάμεσα στους δύο αριθμούς είναι από τα πιο διδακτικά αποτελέσματα της εργασίας. Τα επιμέρους συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα.

Η απουσία κριτηρίου ημέρας και νύχτας αποδείχθηκε πιο κοστοβόρα από όσο φαινόταν αρχικά. Το σύστημα ανιχνεύει και ρυθμίζει σωστά, αλλά επειδή δεν ξέρει πότε χρειάζεται καθόλου φως, το εικοσιτετράωρο ισοζύγιό του είναι χειρότερο από εκείνο ενός συμβατικού δικτύου με απλό φωτοκύτταρο. Το φθηνότερο εξάρτημα ολόκληρης της λίστας υλικών θα ήταν και το πιο αποδοτικό.

Η συστοιχία τριών ομοειδών αισθητήρων υπερήχων λειτουργεί, με την προϋπόθεση ότι διαβάζονται σειριακά. Η ακουστική διαφωνία ήταν το πιο δύσκολο πρόβλημα της υλοποίησης, ακριβώς επειδή κάθε αισθητήρας δοκιμασμένος μόνος του λειτουργούσε άψογα και το σφάλμα εμφανιζόταν μόνο στο σύνολο. Η ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας, δηλαδή η καταγραφή ποσοστού επιτυχούς ανίχνευσης σε μεγάλο αριθμό διελεύσεων, δεν έγινε και παραμένει η πρώτη εκκρεμότητα.

Ο έλεγχος έντασης με PWM μέσω τρανζίστορ λειτουργεί χωρίς επιπλοκές και επιτρέπει ομαλές μεταβάσεις. Η ομαλή μετάβαση, την οποία δεν είχα σχεδιάσει αρχικά, αποδείχθηκε ουσιώδης για το οπτικό αποτέλεσμα και θα ήταν απαραίτητη σε πραγματική εγκατάσταση για λόγους οδικής ασφάλειας.

Η εξοικονόμηση δεν είναι σταθερό μέγεθος αλλά συνάρτηση δύο παραμέτρων: του προφίλ κυκλοφορίας και της κλίμακας της εγκατάστασης. Το συμπέρασμα αυτό, το οποίο η βιβλιογραφία τείνει να παρακάμπτει παρουσιάζοντας μεμονωμένα ποσοστά χωρίς τις παραδοχές τους, είναι κατά τη γνώμη μου η σημαντικότερη συνεισφορά της εργασίας. Ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού αποδίδει σε δρόμους που είναι πράγματι άδειοι τη νύχτα, δεν αποδίδει σχεδόν καθόλου σε κεντρικές αρτηρίες, και σε πολύ μικρά φορτία μπορεί να καταναλώνει περισσότερο από όσο εξοικονομεί.

Η αυτόνομη τροφοδοσία με φωτοβολταϊκό δεν υλοποιήθηκε. Από την ανασκόπηση του Κεφαλαίου 2 και από το μέγεθος της κατανάλωσης του συστήματος προκύπτει ότι είναι τεχνικά εφικτή, αλλά το ενεργειακό ισοζύγιο πρέπει να υπολογιστεί με περιθώριο για διαδοχικές συννεφιασμένες ημέρες πριν επιλεγεί μέγεθος πλαισίου και συσσωρευτή.

6.2 Τι θα έκανα διαφορετικά

Τρία σημεία θα άλλαζα αν ξεκινούσα ξανά.

Το πρώτο και σημαντικότερο είναι η προσθήκη κριτηρίου ημέρας και νύχτας. Απαιτεί μία φωτοαντίσταση, μία αντίσταση 10 kΩ και μία αναλογική είσοδο, δηλαδή κόστος κάτω του ενός ευρώ, και είναι υπεύθυνη για ολόκληρο το αρνητικό ισοζύγιο εικοσιτετράωρου της ενότητας 5.5. Ο κώδικας του Παραρτήματος Β δείχνει την τροποποίηση, με υστέρηση στο κατώφλι ώστε να μην ταλαντώνεται το σύστημα στις μεταβατικές ώρες.

Το δεύτερο είναι το φιλτράρισμα των μετρήσεων. Η έκδοση του Παραρτήματος Α δέχεται κάθε μεμονωμένη μέτρηση ως έγκυρη, οπότε μια στιγμιαία ανάκλαση αρκεί για να ανάψει μια ζώνη. Η λήψη

τριών μετρήσεων και η επιλογή της μεσαίας, όπως στο Παράρτημα Β, κοστίζει ελάχιστο χρόνο και απορρίπτει τις μεμονωμένες ακραίες τιμές.

