

Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών
και Βιώσιμου Σχεδιασμού
ΠΜΣ Σχεδιασμός Φωτισμού

Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση συστημάτων ελέγχου φωτισμού

Κόκκος Θεόδωρος
Α.Μ.: 152097

Επιβλέπων καθηγητής Ά Κονταξής Παναγιώτης
Επιβλέπων καθηγητής Β Τσαγκρασούλης Αριστείδης

Τρίπολη Ιούνιος 2026



Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κόκκου Θεόδωρου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Περίληψη

Η αξιολόγηση συστημάτων ελέγχου φωτισμού αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, της εργονομίας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των σύγχρονων κτιρίων. Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται με σκοπό την διερεύνηση της απόδοσης, της λειτουργικότητας και της συμβατότητας των συστημάτων αυτών με τις πραγματικές ανάγκες των χρηστών όπως επίσης και τις μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού του χώρου. Κατόπιν, η έρευνα αναφέρεται στην διαδικασία της αξιολόγησης η οποία περιλαμβάνει αφενός μεν τη συλλογή και ανάλυση ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων, όπως η κατανάλωση ενέργειας, τα επίπεδα έντασης φωτισμού, αφετέρου δε το πόσο αξιόπιστοι είναι οι αισθητήρες-αυτοματισμοί παλαιού τύπου εν αντιθέσει με τα νέα συστήματα ελέγχου του τεχνητού φωτισμού.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, όπως αισθητήρες παρουσίας, DALI, KNX, Zigbee, Z-Wave, IoT. Μέσω της συστηματικής αξιολόγησης, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων που καθοδηγούν τον σχεδιασμό πιο αποδοτικών, έξυπνων και βιώσιμων λύσεων φωτισμού, ενισχύοντας την ενεργειακή εξοικονόμηση, την άνεση και την βέλτιστη λειτουργικότητα των φωτιστικών.

Λέξεις κλειδιά: Συστήματα ελέγχου φωτισμού, Ενεργειακή αποδοτικότητα, Αισθητήρες φωτισμού, Αυτοματισμοί, Βιώσιμη ανάπτυξη.



Summary

The evaluation of lighting control systems is a critical factor in improving the energy efficiency, ergonomics and environmental sustainability of modern buildings. The preparation of this thesis is carried out with the aim of investigating the performance, functionality and compatibility of these systems with the real needs of users as well as the changing lighting conditions of the space. Then, the research refers to the evaluation process, which includes, on the one hand, the collection and analysis of quantitative and qualitative data, such as energy consumption, brightness levels, and on the other hand, how reliable the sensors-old style automations as oppose to the new artificial lighting control systems.

Particular emphasis is placed on the use of advanced technologies, such as presence sensors, DALI, KNX, Zigbee, Z-Wave, IoT. Through systematic evaluation, it is possible to draw conclusions that guide the design of more efficient, smart and sustainable lighting solutions, enhancing energy savings, comfort and optimal functionality of the luminaires.

Keywords: Lighting control systems, Energy efficiency, Photosensors, Automation, Sustainable development.



Περιεχόμενα

Κατάλογος εικόνων	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	10
1.1 Σκοπός και αντικείμενο	10
1.2 Δομή εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογική εξέλιξη των συστημάτων φωτισμού	12
2.1 Παραδοσιακά συστήματα ελέγχου	12
2.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των παραδοσιακών συστημάτων.....	12
2.1.2 Έλεγχος τεχνητού φωτισμού μέσω κονσόλας DMX	16
2.1.3 Έλεγχος τεχνητού φωτισμού με χρήση προγραμματιζόμενης λογικής.....	24
2.2 Συστήματα με αισθητήρες.....	30
2.2.1 Αισθητήρες PIR (Passive Infrared Sensors)	31
2.2.2 Φωτοαισθητήρες (Photo Sensors / Light Sensors)	32
2.2.3 Μικροκυματικοί αισθητήρες (Microwave Sensors)	33
2.2.4 Υπερηχητικοί αισθητήρες (Ultrasonic Sensors).....	34
2.3 Σύγχρονα έξυπνα και δικτυωμένα συστήματα	36
2.3.1 Έλεγχος φωτισμού με σύστημα Dali	37
2.3.2 Έλεγχος φωτισμού με Zigbee και Z wave	44
2.3.3 Έλεγχος φωτισμού με KNX	46
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση εφαρμογών	48
3.1 Εφαρμογές πρωτοκόλλων knx zigbee dali.....	48
3.1.1 Εφαρμογή πρωτοκόλλου KNX.....	48
3.1.2 Εφαρμογή πρωτοκόλλου ZigBee.....	54
3.1.3 Εφαρμογή πρωτοκόλλου Dali.....	56
3.2 Ερευνητικά έργα και πειραματικές εγκαταστάσεις	61
3.2.1 Πειραματικές έρευνες	62
3.2.2 Μετρήσεις απόδοσης αισθητήρων και αξιολόγηση συστημάτων	64
3.3 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων	68
Κεφάλαιο 4: Πολυκριτήρια ανάλυση	69
4.1 Εισαγωγή	69
4.1.1 Βασικές μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης.....	70
4.2 Κριτήρια αξιολόγησης συστημάτων	74
4.3 Μεθοδολογία επιλογής βέλτιστης λύσης	75

Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή, αποτελέσματα και οικονομοτεχνική αξιολόγηση.....	78
5.1 Επιλογή συστήματος για μελέτη περίπτωσης	78
5.2 Υπολογισμοί, προσομοιώσεις και αξιολόγηση	79
5.2.1 Τοποθέτηση φωτιστικών σε χώρο γραφείου με βάση πρωτοκόλλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης.....	81
5.2.2 Τοποθέτηση φωτιστικών σε χώρο κουζίνας με βάση πρωτοκόλλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης.....	89
5.2.3 Τοποθέτηση φωτιστικών σε χώρο υποδοχής με βάση πρωτοκόλλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης.....	91
5.2.4 Τοποθέτηση φωτιστικών στο WC με βάση πρωτοκόλλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης	93
5.2.5 Εφαρμογή λογισμικού visual Promethee	94
5.2.6 Μελέτη φωτισμού για τον χώρο γραφείου μέσω της εφαρμογής visual Promethee	97
5.2.7 Ανάλυση ευαισθησίας της εφαρμογής visual Promethee.....	108
5.3 Οικονομοτεχνική ανάλυση	111
5.3.1 Κόστος φωτισμού ανά lumen hour.....	116
5.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων	116
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	118
6.1 Συμπεράσματα.....	118
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	120
Βιβλιογραφία	121

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κύκλωμα φωτισμού στο ΕΠΑΛ Αίγινας την σχολική χρονιά 2022-2023.	13
Εικόνα 2 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Συνδεσμολογίες διαφορετικών ειδών λαμπτήρων στο ΕΠΑΛ Αίγινας την σχολική χρονιά 2022-2023.	14
Εικόνα 3 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Εφαρμογή φωτισμού μέσω προγράμματος Relux.	15
Εικόνα 4 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Ξενοδοχείο Αλεξάνδρα στο νησί της Κω.	16
Εικόνα 5 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Πρωτογενή και δευτερεύοντα χρώματα	21
Εικόνα 6 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Ψυχρός φωτισμός δέντρου με χρήση κονσόλας DMX.	22
Εικόνα 7 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κονσόλα φωτισμού DMX 12 καναλιών.	23
Εικόνα 8 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου.	23
Εικόνα 9 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός δέντρου με χρήση plc σε συνδυασμό κονσόλα dmx.	24
Εικόνα 10 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Μοντέλο TM221C16U 24V dc.	26
Εικόνα 11 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Εγκατάσταση μονάδας plc με εισόδους και τροφοδοσία από ανορθωτή Εσπερινό ΕΠΑΛ Κω σχολική χρονιά 2024-2025... 27	27
Εικόνα 12 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κόκκινη σηματοδότηση.	28
Εικόνα 13 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Πράσινη σηματοδότηση.	29
Εικόνα 14 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κίτρινη σηματοδότηση.	29
Εικόνα 15 Αισθητήρας Passive Infrared Sensor. Εταιρία RS PRO Internal security alarm & sensors.	31
Εικόνα 16 Photo sensor. Εταιρία TE connectivity μοντέλο ALR 11000 ZHAGA DIGITAL PHOTOCCELL	32
Εικόνα 17 Αισθητήρας microwave Εταιρία RS Pro μοντέλο MWS3A Microwave Ceiling Microwave Detector,	33
Εικόνα 18 Σύστημα αισθητήρων Microwave, PIR και Light sensor. Πηγή Design and Application of a Smart Lighting System Based on Distributed Wireless Sensor Networks	34
Εικόνα 19 Αισθητήρας ultrasonic Εταιρεία Rs pro. Μοντέλο ultrasonic proximity sensor.	35
Εικόνα 20 Σύστημα Ελέγχου με Dali. Πηγή The ABC's of DALI A Guide to Digital Addressable Lighting Interface επιστημονικό άρθρο.	38
Εικόνα 21 Πλήρες σύστημα ελέγχου με Dali. Πηγή https://www.instagram.com/p/CD36etvHog6/	39
Εικόνα 22 Dali Ballast 200,350,700 mA. Πηγή https://www.ledclusive.de/en/dali-ballast-with-12v-48v-input-for-constant-current-174	40
Εικόνα 23 Σύστημα ελέγχου φωτισμού με Zigbee. Πηγή https://www.e-shop.gr/coolseer-zigbee-circuit-breaker-col-wb03zb-30a-p-PER.208363	44
Εικόνα 24 ABB I/O module for Use with KNX(TP) Bus System. Πηγή https://za.rs-online.com/web/p/plc-accessories/2462707	46