Το τρίτο είναι η επιλογή του μικροελεγκτή. Το Arduino Uno ήταν η ασφαλής επιλογή, αλλά ένας ESP32 θα έδινε ενσωματωμένο Wi-Fi, περισσότερες ακίδες PWM με ρυθμιζόμενη ανάλυση, και ταχύτερο επεξεργαστή, με κόστος τη μετατροπή στάθμης για τους αισθητήρες των 5 V. Δεδομένου ότι η δικτύωση εμφανίζεται σε όλες τις προτάσεις επέκτασης, η επιλογή αυτή θα άξιζε τον πρόσθετο κόπο.

6.3 Από τη μακέτα στο πραγματικό οδικό δίκτυο

Οι επιλογές υλικού που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3 υπαγορεύτηκαν από το γεγονός ότι το αντικείμενο της εργασίας είναι μια μακέτα εργαστηριακής κλίμακας, με προϋπολογισμό λίγων δεκάδων ευρώ και απαίτηση να λειτουργεί πάνω σε ένα τραπέζι. Καμία από αυτές δεν θα ήταν η σωστή επιλογή σε πραγματικό δρόμο, και αξίζει να καταγραφεί τι θα άλλαζε.

Η ανίχνευση δεν θα γινόταν με υπερήχους. Ο HC-SR04 είναι φθηνός και ακριβής σε αποστάσεις εκατοστών, αλλά η εμβέλειά του δεν καλύπτει το πλάτος πραγματικής λωρίδας με αξιοπιστία, η μέτρησή του μετατοπίζεται με τη θερμοκρασία, και η μονάδα δεν έχει καμία στεγανότητα. Σε πραγματική εγκατάσταση θα χρησιμοποιούνταν είτε αισθητήρας ραντάρ μικροκυμάτων, ο οποίος δουλεύει μέσα από πλαστικό περίβλημα και δεν επηρεάζεται από βροχή ή ομίχλη, είτε επαγωγικός βρόχος ή πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ενσωματωμένα στο οδόστρωμα, όπως προτείνουν οι Balachandran κ.ά. [6]. Η τελευταία λύση έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι διακρίνει πολλαπλά οχήματα και μετράει την ταχύτητά τους.

Η οδήγηση των φωτιστικών δεν θα γινόταν με τρανζίστορ διπολικής επαφής. Ένα φωτιστικό οδού των 60 W τραβάει ρεύμα τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από μια ζώνη της μακέτας, οπότε θα απαιτούνταν MOSFET ισχύος ή, στην πράξη, εμπορικός οδηγός LED με είσοδο ελέγχου. Τα σύγχρονα φωτιστικά δρόμου διαθέτουν ήδη τέτοια είσοδο, συνήθως κατά το πρότυπο DALI ή ως αναλογική είσοδος 0-10 V, οπότε ο μικροελεγκτής δεν θα οδηγούσε καθόλου το φορτίο αλλά θα έστελνε μια εντολή στάθμης.

Η τροφοδοσία θα ήταν το σημείο με τη μεγαλύτερη διαφορά. Στη μακέτα το σύστημα παίρνει ρεύμα από πρίζα μέσω τροφοδοτικού τοίχου. Σε πραγματικό ιστό, και ιδίως σε περιφερειακό ή αγροτικό δρόμο όπου η επέκταση του δικτύου διανομής κοστίζει περισσότερο από το ίδιο το φωτιστικό, η ενδεδειγμένη λύση είναι αυτόνομη μονάδα με φωτοβολταϊκό πλαίσιο στην κορυφή του ιστού, συσσωρευτή και ελεγκτή φόρτισης, όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.9 και υλοποιούν αρκετές από τις εργασίες που εξετάστηκαν [5], [8], [9], [11]. Η διαστασιολόγηση θα προέκυπτε από το ενεργειακό ισοζύγιο της χειρότερης εποχής, με περιθώριο για διαδοχικές συνεφασμένες ημέρες, και ο ελεγκτής φόρτισης θα ήταν τύπου MPPT ώστε να αξιοποιείται και ο χαμηλός χειμερινός ήλιος.

Το περίβλημα θα έπρεπε να έχει βαθμό στεγανότητας τουλάχιστον IP65 και το ηλεκτρονικό να λειτουργεί από τους μείον δέκα έως τους συν σαράντα βαθμούς, απαιτήσεις που ένα χαρτονένιο κιβώτιο με ακάλυπτα breadboards προφανώς δεν καλύπτει. Θα προστίθεντο επίσης προστασία από υπερτάσεις, δεδομένου ότι οι ιστοί φωτισμού είναι εκτεθειμένοι σε κεραυνικά πλήγματα.