Εικόνα 25 Συνδεσμολογία φορτίων και κεντρικής παροχής ενός δωματίου με σύστημα πρωτοκόλλου KNX. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/HCdMb1DJ_ZY	49
Εικόνα 26 Διακόπτες KNX παράλληλη σύνδεση καλωδίου. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/HCdMb1DJ_ZY	49
Εικόνα 27 Διακόπτης KNX. Πηγή https://www.instagram.com/p/CjSHJEWNgrI/?img_index=2	50
Εικόνα 28 Καυκάς theben KNX πολυλειτουργικό μπουτόν iON 104 KNX BK Μαύρο 4 πλήκτρα και 4 ενδεικτικά led 4969244.	50
Εικόνα 29 Προσωπικό αρχείο Θειοφάνους Ιωάννη. Μελέτη και κατασκευή συστήματος KNX.....	53
Εικόνα 30 Κύκλωμα φωτισμού με zigbee. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/wf9fy42cGtg	55
Εικόνα 31 Εφαρμογή συστήματος Zigbee και ηλεκτρολογική εγκατάσταση εσωτερικά του διακόπτη. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/WmFco3CNyJU	55
Εικόνα 32 Ηλεκτρολογική εγκατάσταση DALI. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/HCdMb1DJ_ZY	57
Εικόνα 33 Μοντέλο LQSE-2DALUNV-D της εταιρείας Lutron lifestyle για dimmable φωτισμό. Πηγή https://wesellstocks.co/products/lutron-homeworks-qs-lqse-2dal-d-dali-power-module	58
Εικόνα 34 Μοντέλο QSN-4T5-120-D της εταιρείας Lutron lifestyle για dimmable φωτισμό. Πηγή https://www.bimobject.com/es/lutronelectronics/product/lutron-athena-qsn-4t5-120-d	58
Εικόνα 35 Εστιατόριο ξενοδοχείου. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.	59
Εικόνα 36 Κεντρική αναμονή ξενοδοχείου. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.....	59
Εικόνα 37 Αίθουσα δεξιώσεων ξενοδοχείου. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.....	60
Εικόνα 38 Αισθητήρας PIR. Πηγή https://www.istockphoto.com/photo/motion-sensor-or-detector-for-security-system-mounted-on-wall-gm541851046-96902479?searchscope=image%2Cfilm	65
Εικόνα 39 Τουαλέτες ξενοδοχείου. Έναυση φωτιστικών μέσω αισθητήρα microwave. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.	66
Εικόνα 40 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου	79
Εικόνα 41 Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017. Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού (W/m^2) κτηρίου αναφοράς ανάλογα της στάθμης φωτισμού για τον υπολογισμό της ενεργειακής του απόδοσης.	80
Εικόνα 42 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κάτοψη Γραφείου.	86
Εικόνα 43 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός με σύστημα ελέγχου DALI.....	86
Εικόνα 44 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός με σύστημα ελέγχου DALI.....	87
Εικόνα 45 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα της επιλογής φωτιστικού με πρωτόκολλο επικοινωνίας KNX.....	88
Εικόνα 46 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός με σύστημα ελέγχου KNX.	88
Εικόνα 47 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα της επιλογής φωτιστικού με πρωτόκολλο επικοινωνίας KNX με ψευδοχρώματα.	89
Εικόνα 48 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα της επιλογής φωτιστικού με πρωτόκολλο επικοινωνίας DALI με ψευδοχρώματα.....	89

Εικόνα 49 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κάτοψη κουζίνας.....	90
Εικόνα 50 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Ψευδοχρώματα από την εφαρμογή φωτιστικών σωμάτων space HUMANITAS και πρωτοκόλλου zigbee.	90
Εικόνα 51 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κάτοψη χώρου υποδοχής.	92
Εικόνα 52 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα φωτισμού με knx-dali στον χώρο υποδοχής.	92
Εικόνα 53 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα φωτισμού με knx-dali στον χώρο υποδοχής ψευδοχρώματα.	92
Εικόνα 54 Μοντέλο IKNX120SBNW Φωτισμός WC με ψευδοχρώματα. Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου.	93
Εικόνα 55 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα φωτιστικού για τον φωτισμό WC	93
Εικόνα 56 Αισθητήρας κίνησης. Πηγή https://www.skrouz.gr/s/60228651/eurolamp-ensyrmatos-aisthitiras-kinisis-147-02322.html#description	94
Εικόνα 57 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Μοντέλο λήψης αποφάσεων visual Promethee.	98
Εικόνα 58 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Promethee II Rankings.	100
Εικόνα 59 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Promethee I Rankings	101
Εικόνα 60 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Promethee Diamond	101
Εικόνα 61 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. I-O Efficiency	102
Εικόνα 62 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Action profile dali.....	102
Εικόνα 63 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Action profile zigbee	103
Εικόνα 64 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Action profile knx.....	103
Εικόνα 65 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Promethee Flow Table	105
Εικόνα 66 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Preference Flows	105
Εικόνα 67 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Gaia	108
Εικόνα 68 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αλλαγή τιμών στα βάρη και στα Evaluations.	110
Εικόνα 69 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτέλεσμα σύμφωνα με τις νέες τιμές	110
Εικόνα 70 Διακόπτης φωτισμού Hager S.1/B.3/B.7. Πηγή https://www.skrouz.gr/s/32438354/Hager-S-1-B-3-B-7-Metopi-Diakopti-Fotismou-Ensomatomeno-Bus-Coupler-LED-se-Leyko-CHroma-80960289.html#description	112
Εικόνα 71 Μοντέλο KNX-SA41. Πηγή https://www.skrouz.gr/s/53453996/Satel-CHroniko-Ragas-KNX-KNX-SA41.html#description	112
Εικόνα 72 Μοντέλο IKNX120SBWWD. Πηγή https://tamlite.co.uk/product/ikon-x-sb/IKNX120SBNW	112
Εικόνα 73 Το Xiaomi Smart Home Hub 2 Πηγή https://www.skrouz.gr/s/40234107/Xiaomi-Home-Center-Hub-2-Smart-Gateway-Wi-Fi-Bluetooth-Zigbee-BHR6765GL.html#description	114
Εικόνα 74 SONOFF ZBMINIL2-Εξυπνος διακόπτης τοίχου ZigBee. Πηγή https://www.skrouz.gr/s/63152678/sonoff-zbminil2-e-diaoptis-toichou-me-plaisio-leykos-080589.html#description	114
Εικόνα 75 Space humanitas της εταιρείας Robus. Πηγή https://robus.com/products/lighting-for-wellbeing-robus-humanitas/space-humanitas-30w-zigbee-controlled-tunable-white-hcl-panel-2700-6500k-600x600mm-ugr19	114



Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και αντικείμενο

Η αξιολόγηση των συστημάτων ελέγχου φωτισμού αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά πεδία της σύγχρονης ενεργειακής όπως επίσης και τεχνολογικής εξέλιξης. Στη σύγχρονη εποχή όπου τα συστήματα ελέγχου τεχνητού φωτισμού πρωταγωνιστούν χρησιμεύουν ως εργαλεία αυτόματης έναυσης φωτιστικών τόσο σε επαγγελματικό ή δημόσιο χώρο όσο και σε οικιακό. Ο έλεγχος φωτισμού διαδραματίζεται σε διπλό ρόλο. Αρχικά, η συμβολή του στην εξοικονόμηση ενέργειας επιδιώκει την μείωση του λειτουργικού κόστους και την αποφυγή άσκοπης χρήσης. Κατόπιν, εστιάζει σε θέματα που αφορούν την οπτική άνεση, την βέλτιστη απόδοση και την κάλυψη αναγκών συμβάλλοντας δραστικά στην ενίσχυση της ποιότητας του εκάστοτε περιβάλλοντος είτε πρόκειται για εσωτερικό χώρο είτε για εξωτερικό.

Η παρούσα εργασία στοχεύει αρχικά στην κατανόηση της τεχνολογικής των συστημάτων έναυσης, ούτως ώστε να εξηγήσει με παραδείγματα για το πόσο αποδοτική και οικονομική είναι η χρήση τους, τον τρόπο λειτουργίας, καθώς και να προτείνει τρόπους βελτίωσης ή ορθή επιλογή συστήματος ανάλογα με τις απαιτήσεις. Μέσω μιας πολυκριτηριακής ανάλυσης η εργασία θα εμβαθύνει στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογικής ροής όπου θα επιτρέπεται ο προσδιορισμός της βέλτιστης επιλογής συστήματος ελέγχου φωτισμού όσο αφορά τις οικονομικές, τεχνικές και ενεργειακές λειτουργίες. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκουμε όχι απλώς μια τεχνική περιγραφή των συστημάτων, αλλά μια ολοκληρωμένη ανάλυση που συνδέει την τεχνολογία με τον φωτισμό, την οικονομία και την βιωσιμότητα.



1.2 Δομή εργασίας

Η μεθοδολογία αναπτύσσεται σε τέσσερα βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τεχνολογική αλλά και ιστορική αναδρομή των συστημάτων ελέγχου φωτισμού τα οποία είναι διαχρονικά, δηλαδή η λειτουργία τους υφίσταται ακόμα και σήμερα. Το δεύτερο στάδιο ασχολείται με την επιλογή και ανάλυση παλαιών όπως επίσης σύγχρονων εφαρμογών. Θα γίνει αναφορά της λειτουργίας χρονοδιακοπών, αισθητήρων κίνησης, μονάδων προγραμματιζόμενης λογικής, DALI, KNX, Zigbee, Z-Wave, IoT και θα υλοποιηθούν επιμέρους εφαρμογές για τα εκάστοτε εξαρτήματα. Στη προκειμένη περίπτωση, η εργασία θα εξετάσει παραδείγματα εφαρμογών όπως ένα γραφείο ή μια αίθουσα διδασκαλίας είτε μια μονοκατοικία. Βάση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν θα γίνει ανάδειξη πρακτικών στοιχείων όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, τις δυνατότητες βελτίωσης των συστημάτων ελέγχου φωτισμού και την λειτουργία τους. Το τρίτο στάδιο σχετίζεται με την πολυκριτήρια ανάλυση. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναπτυχθεί πρότυπο για τη συγκριτική αξιολόγηση το οποίο βασίζεται στο κόστος εγκατάστασης, την άνεση όσο αφορά την έναυση των φωτιστικών, την επεκτασιμότητα και την συντήρηση. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μελέτη περίπτωσης με προσομοιώσεις, υπολογισμούς και οικονομική αποτίμηση ούτως ώστε να γίνει η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων με σκοπό να προταθούν ορθές κατευθύνσεις για μηχανικούς μελετητές.



Κεφάλαιο 2: Τεχνολογική εξέλιξη των συστημάτων φωτισμού

2.1 Παραδοσιακά συστήματα ελέγχου

Η εξέλιξη των συστημάτων¹ ελέγχου φωτισμού αντικατοπτρίζει μια συνεχή τεχνολογική μετάβαση από τους απλούς διακόπτες έναυσης φωτιστικών, τους ροοστάτες μέχρι πιο σύνθετες ηλεκτρονικές λύσεις που η βάση τους στηρίζεται πάνω σε πρωτόκολλα όπως είναι τα Dali και τα Dmx. Παράλληλα η εξέλιξη των φωτιστικών σε τύπου led και ο έλεγχος έναυσης τους διαμέσου των τεχνολογιών που προέρχονται από την πληροφορική απέκτησαν δυνατότητες ενσωμάτωσης αισθητήρων όπου συνδυάζονται με δεδομένα και πάνω σε μια λογική λήψης αποφάσεων. Η άφιξη των led επιτάχυνε την ανάγκη για εφαρμογή νέων προτύπων όπως επίσης νέων τεχνικών συμβατότητας που στοχεύουν στον ανθρωποκεντρισμό δηλαδή να κάνουν την καθημερινότητα πιο άνετη, προσφέρουν επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής και οικονομία (Μπουρούσης, 2014). Οι σύγχρονοι λαμπτήρες πλέον έχουν δικτυακή² επικοινωνία όπως επίσης δυνατότητα τοπικής επεξεργασία δεδομένων που έχει ως συνέπεια η λειτουργία τους να επεκτείνεται πέραν την παραγωγής τεχνητού φωτός. Επιπρόσθετα, συμβάλλουν στην βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.

2.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των παραδοσιακών συστημάτων

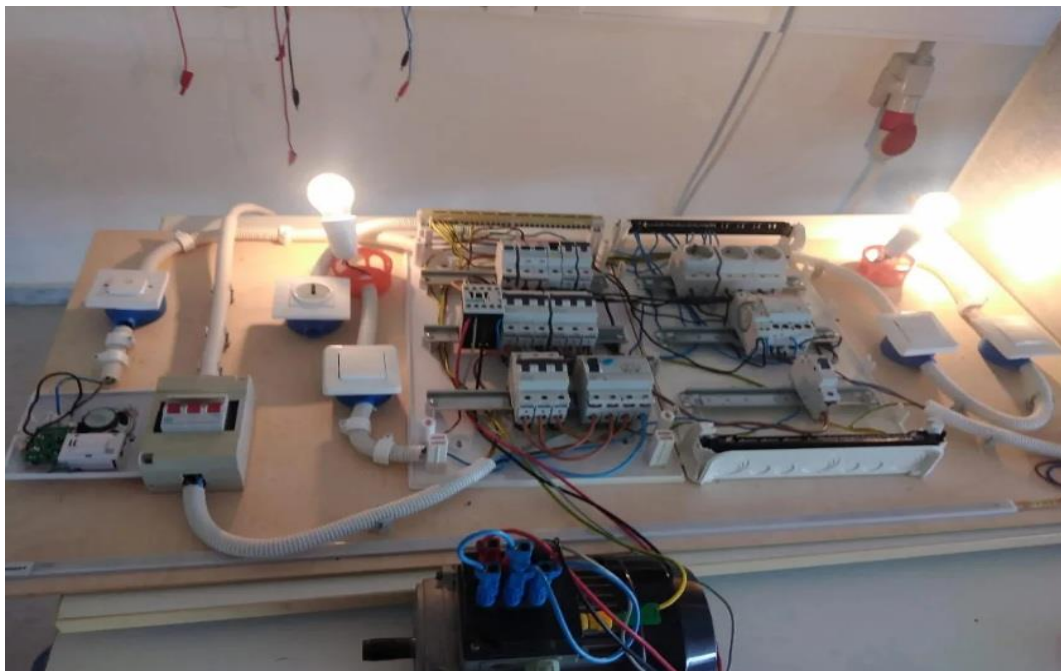
Τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου τεχνητού φωτισμού βασίζονται σε μηχανισμούς όπου ρυθμίζεται η ροή και επιτρέπουν την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος προς τα φωτιστικά σώματα. Τέτοιου είδους μηχανισμοί είναι οι διακόπτες on/off, οι χρονοδιακόπτες ράγας και οι dimmer ή αλλιώς ροοστάτες. Οι διακόπτες on/off τους συναντάς παντού είτε είναι επαγγελματικός χώρος ή οικεία είναι απλοί στην χρήση, βρίσκονται εύκολα στην αγορά, έχουν χαμηλό κόστος, αντέχουν με την πάροδο του χρόνου, λειτουργούν χειροκίνητα δηλαδή με το πάτημα του μπουτόν κόβουν ή επιτρέπουν να περάσει η ένταση του ρεύματος από τον μικροαυτόματο στο εκάστοτε φωτιστικό σώμα (Αντωνόπουλος, Δημητρόπουλος & Μάρης, 2009). Τα παραδοσιακά συστήματα όμως δεν προσφέρουν δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ευρύτερα δίκτυα όπως το KNX, ZIGBEE, ή DALI. Μια απλή εφαρμογή των παραδοσιακών συστημάτων έναυση έγινε στα πλαίσια σχολικού μαθήματος στο εργαστήριο των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων στην ΄Β ΕΠΑΛ στον τομέα της Ηλεκτρολογίας την σχολική χρονιά 2022-2023.

¹ <https://securityreport.gr/archeio-periodikoy/2019/teychos-94/i-asyrmati-technologia-zigbee/>

² <https://www.ledyilighting.com/el/zigbee-vs-z-wave-vs-wifi/>



Οι μαθητές στα πλαίσια της διδακτέας ύλης και υπό την καθοδήγηση μου δημιούργησαν κύκλωμα φωτισμού όπου ανάβει από δύο σημεία και ένα κύκλωμα από ένα σημείο (Εικόνα 1). Ταυτόχρονα σύνδεσαν χρονοδιακόπτη ράγας στη βοηθητική επαφή ενός τριφασικού ρελέ ισχύος μέσω του οποίου έδιναν εντολή σε πρίζες ράγας ανά φάση να τροφοδοτηθούν με ρεύμα. Κατόπιν, από τις πρίζες είχαν την δυνατότητα να συνδέσουν φωτιστικά για περαιτέρω φωτισμό (Εικόνα 2).



Εικόνα 1 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κύκλωμα φωτισμού στο ΕΠΑΛ Αίγινας την σχολική χρονιά 2022-2023.



Εικόνα 2 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Συνδεσμολογίες διαφορετικών ειδών λαμπτήρων στο ΕΠΑΛ Αίγινας την σχολική χρονιά 2022-2023.

Οι χρονοδιακόπτες ράγας αποτελούν εξέλιξη της χρήσης των διακοπών μολονότι παρέχουν την δυνατότητα ρύθμισης χρόνου. Ο χρονοδιακόπτης δουλεύει είτε χειροκίνητα εάν δεν θες να τον προγραμματίσεις με χρόνο ή μπορείς να ορίσεις ένα χρονικό περιθώριο στην διάρκεια της ημέρας να δίνει εντολή να δουλεύει ένα σύστημα φωτισμού συμβάλλοντας άμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας (Αντωνόπουλος, Δημητρόπουλος & Μάρης, 2009). Χαρακτηριστική εφαρμογή ενός χρονοδιακόπτη είναι η έναυση ενός φωτεινού εκθέματος που προορίζεται για εικαστική χρήση φωτισμού (Εικόνα 3). Το εικαστικό έργο από φως, έχει δημιουργηθεί μέσω της εφαρμογής φωτισμού Relux και μπορεί να αποτελεί ένα έκθεμα σε ένα πάρκο. Αναπαριστά μια νεαρή γυναίκα, όπως επίσης έναν νεαρό οι οποίοι έχουν κατασκηνώσει στο δάσος παρέα με τον σκύλο τους και στέκονται ανέμελοι να παρατηρούν την φωτιά. Η φωτιά αναπαρίσταται από ένα σύνολο γραμμικών λαμπτήρων οι οποίες έχουν ακανόνιστη διάταξη δηλαδή είναι τοποθετημένοι κάθετα και μερικοί γέρνουν προς τα πλάγια. Ο χρωματισμός της φωτιάς προέρχεται από δευτερογενή χρώματα. Μια ομάδα φωτιστικών εκπέμπει κίτρινο φωτισμό ενώ η δεύτερη ομάδα εκπέμπει πορτοκαλί (Θανάσουλα, 2021). Η εφαρμογή Relux παρέχει την δυνατότητα εναλλαγής χρωματικής δέσμης διότι έχει ως εφαρμογή κονσόλα η οποία ρυθμίζει την ένταση του φωτισμού. Όλα τα φωτιστικά που βρίσκονται στην βιβλιοθήκη του Relux παράγουν λευκό φωτισμό. Το κίτρινο φως προέρχεται από την μείωση της αξίας του μπλε από το 255 στο 0. Ο πορτοκαλί φωτισμός, παράγεται κάνοντας την ίδια διαδικασία με την διαφορά ότι μειώνουμε και την αξία του πράσινου μέχρι να φθάσει η τιμή του οριακά