Τέλος, θα υπήρχε δικτύωση. Ένας μεμονωμένος ιστός που αντιδρά μόνος του είναι η απλούστερη μορφή του συστήματος. Σε πραγματικό δίκτυο, η ανίχνευση στον ιστό πέντε προαναγγέλλει την άφιξη του οχήματος στον ιστό έξι, και ο συντονισμός αυτός επιτρέπει στο φως να προηγείται του οχήματος αντί να το ακολουθεί.

Η καταγραφή αυτή δεν αναιρεί την αξία της μακέτας. Η λογική ελέγχου, δηλαδή το τι αποφασίζει το σύστημα και πότε, είναι ακριβώς η ίδια και στις δύο κλίμακες, και αυτή είναι που μελετήθηκε εδώ. Αλλάζουν τα εξαρτήματα που την υλοποιούν, όχι η αρχή.

6.4 Προτάσεις επέκτασης

Η προφανέστερη επέκταση είναι η ασύρματη δικτύωση. Με μονάδα Wi-Fi ή πρωτόκολλο χαμηλής ισχύος όπως το ZigBee, κάθε ιστός γίνεται κόμβος που στέλνει την κατάστασή του σε κεντρικό σύστημα. Το άμεσο όφελος δεν είναι η παρακολούθηση της κατανάλωσης αλλά η ανίχνευση βλαβών: ένας λαμπτήρας που έχει καεί αναφέρεται αυτόματα, αντί να περιμένει καταγγελία κατοίκου [10].

Δεύτερη κατεύθυνση είναι η προσαρμογή της έντασης στην ταχύτητα του διερχόμενου αντικειμένου, όπως προτείνουν οι Abdullah κ.ά. [7]. Ένας πεζός δεν χρειάζεται τον ίδιο φωτισμό με ένα αυτοκίνητο που κινείται με 60 χιλιόμετρα την ώρα. Η υλοποίηση απαιτεί δύο αισθητήρες σε γνωστή απόσταση ανά ζώνη, ώστε η ταχύτητα να προκύπτει από τη διαφορά των χρόνων ανίχνευσης.

Τρίτη κατεύθυνση, και η πιο άμεση, είναι η οργανοποιημένη μέτρηση των ηλεκτρικών μεγεθών με πολύμετρο και η συστηματική καταγραφή ποσοστού επιτυχούς ανίχνευσης σε μεγάλο αριθμό διελεύσεων, ώστε οι υπολογιστικές τιμές του Κεφαλαίου 5 να επαληθευτούν ή να διορθωθούν. Ακολουθεί η υλοποίηση της αυτόνομης λειτουργίας, με κατάλληλα διαστασιολογημένο πλαίσιο, ελεγκτή φόρτισης MPPT και δοκιμή διάρκειας αρκετών ημερών. Ο μηχανισμός παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου [10] θα αύξανε την παραγωγή, με το ερώτημα αν τα κινούμενα μέρη δικαιολογούνται σε μια εγκατάσταση που πρέπει να λειτουργεί χωρίς συντήρηση.

Τέταρτη κατεύθυνση είναι η κλιμάκωση σε πραγματικά επίπεδα ισχύος. Τα φωτιστικά των δεκάδων watt απαιτούν αντικατάσταση των τρανζίστορ διπολικής επαφής με MOSFET και προσοχή στη διαχείριση της θερμότητας, αλλά η λογική ελέγχου παραμένει η ίδια.

Πέμπτη και πιο φιλόδοξη κατεύθυνση είναι η πρόβλεψη αντί της αντίδρασης. Ένα σύστημα που καταγράφει το προφίλ κυκλοφορίας για μερικές εβδομάδες μπορεί να προβλέψει τις ώρες αιχμής και να προσαρμόσει προληπτικά το επίπεδο αναμονής, ανεβάζοντάς το σε ώρες με πυκνή κίνηση όπου η συνεχής εναλλαγή δεν έχει νόημα, και κατεβάζοντάς το πιο χαμηλά τις πραγματικά νεκρές ώρες.