πάνω το μηδέν. Ο φωτισμός του σκύλου, της κοπέλας και του αγοριού γίνεται από κάτω προς τα πάνω για να τονίσει τις φιγούρες τους μέσα στο σκοτεινό περιβάλλον (Δούλος & Μπουρούσης, 2013). Η έναυση των φωτιστικών γίνεται μέσω τριφασικού ρελέ ισχύος ή αλλιώς ηλεκτρονόμο ο οποίος η βοηθητική του επαφή οπλίζεται από έναν χρονοδιακόπτη. Ο ηλεκτρονόμος αποτελείται από το κύριο κύκλωμα από όπου συνδέονται οι μικροαυτόματοι και τα φωτιστικά ανά φάση. Στην πρώτη φάση έχουμε ενώσει τους προβολείς που φωτίζουν τις παρουσίες ενώ στην δεύτερη και τρίτη φάση έχουμε μοιράσει τους γραμμικούς λαμπτήρες. Έχουμε ρυθμίσει τον χρονοδιακόπτη να δίνει εντολή να οπλίσει μέσω της βοηθητικής επαφής του ηλεκτρονόμου το πηνίο του ηλεκτρονόμου από της 19:00 έως της 06:30 και το έκθεμα να φωτίζει μέχρι αυτή την χρονική διάρκεια (Ζούλης, Καφετζάκης & Σούλης, 2000). Υπό κανονικές συνθήκες έχουμε ρυθμίσει τις δέσμες φωτισμού χειροκίνητα χωρίς την παρουσία κονσόλας. Η έναυση των φωτιστικών θα δώσει απευθείας το επιθυμητό χρώμα εφόσον έχουμε συνδέσει τα φωτιστικά στην έξοδο του ρελέ ισχύος από την μεριά του κυρίου κυκλώματος.

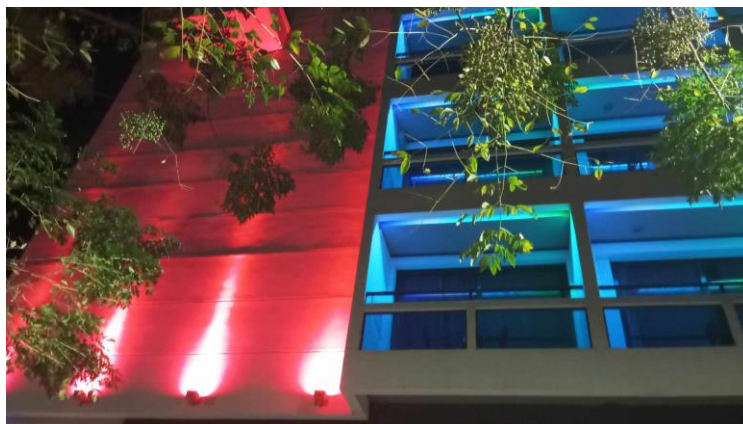


Εικόνα 3 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Εφαρμογή φωτισμού μέσω προγράμματος Relux.

Οι διακόπτες dimmer δίνουν την δυνατότητα μεταβολής της φωτεινής έντασης μέσω ενός ποτενσιόμετρου. Η τεχνολογία αυτή μας επιτρέπει να δημιουργούμε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού είτε χαμηλό φωτισμό είτε πλήρη χωρίς την ύπαρξη σκιερών μερών στον χώρο παρόλα αυτά δεν έχουν ενεργειακή απόδοση μολονότι μεγάλο μέρος της ισχύος χάνεται σε θερμότητα και δεν είναι συμβατοί με όλα τα είδη λαμπτήρων (Simpson, R. S, 2003).

2.1.2 Έλεγχος τεχνητού φωτισμού μέσω κονσόλας DMX

Η κονσόλα³ φωτισμού DMX (Digital Multiplex) είναι ένα σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιείται διαχρονικά για τον έλεγχο φωτιστικών σωμάτων σε μια θεατρική παράσταση, ένα τηλεοπτικό στούντιο, μια συναυλία, ένα νυχτερινό κέντρο, φωτισμός εξωτερικών χώρων ή ακόμα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται χρήση αρχιτεκτονικού φωτισμού (Εικόνα 4). Η χρήση της κονσόλας απαιτεί βασική εκπαίδευση όσον αφορά τον χειρισμό της, γνώση της θεωρίας των χρωμάτων, δημιουργεί έργα έχοντας ως κύριο εκφραστικό μέσο το φως και συμβάλει στην δημιουργία ατμόσφαιρας ή έκφραση συναισθημάτων σε μια θεατρική παράσταση ή μια συναυλία.



Εικόνα 4 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Ξενοδοχείο Αλεξάνδρα στο νησί της Κω.

Η θεωρία των χρωμάτων στον φωτισμό αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα τόσο στον θεατρικό όσο και στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Το φως δεν είναι απλώς μέσο ορατότητας, αλλά αποτελεί εργαλείο έκφρασης και επικοινωνίας. Η βάση της θεωρίας των χρωμάτων στον φωτισμό σχετίζεται με τη φύση του ίδιου του φωτός. Το λευκό φως αποτελείται από ένα φάσμα διαφορετικών μηκών κύματος, τα οποία αντιστοιχούν στα χρώματα που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια, ένα μέρος του απορροφάται και ένα μέρος ανακλάται, καθορίζοντας έτσι το χρώμα που αντιλαμβανόμαστε. Στον φωτισμό, η επιλογή της πηγής φωτός και η φασματική της κατανομή παίζουν καθοριστικό ρόλο στο πώς εμφανίζονται τα αντικείμενα και τα υλικά (Θανάσουλα, 2021).

Στον αρχιτεκτονικό φωτισμό, η θεωρία των χρωμάτων εφαρμόζεται με πιο λειτουργικό αλλά εξίσου σημαντικό τρόπο. Ο στόχος εδώ δεν είναι μόνο η αισθητική, αλλά και η άνεση, η ευχρηστία και η σωστή απόδοση των χρωμάτων των αντικειμένων. Η θερμοκρασία χρώματος, που μετρείται σε Kelvin, αποτελεί βασική παράμετρο. Οι χαμηλές θερμοκρασίες χρώματος δημιουργούν ζεστό, κιτρινωπό φως που θεωρείται

³ <https://www.sweetwater.com/sweetcare/articles/understanding-dmx/>

πιο φιλόξενο και κατάλληλο για κατοικίες ή χώρους χαλάρωσης, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες παράγουν ψυχρό, λευκό ή μπλε φως που προτιμάται σε γραφεία ή χώρους εργασίας λόγω της ενίσχυσης της συγκέντρωσης (Τοπαλής, Φ., Οικονόμου, Α., & Κουρτέση, Σ., 2021).

Η κόκκινη φωτεινή δέσμη είναι βαρύτερη σαν χρώμα και έχει την μεγαλύτερη πυκνότητα και όπως η κίτρινη δέσμη φωτός κάνουν τα αντικείμενα να φαίνονται μικρότερα από ότι είναι στην πραγματικότητα. Θεωρείται πολύ ισχυρό επικοινωνιακό χρώμα και εντάσσεται στην κατηγορία των θερμών χρωμάτων. Σε φωτεινές αποχρώσεις είναι τολμηρό συνάμα ενεργητικό και στις σκούρες αποχρώσεις δίνει μια κομψότητα στα αντικείμενα που φωτίζει και προκαλεί επιθετικά συναισθήματα. Χρησιμεύει κυρίως για χορευτικές εκδηλώσεις με εκρηκτικές και έντονες κινήσεις. Το αντίπαλο χρώμα είναι το γαλάζιο (Ζερεφός, 2013).

Το πράσινο φως είναι ψυχρή δέσμη φωτός και το ανθρώπινο μάτι παρουσιάζει τις περισσότερες ευαισθησίες όταν το παρατηρεί. Χρησιμεύει για τον φωτισμό θάμνων, δέντρων όπως επίσης αναζωογονεί και θεραπεύει την ψυχολογία όποιου το παρατηρεί (Ζερεφός, 2013).

Το μπλε είναι πρωτογενές ψυχρό χρώμα και ανάλογα με την απόχρωση είτε είναι μαλακό φως είτε σκληρό. Η ανοιχτή απόχρωση χρησιμοποιείται κυρίως για το φωτισμό μιας πισίνας, ενός σιντριβανιού ενώ η σκληρή για τον φωτισμό πέτρινων τοίχων ή για χρωματισμό μεγαλοπρεπών κτιρίων. Προτιμάται πολύ σε συναυλίες και σε θεατρικές παραστάσεις (Ζερεφός, 2013).

Το λευκό θεωρείται ουδέτερο χρώμα χρησιμοποιείται κυρίως για επαγγελματική χρήση και αποτελεί πρόσμικση των τριών βασικών χρωμάτων. Υποδηλώνει την ένταση φωτισμού, προκαλεί αισθήματα ηρεμίας, παρέχει υψηλή ορατότητα, συμβάλει στην ανάδειξη άλλων χρωμάτων, συμβολίζει τον μινιμαλισμό και όταν βρίσκεται μόνη της στον χώρο προκαλεί ενδιαφέρον. Το αρνητικό της παρούσας δέσμης όταν το ανθρώπινο μάτι εκτεθεί πολύ στην όψη της κουράζεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται πονοκέφαλος (Ζερεφός, 2013).

Η χρωματική δέσμη του ματζέντα όταν προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια τραβά το βλέμμα, δημιουργεί θετικές σκέψεις, προκαλεί έμπνευση μπορεί όμως να προκαλέσει αρνητικά συναισθήματα όπως αυτό της στεναχώριας. Υποδηλώνει σαν χρώμα δύναμη, αξιοπρέπεια και επειδή προέρχεται από μίξη του μπλε με το κόκκινο συνδυάζει τα χαρακτηριστικά τους (Ζερεφός, 2013).

Η πορτοκαλί δέσμη προκαλεί κέφι και δίνει ζεστασιά. Ανήκει στην κατηγορία των θερμών χρωμάτων και παράγεται από την μίξη της πράσινης δέσμης με της κόκκινης.

Για να πετύχει ένας καλλιτέχνης φωτισμού την συγκεκριμένη δέσμη χρειάζεται να μειώσει την ένταση της πράσινης δέσμης και να υπερτερεί η κόκκινη διαφορετικά το φως που θα παραχθεί θα έχει χρώμα κίτρινο. Το πορτοκαλί σαν χρώμα έχει την ικανότητα να επιβάλλεται στον χώρο και προκαλεί διέγερση σε μικρότερο βαθμό (Ζερεφός, 2013). Το αρνητικό που έχει είναι ότι υποδηλώνει κίνδυνο και σφοδρή επιθυμία.

Το κίτρινο θεωρείται από τις πιο θερμές δέσμες φωτός και η χρήση της είναι ευρεία σε όλα τα είδη φωτισμού είτε είναι καλλιτεχνικός, είτε αρχιτεκτονικός ή ακόμα οικιακός. Δημιουργεί ζεστασιά, ευχάριστη ατμόσφαιρα, άνετο περιβάλλον, σχετίζεται πολλές φορές με το ηλιακό φως, είναι άξιο προσοχής στο βλέμμα και ο συνδυασμός του με τις μαύρες επιφάνειες το καθιστά άμεσα αναγνωρίσιμο (Θανάσουλα, 2021).

Το τirkουάζ και το γαλάζιο ανήκουν στα ψυχρά χρώματα και διαφέρουν ως προς την απόχρωση. Σαν δευτερογενές χρώμα το τirkουάζ προέρχεται από τη μίξη του μπλε και του πράσινου όπως το γαλάζιο μα διαφέρει ως προς την απόχρωση διότι επηρεάζεται από την ένταση του πράσινου (Θανάσουλα, 2021).

Στον θεατρικό φωτισμό, η χρήση των χρωμάτων έχει έντονα εκφραστικό χαρακτήρα. Τα χρώματα χρησιμοποιούνται για να ενισχύσουν το συναίσθημα μιας σκηνής, να υποδηλώσουν την ώρα της ημέρας ή να διαφοροποιήσουν χώρους και καταστάσεις μέσα στο ίδιο σκηνικό. Για παράδειγμα, οι θερμές αποχρώσεις όπως το κόκκινο, το πορτοκαλί και το κίτρινο συνδέονται συχνά με έντονα συναισθήματα, ενέργεια ή ένταση, ενώ οι ψυχρές αποχρώσεις όπως το μπλε και το πράσινο δημιουργούν μια αίσθηση ηρεμίας, μυστηρίου ή αποστασιοποίησης. Η χρήση φίλτρων και χρωματιστών προβολέων επιτρέπει στους σχεδιαστές φωτισμού να μεταβάλλουν άμεσα την ατμόσφαιρα μιας σκηνής και να επηρεάζουν την ψυχολογία του κοινού (Richard Dunham, 2019). Ο φωτισμός νύχτας στο θέατρο δεν σημαίνει απόλυτο σκοτάδι, αλλά μια προσεκτικά ελεγχόμενη ψευδαίσθηση. Οι φωτιστές χρησιμοποιούν χαμηλή ένταση φωτός και κυρίως ψυχρές αποχρώσεις, όπως μπλε ή μωβ, για να αποδώσουν την αίσθηση του σεληνόφωτος. Το φως συχνά κατευθύνεται από συγκεκριμένες γωνίες ώστε να δημιουργούνται σκιές και βάθος, κάνοντας τη σκηνή να φαίνεται πιο φυσική και ατμοσφαιρική, ενώ παράλληλα διατηρείται η ορατότητα των ηθοποιών (Θανάσουλα, 2021).

Το κεχριμπάρι δηλαδή θερμό κεχριμπαρένιο φως αποτελεί μια ζεστή απόχρωση. Χρησιμοποιείται στον θεατρικό φωτισμό για να προσθέσει θερμότητα και φυσικότητα όπως επίσης σε ρεαλιστικά σκηνικά για να αποδώσει φυσικές ώρες της ημέρας. Βοηθά ιδιαίτερα στην απόδοση των τόνων του δέρματος, ώστε οι ηθοποιοί να φαίνονται πιο



ζωντανοί και όχι «ψυχροί». Είναι επίσης ιδανικό για σκηνές που υποδηλώνουν ηλιοβασίλεμα, αυγή ή εσωτερικούς χώρους με τεχνητό φωτισμό, όπως από λάμπες ή κεριά. Προσομοιώνει δηλαδή το φυσικό φως του ήλιου, ιδιαίτερα της δύσης ή της αυγής. Όταν συνδυάζεται με τον φωτισμό νύχτας, το κεχριμπάρι χρησιμοποιείται διακριτικά για να εξισορροπήσει τις ψυχρές αποχρώσεις. Έτσι αποφεύγεται μια υπερβολικά ψυχρή εικόνα και επιτυγχάνεται μια πιο φυσική και ευχάριστη οπτική σκηνική ατμόσφαιρα, όπου το κοινό αντιλαμβάνεται τη νύχτα αλλά εξακολουθεί να συνδέεται συναισθηματικά με τα πρόσωπα και τη δράση (Richard Dunham, 2019).

Το κόκκινο στον θεατρικό φωτισμό είναι έντονο και δυναμικό και συνδέεται με ισχυρά συναισθήματα. Μπορεί να εκφράζει πάθος, έρωτα, επανάσταση, πόλεμο, θυμό ή ακόμη και κίνδυνο, ενώ όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλη ένταση δημιουργεί μια αίσθηση δραματικότητας και έντασης στη σκηνή (Johannes Itten, 1998).

Το ματζέντα είναι ένα πιο σύνθετο χρώμα, ανάμεσα στο κόκκινο και το μπλε, και δίνει μια αίσθηση φαντασίας, ονείρου ή θεατρικότητας. Συχνά χρησιμοποιείται σε πιο αφαιρετικές ή έντονες καλλιτεχνικές σκηνές, σε συναυλίες καθώς δημιουργεί μια μη ρεαλιστική, σχεδόν «μαγική» ατμόσφαιρα. Επίσης, γράφει καλά στο μάτι, αναπαριστά κάτι το οποίο είναι μεγαλοπρεπές, κάνει αντίθεση με το πράσινο, αλλοιώνει έντονα τους φυσικούς τόνους που σημαίνει ότι η χρήση του απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ή να λειτουργεί συνδυαστικά με το λευκό για να υπάρχει μια ισορροπία. Το υπεριώδες (UV) φως χρησιμοποιείται κυρίως για ειδικά εφέ. Έχει την ιδιότητα να κάνει ορισμένα υλικά να «φωσφορίζουν», δημιουργώντας ένα σχεδόν μαγικό ή εξωπραγματικό αποτέλεσμα. Συχνά αξιοποιείται σε πειραματικές ή φανταστικές σκηνές, όπου θέλουμε να ξεφύγουμε από τον ρεαλισμό (Johannes Itten, 1998).

Το μπλε είναι κατεξοχήν το χρώμα της νύχτας και της ηρεμίας. Αποπνέει ψυχρότητα, απομόνωση ή μελαγχολία και χρησιμοποιείται συχνά για να αποδώσει εξωτερικούς χώρους όπως το νερό, τον ουρανό, τη νύχτα ή πιο εσωτερικές, συναισθηματικές στιγμές. Σε πιο έντονες αποχρώσεις μπορεί να δώσει και μια ψυχρή, αποστασιοποιηθέν αίσθηση (Johannes Itten, 1998).

Το πράσινο μπορεί να έχει διπλή σημασία. Από τη μία πλευρά συνδέεται με τη φύση και την ηρεμία, αλλά στον θεατρικό φωτισμό συχνά αποκτά πιο μυστηριώδη ή και ανησυχητική διάσταση, δίνοντας την αίσθηση του αφύσικου, της αρρώστιας ή του απειλητικού. Μπορεί δηλαδή να πέφτει πάνω στα πρόσωπα ή στα σκηνικά για να αλλοιώσει την εικόνα και να προκαλέσει αμηχανία (Johannes Itten, 1998).

Το λευκό φως είναι ουδέτερο και καθαρό και χρησιμοποιείται για ορατότητα, αφήγηση αλλά και για να αποδώσει στη σκηνή μια φυσικότητα και σαφήνεια. Δεν φορτίζει έντονα



το συναίσθημα από μόνο του, αλλά σε συνδυασμό με τη γωνία και την έντασή του μπορεί να γίνει είτε πολύ ρεαλιστικό είτε έντονα δραματικό. Εμφανίζεται σε πρόβες, σε σκηνές που απαιτούν καθαρότητα και ρεαλισμό, αλλά και σε παραστάσεις όπου δεν θέλουμε έντονη χρωματική παρέμβαση (Richard Dunham, 2019).