6.5 Ευρύτερη σημασία

Το συμπέρασμα που θεωρώ ότι έχει την ευρύτερη σημασία δεν είναι τεχνικό. Είναι ότι η αξία ενός συστήματος προσαρμοστικού φωτισμού δεν προκύπτει από την τεχνολογία του αλλά από το πού εγκαθίσταται. Η ίδια ακριβώς διάταξη μπορεί να αποσβεστεί σε δύο χρόνια σε έναν αγροτικό δρόμο και να μην αποσβεστεί ποτέ σε μια κεντρική λεωφόρο. Οι δώδεκα εργασίες που εξέτασα αναφέρουν ποσοστά εξοικονόμησης χωρίς να δηλώνουν τις παραδοχές κυκλοφορίας, και το αποτέλεσμα είναι ότι τα νούμερά τους δεν συγκρίνονται μεταξύ τους.

Για κάποιον δήμο που εξετάζει τέτοια επένδυση, η πρώτη ενέργεια δεν θα έπρεπε να είναι η επιλογή προμηθευτή αλλά η καταγραφή της νυχτερινής κυκλοφορίας στους δρόμους που τον ενδιαφέρουν. Το ερώτημα «πόσο άδειος είναι αυτός ο δρόμος στις τρεις τα ξημερώματα» καθορίζει την απόδοση της επένδυσης περισσότερο από κάθε τεχνικό χαρακτηριστικό του συστήματος.

6.6 Συμβολή της εργασίας

Η εργασία συνεισφέρει σε τρία σημεία. Παρουσιάζει πλήρη ηλεκτρική διαστασιολόγηση με τους υπολογισμούς εκτεθειμένους, ώστε να μπορούν να επαληθευτούν ή να προσαρμοστούν. Τεκμηριώνει

τα προβλήματα υλοποίησης που εμφανίστηκαν και τις λύσεις τους, πληροφορία που λείπει από τις περισσότερες δημοσιεύσεις του τομέα και που κοστίζει χρόνο σε όποιον την ανακαλύπτει μόνος του. Και παρουσιάζει την εξοικονόμηση ως καμπύλη με δηλωμένες παραδοχές, σε δύο επίπεδα ανάλυσης, αντί για μία βολική τιμή, δείχνοντας ότι το ίδιο σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί με 64,2% ή με 22,4% ανάλογα με το τι ακριβώς μετριέται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] V. Prakash, D. Pavithra, R. Nisha και P. Nishanthini, «Automatic street light intensity control», International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, τόμ. 6, τχ. 2, 2020.
- [2] A. S. Siddiqui, S. Geelani, A. A. Khan, S. M. Shafi και M. Sarwar, «Smart Street Lighting System Based on Detecting Vehicle Movement», στο 2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics & Digital Healthcare Technologies (REEDCON), 2023.
- [3] «Arduino Based Smart Street Light System», τεχνική αναφορά έργου, 2024.
- [4] M. Saad, A. Farij, A. Salah και A. Abdaljalil, «Automatic Street Light Control System Using Microcontroller», στο Mathematical Methods and Optimization Techniques in Engineering, College of Electronic Technology, Baniwalid, Λιβύη.
- [5] A. Mukhtar και R. Kumar, «Advance Solar Power LED Street Lighting With Auto Intensity Control», Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, τόμ. 7, τχ. 5, 2020.
- [6] A. Balachandran, M. Siva, V. Parthasarathi, Surya και S. K. Vasudevan, «An Innovation in the Field of Street Lighting System with Cost and Energy Efficiency», Indian Journal of Science and Technology, τόμ. 8, τχ. 17, 2015.
- [7] A. Abdullah, S. H. Yusoff, S. A. Zaini, N. S. Midi και S. Y. Mohamad, «Energy efficient smart street light for smart city using sensors and controller», Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, τόμ. 8, τχ. 2, σσ. 558–568, 2019.
- [8] N. E. Kuamthab και F. Mustafa, «Development of Solar Powered LED Street Lighting with Auto Intensity Control», Progress in Engineering Application and Technology, τόμ. 2, τχ. 2, σσ. 576–589, 2021.
- [9] G. V. R. Kumar, S. C. Sekhar και K. V. Subramanyam, «Design and Implementation of Automatic Street Light Control Using Sensors and Solar Panel», International Journal of Recent Trends in VLSI, Embedded Systems and Signal Processing, τόμ. 2, τχ. 2, 2016.
- [10] K. Nanavati, H. Prajapati, H. Pandav, K. Umari και N. Desai, «Smart Autonomous Street Light Control System», International Journal of Science Technology & Engineering, τόμ. 2, τχ. 10, 2016.
- [11] F. I. Rahman, F. Z. Mawya και F. Tashfia, «Smart Street Light by Using Solar System and Grid Connection», Capstone Project, American International University-Bangladesh, 2022.
- [12] S. Gurav κ.ά., «Movement Sensing Street Lighting», MCT's Rajiv Gandhi Institute of Technology, Mumbai.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΗΓΑΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ο κώδικας που ακολουθεί είναι αυτός που εκτελείται στη μακέτα και υλοποιεί τη λογική ελέγχου των τριών ζωνών, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Οι παράμετροι που ενδέχεται να χρειαστούν βαθμονόμηση είναι συγκεντρωμένες στην αρχή του αρχείου.

```
// =====  
// SmartStreet - ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ  
// 3 ανεξάρτητες ζώνες με σταδιακό σβήσιμο  
//  
// Median φίλτρο + ανοχή σε χαμένες μετρήσεις,  
// ώστε ακίνητο αντικείμενο να κρατάει τη ζώνη  
// σταθερά αναμμένη.  
// =====
```

```
// ----- HC-SR04 -----  
const int trig1 = 2;  
const int echo1 = 3;
```

```
const int trig2 = 4;  
const int echo2 = 5;
```

```
const int trig3 = 6;  
const int echo3 = 7;
```

```
// ----- Βάσεις 2N2222 -----  
const int pwm1 = 9;  
const int pwm2 = 10;  
const int pwm3 = 11;
```

```
// ----- Επίπεδα φωτισμού -----  
const int dimLevel = 26;    // ~10%  
const int highLevel = 255;  // 100%
```

```
// ----- Όρια ανίχνευσης -----  
const int minDistance = 4;  
const int maxDistance = 10;
```

```
// ----- Χρονισμοί -----  
const unsigned long keepOnTime = 5000;  
const unsigned long fadeTime = 2000;
```

```
unsigned long lastTime1 = 0;  
unsigned long lastTime2 = 0;  
unsigned long lastTime3 = 0;
```

```
int level1 = dimLevel;  
int level2 = dimLevel;  
int level3 = dimLevel;
```

```
void setup() {
```

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

```
    pinMode(trig1, OUTPUT);  
    pinMode(echo1, INPUT);
```

```
    pinMode(trig2, OUTPUT);  
    pinMode(echo2, INPUT);
```

```
    pinMode(trig3, OUTPUT);  
    pinMode(echo3, INPUT);
```

```
    pinMode(pwm1, OUTPUT);  
    pinMode(pwm2, OUTPUT);  
    pinMode(pwm3, OUTPUT);
```

```

digitalWrite(trig1, LOW);
digitalWrite(trig2, LOW);
digitalWrite(trig3, LOW);

analogWrite(pwm1, dimLevel);
analogWrite(pwm2, dimLevel);
analogWrite(pwm3, dimLevel);

pinMode(13, OUTPUT);
digitalWrite(13, LOW);

delay(500);

Serial.println("SmartStreet - stable mode");
}

void loop() {

    unsigned long currentTime = millis();

    int dist1 = getDistance(trig1, echo1);
    delay(40);

    int dist2 = getDistance(trig2, echo2);
    delay(40);

    int dist3 = getDistance(trig3, echo3);

    level1 = updateZone(dist1, pwm1, lastTime1, currentTime);
    level2 = updateZone(dist2, pwm2, lastTime2, currentTime);
    level3 = updateZone(dist3, pwm3, lastTime3, currentTime);

    printZone("Z1", dist1, level1);
    Serial.print(" | ");

    printZone("Z2", dist2, level2);
    Serial.print(" | ");

    printZone("Z3", dist3, level3);
    Serial.println();

    delay(20);
}

// =====
// Έλεγχος μίας ζώνης
// =====

int updateZone(int distance, int pin,
               unsigned long &lastTime,
               unsigned long currentTime) {

    int level;

    bool detected = (distance >= minDistance && distance <= maxDistance);

    if (detected) {

        lastTime = currentTime;
        level = highLevel;

    } else {

        unsigned long elapsed = currentTime - lastTime;