Η ροζ χρωματική δέσμη στον θεατρικό φωτισμό χρησιμοποιείται κυρίως για να δημιουργήσει ατμόσφαιρα και να ενισχύσει το συναίσθημα μιας σκηνής. Δεν έχει μία απόλυτα σταθερή σημασία, αλλά συνδέεται συχνά με τον ρομαντισμό και την τρυφερότητα, γι' αυτό και εμφανίζεται σε σκηνές αγάπης ή έντονης συναισθηματικής επαφής μεταξύ των χαρακτήρων. Παράλληλα, μπορεί να αποδώσει μια αίσθηση νεότητας και αθωότητας, δημιουργώντας ένα πιο απαλό και ονειρικό σκηνικό περιβάλλον. Επιπλέον, το ροζ φως χρησιμοποιείται για να δηλώσει έναν μη ρεαλιστικό ή φανταστικό κόσμο, καθώς δεν αντιστοιχεί σε φυσικό φωτισμό και έτσι μεταφέρει τον θεατή σε μια πιο συμβολική διάσταση. Σε ορισμένες περιπτώσεις συνδέεται και με τη θηλυκότητα ή την ευαισθησία, ανάλογα πάντα με τη σκηνοθετική προσέγγιση. Όταν η απόχρωση γίνεται πιο σκούρα και πλησιάζει προς το μωβ, μπορεί να δημιουργήσει μια πιο μελαγχολική ή νοσταλγική ατμόσφαιρα. Πέρα από το συμβολικό του ρόλο, το ροζ φως έχει και πρακτική χρήση, καθώς μαλακώνει τα χαρακτηριστικά των ηθοποιών και θεωρείται ιδιαίτερα κολακευτικό για το δέρμα. Συχνά συνδυάζεται με άλλα χρώματα, όπως το μπλε ή το μωβ, για να δημιουργηθούν πιο σύνθετα και εκφραστικά φωτιστικά εφέ. Συνολικά, η ροζ δέσμη λειτουργεί ως ένα εκφραστικό εργαλείο που προσδίδει ζεστασιά, συναίσθημα και μια ονειρική ποιότητα στη σκηνή (Richard Dunham, 2019).

Μέσω της λειτουργίας της κονσόλας DMX, ο χειριστής επιτυγχάνει έλεγχο πολλών φωτιστικών σωμάτων ταυτόχρονα και δημιουργεί φωτιστικά σενάρια γνωστά κυρίως στον χώρο του θεάτρου ως cues (Θανάσουλα, 2021). Η Βασική της λειτουργία βασίζεται στην αύξηση ή την μείωση της έντασης του ρεύματος μέσω ενός ροοστάτη και στην πρόσμιξη των πρωτογενών χρωμάτων του κόκκινου, μπλε και πράσινου (Εικόνα 5). Ένα σύστημα DMX υποστηρίζει 512 κανάλια και επιτρέπει έλεγχο φωτισμού με υψηλή ακρίβεια και συγχρονισμό. Κάθε φωτιστικό LED λαμβάνει ένα μοναδικό DMX κανάλι μέσω του οποίου η κονσόλα του αποστέλλει παραμέτρους από 0 έως 255 τιμές για κάθε χαρακτηριστικό.

Η αξία 0 αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή του ροοστάτη που είναι τέρμα κάτω και μας δείχνει ότι ο λαμπτήρας είναι σβηστός ενώ η αξία 255 μας δείχνει την μέγιστη τιμή του που είναι τέρμα επάνω και μας επισημαίνει πως ο λαμπτήρας είναι ανοιχτός.

Οι κονσόλες⁴ φωτισμού συνδέονται με τα φωτιστικά μέσω καλωδίων DMX, ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που στέλνει σήματα στα φωτιστικά σώματα, ενημερώνοντάς τα για τις αλλαγές στη φωτεινότητά τους, τα χρώματα, τη θέση και άλλα χαρακτηριστικά. Η κονσόλα DMX λειτουργεί ως master controller ενώ τα φωτιστικά σώματα ενεργούν ως slaves ακολουθώντας τις εντολές της πλην εξαιρέσεων. Ο εκάστοτε χειριστής, προκειμένου να παράγει σενάρια φωτισμού δίνει εντολές, για να προγραμματίσει και να ελέγξει τα φώτα. Κάθε φωτιστικό σώμα ανατίθεται σε ένα ή περισσότερα κανάλια μέσω DMX, τα οποία χειρίζονται διαφορετικές λειτουργίες όπως είναι για παράδειγμα το χρώμα, η δημιουργία φωτιστικών σεναρίων, το strobe και η ένταση φωτισμού.



Εικόνα 5 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Πρωτογενή και δευτερεύοντα χρώματα

Το μειονέκτημα που παρουσιάζει μια κονσόλα φωτισμού είναι ότι δουλεύει μόνο με φωτιστικά σώματα τύπου RGBW που σημαίνει ότι η εφαρμογή της είναι περιορισμένη δηλαδή αποτελείται από ένα μεμονωμένο σύστημα εξοπλισμού και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επαγγελματική χρήση όπως φωτισμός ιατρείου, νοσοκομείου, υπεραγοράς ή φωτισμό οικείας μολονότι η παρατεταμένη έκθεση του οφθαλμού στις χρωματικές δέσμες φέρει οπτική δυσφορία ή ακόμα κρίσεις επιληψίας (Σωτηροπούλου, 2014). Βέβαια η εφαρμογή της κονσόλας Dmx μπορεί να εφαρμοστεί για φωτισμό κήπου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης έγινε στην προσωπική μου οικία (Εικόνα 6).

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=dJQAZsNwcv4>



Εικόνα 6 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Ψυχρός φωτισμός δέντρου με χρήση κονσόλας DMX.

Η κονσόλα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 12 κανάλια και τα φωτιστικά σώματα ήταν πέντε στον αριθμό ευρείας δέσμης (Εικόνα 7). Ο φωτισμός υλοποιήθηκε από κάτω προς τα πάνω με σκοπό αρχικά να αναδείξω τον κορμό και το φύλλωμα του δέντρου, αφετέρου δε να το ξεχωρίσω από τους θάμνους και τα μεγάλα κλαριά με διαφορετική χροιά ούτως ώστε να μοιάζουν οπτικά με ξεχωριστό φυτό (Δούλος & Μπουρούσης, 2013). Από το πρώτο κανάλι μέχρι το έκτο δύο φωτιστικά τύπου RGB έχουν εντολή να παράγουν μπλε δέσμη φωτισμού. Η ρύθμιση του μπλε χρώματος έχει αξία 255 ενώ η κόκκινη με την πράσινη έχουν αξία 0. Από το έβδομο κανάλι μέχρι το δωδέκατο δύο φωτιστικά παράγουν πράσινη δέσμη φωτός. Στο πέμπτο φωτιστικό, η ρύθμιση του σε μωβ χροιά έγινε ξεχωριστά της κονσόλας πάνω στο ίδιο το φωτιστικό σώμα μολονότι ήθελα περαιτέρω έξι κανάλια. Το μωβ χρώμα προήλθε από την προσθετική μίξη μεταξύ της κόκκινης και της μπλε δέσμης. Με το πάτημα των κουμπιών πήγα την αξία του πράσινου στο 0 και άφησα την αξία του μπλε και του κόκκινου στο 255. Εν ρίξουμε την αξία του μπλε στο 100 για παράδειγμα θα επικρατήσει η κόκκινη δέσμη και ο φωτισμός θα γίνει φούξια ενώ εάν ρίξω την αξία του κόκκινου στο 100 και κρατήσω την μπλε σταθερή ο φωτισμός θα γίνει βαθύ μωβ (Καμπεζίδης, 2014).



Εικόνα 7 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κονσόλα φωτισμού DMX 12 καναλιών.

Στις συναυλίες η χρήση της κονσόλας είναι πιο δυναμική και προσφέρει μεγαλύτερο θέαμα. Ο φωτισμός συγχρονίζεται με την μουσική, αλλάζει ρυθμικά, χρησιμοποιεί περισσότερα εφέ, πιο έντονα χρώματα και τα φωτιστικά κινούνται διαρκώς εν αντιθέσει με μια θεατρική παράσταση που ακολουθούν τον ρυθμό και δίνουν ενέργεια πάνω στην σκηνή. Η χρήση dmx για τον φωτισμό εξωτερικών χώρων προσφέρει απαλό ή έντονο φωτισμό, συνδυάζει λειτουργικότητα με αισθητική με το να προσφέρει ένα καλαίσθητο αποτέλεσμα και αλλάζει την όψη των φωτιζόμενων επιφανειών (Εικόνα 8).

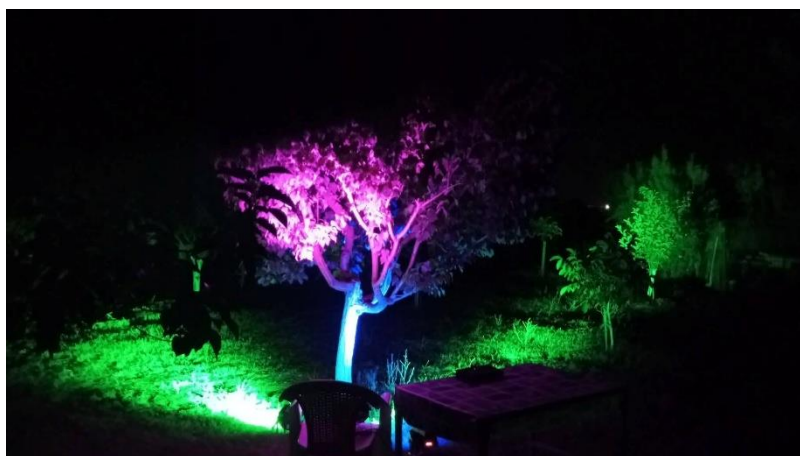


Εικόνα 8 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου.

2.1.3 Έλεγχος τεχνητού φωτισμού με χρήση προγραμματιζόμενης λογικής

Ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής γνωστός και ως PLC αποτελεί μια συσκευή η οποία χρησιμεύει κυρίως για τον αυτοματισμό βιομηχανικών εγκαταστάσεων όπως είναι για παράδειγμα ο έλεγχος ασύγχρονων τριφασικών ηλεκτρικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου ή δακτυλιοφόρου δρομέα. Αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1980 με σκοπό να αντικαταστήσει τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα που βασίζονταν σε ρελέ ισχύος γνωστοί ως ηλεκτρονόμοι και σε διακόπτες προσφέροντας εξοικονόμηση χώρου, υλικών, δυνατότητα επαναπρογραμματισμού και φυσικά μεγαλύτερη ευελιξία (Ζούλης, Καφετζάκης & Σούλτης, 2000). Το plc είναι ένας μικροϋπολογιστής ο οποίος εκτελεί λογικές, ελεγκτικές και αριθμητικές λειτουργίες. Η λειτουργία του βασίζεται στον κύκλο σάρωσης ο οποίος περιλαμβάνει την διαρκή ανάγνωση εισόδων, την εκτέλεση του εκάστοτε προγράμματος και την διεξαγωγή εντολών στις εξόδους. Μέσω των εισόδων δηλαδή δέχεται σήματα από αισθητήρες, μπουτόν και θερμικά, τα επεξεργάζεται και παράγει εξόδους. Οι εξοδοί μπορεί να είναι ρελέ ισχύος από όπου ελέγχονται γραμμές ηλεκτρικών συσκευών ή συστήματα φωτισμού.

Το PLC συνδέεται άμεσα με συστήματα φωτισμού, που σχετίζονται με σήμανση πάρκινγκ, φανάρια οδικής κυκλοφορίας καθώς και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αυτόματη έναυση φωτιστικών σωμάτων χωρίς την παρουσία ανθρώπου, για παράδειγμα μπορεί να ενεργοποιεί τον φωτισμό όταν νυχτώνει και να τον απενεργοποιεί το πρωί. Επίσης, μπορεί να δημιουργεί διαφορετικά “σενάρια” φωτισμού (Εικόνα 9).



Εικόνα 9 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός δέντρου με χρήση plc σε συνδυασμό κονσόλα dmx.

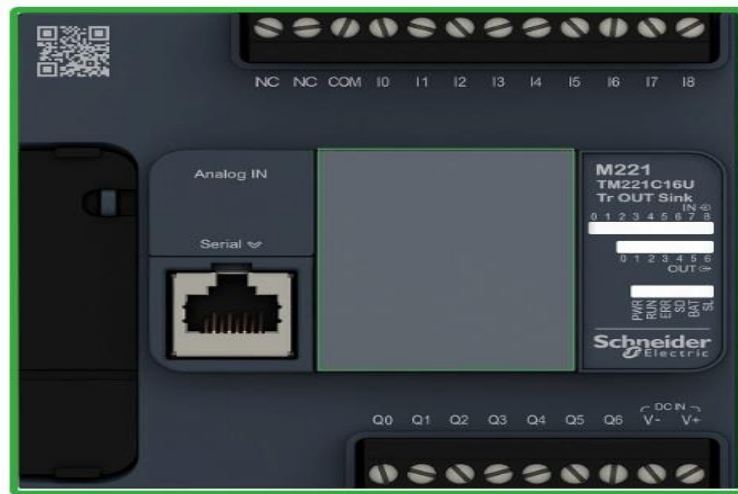


Προκειμένου να δημιουργήσουμε το φωτιστικό σενάριο της παραπάνω εικόνας στην έξοδο του PLC έχουμε συνδεμένο τον αγωγό της φάσης μιας πρίζας όπου τροφοδοτεί την κονσόλα dmx. Για την έναυση της κονσόλας την βραδινή ώρα, χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα φωτός ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε μια είσοδο του PLC. Ο αισθητήρας καταλαβαίνει πότε σκοτεινιάζει και στέλνει σήμα στο PLC. Τότε το PLC ενεργοποιεί τα φώτα και φωτίζεται όλος ο κήπος με τις δέσμες που έχουμε επιλέξει. Όταν ξημερώνει, ο αισθητήρας στέλνει νέο σήμα και το PLC σβήνει τα φώτα αυτόματα. Έτσι, ο φωτισμός λειτουργεί μόνο όταν χρειάζεται (George brown college, 2022).

Το plc πλεονεκτεί εν αντιθέσει με παλαιού τύπου αυτοματισμών διότι μπορεί πολύ εύκολα να προγραμματιστεί, να προσαρμοστεί σε νέες απαιτήσεις, χωρίς φυσική τροποποίηση του ήδη υπάρχοντος εξοπλισμού, προσφέρει ασφάλεια, αξιοπιστία και επεκτασιμότητα. Παρόλα τα πλεονεκτήματα παρουσιάζει μειονεκτήματα τουτέστιν σφάλματα στον προγραμματισμό μπορεί να προκαλέσουν επικίνδυνες λειτουργίες, ο προγραμματισμός απαιτεί γνώσεις κώδικα και αυτοματισμού όπως επίσης το κόστος εγκατάστασης μπορεί να αποβεί υψηλότερο σε αντίθεση με ένα λιγότερο ακριβό εξάρτημα το οποίο τελεί την ίδια λειτουργία επομένως η χρήση του γίνεται για πιο εξειδικευμένες και πολύπλοκες χρήσεις. Ο προγραμματισμός γίνεται είτε με λογικές πύλες, με λίστα από εντολές γνωστές ως STL και γλώσσα Ladder (W. Bolton, 2006).

Το μοντέλο⁵ TM221C16U της εταιρείας Schneider για παράδειγμα διαθέτει 9 ψηφιακές εισόδους, 7 εξόδους τρανζίστορ αρνητικής λογικής(0,5A), 2 αναλογικές εισόδους, 1 σειριακή θύρα, τροφοδοσία ελεγκτή 24 Vdc, με απομονωμένες κλέμες (Εικόνα 10).

⁵ <https://www.se.com/gr/el/product/TM221CE16U/modicon-%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CE%B3%CE%BA%CF%84%CE%AE%CF%82-m22116i-o-tr-npn-ethernet/>



Εικόνα 10 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Μοντέλο TM221C16U 24V dc.

Επιπλέον, προγραμματίζεται μέσω θύρας USB mini-B οπότε δεν απαιτείται κάποιο ειδικό καλώδιο μεγάλου κόστους και χρειάζεται τρεις τροφοδοσίες με συνεχή τάση. Η μια τροφοδοσία σχετίζεται με την κεντρική μονάδα επεξεργασίας και η δεύτερη με την τροφοδοσία εισόδων και η τρίτη τροφοδοσία με αυτή των εξόδων. Ο ανορθωτής παίρνει για είσοδο 230V εναλλασσόμενη τάση από έναν μικροαυτόματο των 16A και στην έξοδο του βγάζει 24V συνεχούς τάση από όπου τροφοδοτούνται εξολοκλήρου τα μέρη της μονάδας του plc (Εικόνα 11). Η χρήση του συνεχούς ρεύματος αποσκοπεί στην εξοικονόμηση του ρεύματος και στην έναυση συστημάτων φωτισμού όπου η τροφοδοσία τους γίνεται με συνεχή τάση (Χαριτάνης, 2006).



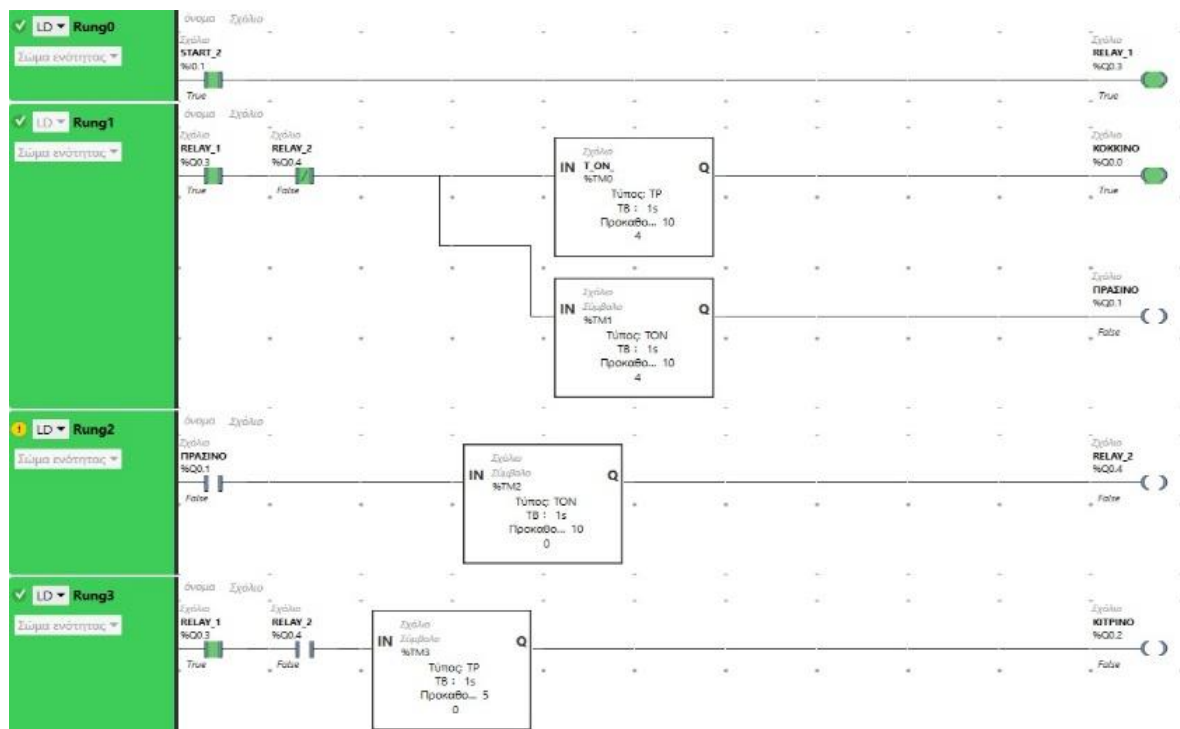
Εικόνα 11 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Εγκατάσταση μονάδας plc με εισόδους και τροφοδοσία από ανορθωτή Εσπερινό ΕΠΑΛ Κω σχολική χρονιά 2024-2025.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής plc είναι τα φανάρια⁶ οδικής κυκλοφορίας. Η χρήση των plc στους φωτεινούς σηματοδότες επιτρέπει ακριβή, προσαρμόσιμη και αυτοματοποιημένη διαχείριση της κυκλοφορίας, μειώνοντας έτσι την ύπαρξη τροχονόμου και είναι χρήσιμη σε διασταυρώσεις όπου η κυκλοφοριακή ροή είναι έντονη. Ο προγραμματισμός γίνεται συνήθως σε γλώσσα ladder (George Brown College, 2022). Το λογισμικό περιλαμβάνει χρονικά που είναι υπεύθυνα για τον καθορισμό της διάρκειας της κάθε φωτεινής ένδειξης, βοηθητικά ρελέ, εισόδους και εξόδους. Ο παρακάτω κώδικας γραμμένος σε γλώσσα ladder μας δίνει ακριβή λεπτομέρεια για το πως λειτουργεί το φανάρι.