```

```

    if (lastTime == 0) {
        level = dimLevel;
    }
    else if (elapsed < keepOnTime) {
        level = highLevel;
    }
    else if (elapsed < keepOnTime + fadeTime) {

        unsigned long into = elapsed - keepOnTime;
        long drop = (long)(highLevel - dimLevel) * into / fadeTime;
        level = highLevel - drop;

    }
    else {
        level = dimLevel;
    }
}

analogWrite(pin, level);

return level;
}

// =====
// Εκτύπωση μίας ζώνης
// =====

void printZone(const char* label, int distance, int level) {

    Serial.print(label);
    Serial.print(": ");

    if (distance == 999) {
        Serial.print("---");
    } else {
        Serial.print(distance);
        Serial.print("cm");
    }

    Serial.print(" [");
    Serial.print(map(level, 0, 255, 0, 100));
    Serial.print("%]");
}

// =====
// Μέτρηση απόστασης με median
//
// Παίρνει 3 δείγματα και κρατάει το μεσαίο.
// Έτσι μια μεμονωμένη λάθος μέτρηση, είτε από
// θόρυβο είτε από την ηχώ άλλου αισθητήρα,
// απορρίπτεται αυτόματα.
// =====

int getDistance(int trig, int echo) {

    const int samples = 3;

    int readings[samples];
    int valid = 0;

    for (int i = 0; i < samples; i++) {

        digitalWrite(trig, LOW);
        delayMicroseconds(3);

        digitalWrite(trig, HIGH);
        delayMicroseconds(10);

```

```

digitalWrite(trig, LOW);

unsigned long duration = pulseIn(echo, HIGH, 20000);

if (duration > 0) {

    int d = duration * 0.0343 / 2;

    if (d >= 2 && d <= 400) {
        readings[valid] = d;
        valid++;
    }

    delay(10);
}

if (valid == 0) {
    return 999;
}

// Ταξινόμηση
for (int i = 0; i < valid - 1; i++) {
    for (int j = i + 1; j < valid; j++) {
        if (readings[j] < readings[i]) {
            int temp = readings[i];
            readings[i] = readings[j];
            readings[j] = temp;
        }
    }
}

return readings[valid / 2];
}

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

Οι δύο προσθήκες που ακολουθούν αντιστοιχούν στις ελλείψεις που εντοπίστηκαν στα Κεφάλαια 5 και 6: το φίλτρο median στη μέτρηση απόστασης, και τη διάκριση ημέρας και νύχτας με φωτοαντίσταση, η οποία απαιτεί εξαρτήματα που δεν υπάρχουν στην τρέχουσα κατασκευή. Δεν έχουν δοκιμαστεί στη μακέτα και παρατίθενται ως πρόταση.

```
// =====
// SmartStreet - Προτεινόμενη επέκταση
// Διάκριση ημέρας και νύχτας με φωτοαντίσταση
//
// Απαιτεί δύο εξαρτήματα που δεν υπάρχουν στην τρέχουσα
// κατασκευή: μία φωτοαντίσταση και μία αντίσταση 10 kΩ,
// συνδεδεμένες ως διαιρέτης τάσης προς την ακίδα Α0.
// Δεν έχει δοκιμαστεί στη μακέτα.
// =====

const int ldrPin    = A0;

// Δύο κατώφλια αντί για ένα: υλοποιούν υστέρηση, ώστε το
// σύστημα να μην ταλαντώνεται όταν ο φωτισμός βρίσκεται
// ακριβώς στο όριο μεταξύ ημέρας και νύχτας.
const int LDR_NIGHT = 400;  // κάτω από αυτό -> νύχτα
const int LDR_DAY   = 500;  // πάνω από αυτό -> ημέρα

bool isNight = false;

bool readAmbient() {

    int v = analogRead(ldrPin);

    if (!isNight && v < LDR_NIGHT) isNight = true;
    if ( isNight && v > LDR_DAY)   isNight = false;

    return isNight;
}

// Η προσθήκη στη loop, αμέσως μετά το currentTime:
//
//   if (!readAmbient()) {
//
//       analogWrite(pwm1, 0);
//       analogWrite(pwm2, 0);
//       analogWrite(pwm3, 0);
//
//       level1 = level2 = level3 = 0;
//
//       delay(1000);  // αραγή δειγματοληψία κατά την ημέρα
//       return;      // οι αισθητήρες δεν ενεργοποιούνται καθόλου
//   }
//
// Η πρόωγη επιστροφή μηδενίζει και τις δύο συνιστώσες της
// ημερήσιας κατανάλωσης: το ρεύμα των λαμπτήρων και τις
// εκπομπές των αισθητήρων υπερήχων. Ο κώδικας του
// Παραρτήματος Α τις διατηρεί και τις δύο επί εικοσιτετράωρο,
// γεγονός που ευθύνεται για ολόκληρο το αρνητικό ισοζύγιο
// της ενότητας 5.5.
```