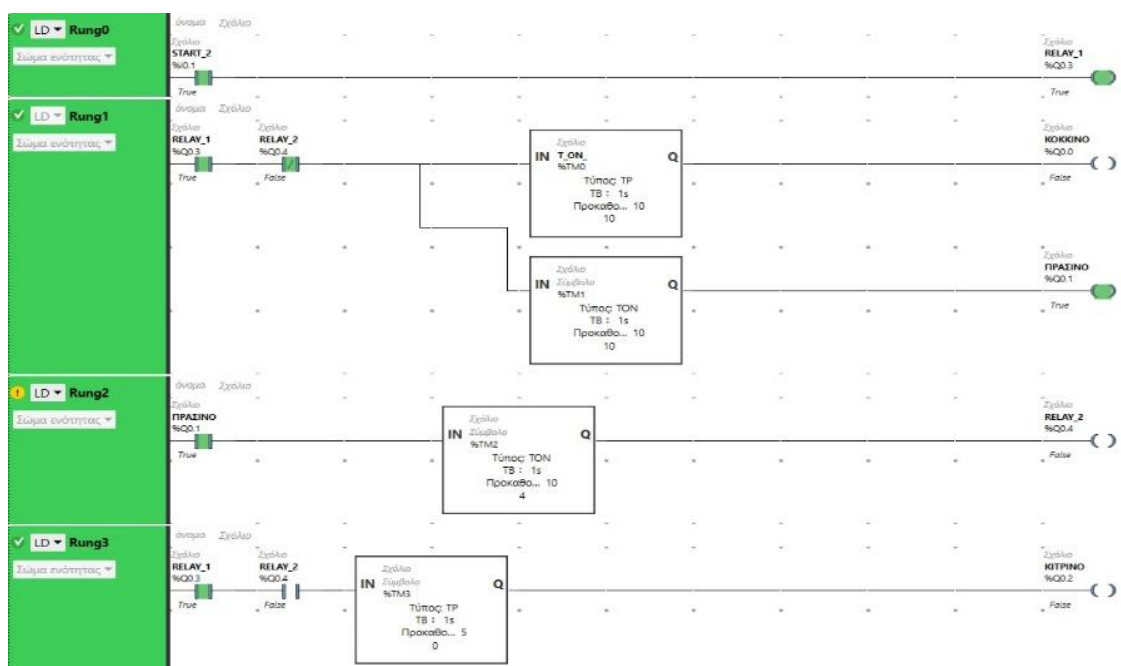
⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=Y8hmjMPM-vg>



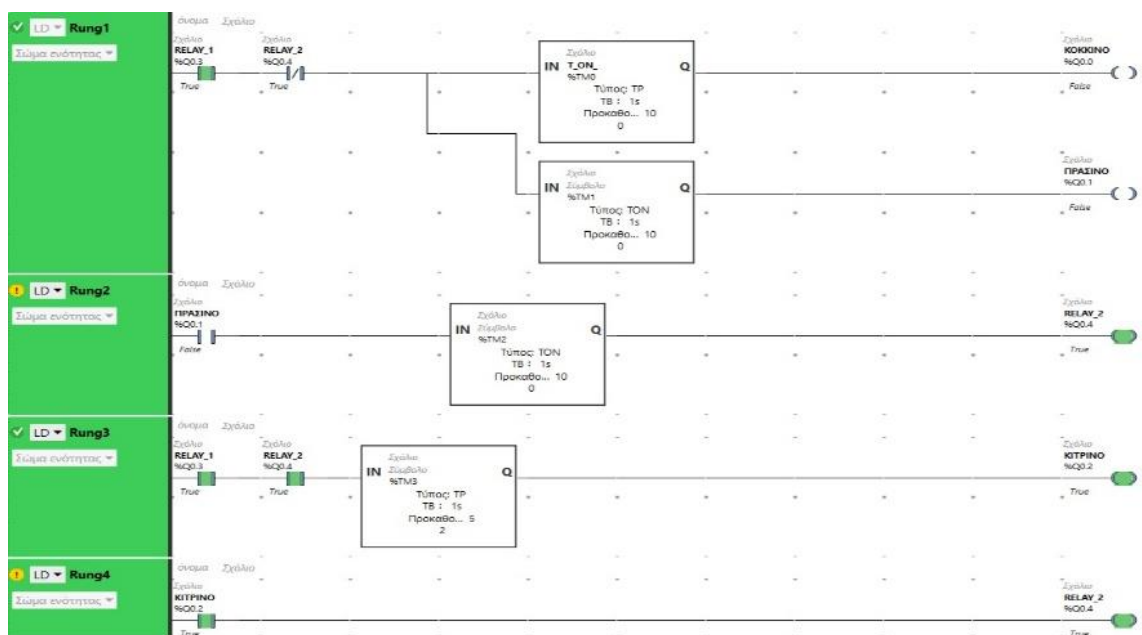
Οι ενδεικτικές λυχνίες έχουν τοποθετηθεί σε τρεις διαφορετικές εξόδους την Q0.0 για το κόκκινο, την Q0.1 για την πράσινη και την Q0.2 για την κίτρινη. Τα βοηθητικά ρελέ Q0.3 και Q0.4 δεν είναι έξοδοι απεναντίας λειτουργούν ως μνήμες για να δημιουργούν έναν διαρκή κύκλο λειτουργίας. Η κεντρική είσοδος διαθέτει μόνο ένα Start το I0.1 το οποίο όταν πατηθεί ενεργοποιεί το βοηθητικό ρελέ Q0.3 και ξεκινά ο κύκλος λειτουργίας. Αν το βοηθητικό ρελέ Q0.4 είναι ανενεργό αρχίζουν να μετρούν τα χρονικά τύπου TP και TON. Το χρονικό TP ενεργοποιεί την κόκκινη σηματοδότηση και σβήνει μετά από καθυστέρηση 10 δευτερολέπτων (Εικόνα 12). Την ίδια χρονική στιγμή αφού σβήσει η κόκκινη θα ενεργοποιηθεί η πράσινη σηματοδότηση. Με την έναυση του πράσινου ο χρόνος αρχίζει να μετρά δέκα δευτερόλεπτα για να ενεργοποιηθεί το βοηθητικό ρελέ Q0.4 (Εικόνα 13). Το Q0.4 σταματά τον κύκλο μεταξύ κόκκινου/πράσινου και μεταφέρει το σύστημα στην κίτρινη σηματοδότηση ενώ το Q0.3 παραμένει ενεργό σε κάθε περίπτωση. Μόλις περάσουν 10 δευτερόλεπτα η πράσινη σηματοδότηση σβήνει και ανάβει η κίτρινη μέσω ενός χρονικού τύπου TP. Μόλις μετρήσει πέντε δευτερόλεπτα η κίτρινη σηματοδότηση θα σβήσει και θα ανάψει πάλι η κόκκινη (Εικόνα 14). Το φανάρι θα πάψει να λειτουργεί σε γενική διακοπή του ρεύματος, είτε από βλάβη.



Εικόνα 12 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κόκκινη σηματοδότηση.



Εικόνα 13 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Πράσινη σηματοδότηση.



Εικόνα 14 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κίτρινη σηματοδότηση.



2.2 Συστήματα με αισθητήρες

Οι αισθητήρες έναυσης φωτισμού αποτελούν ένα από τα πιο χρήσιμα και διαδεδομένα μέσα αυτοματισμού στη σύγχρονη εποχή. Χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιούν και να απενεργοποιούν τα φώτα αυτόματα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανίχνευση αλλαγών στο περιβάλλον, όπως το φως, η κίνηση ή η παρουσία ανθρώπων, και εφαρμόζονται σε κατοικίες, επαγγελματικούς χώρους, δρόμους και κήπους. Συνολικά, οι αισθητήρες έναυσης φωτισμού αποτελούν μια απλή αλλά πολύ αποτελεσματική λύση για τον αυτοματισμό του φωτισμού. Συνδυάζουν τεχνολογία, οικονομία και ευκολία, κάνοντας την καθημερινότητα πιο άνετη και ασφαλή. Σήμερα, οι αισθητήρες αυτοί έχουν εξελιχθεί σημαντικά και χρησιμοποιούνται σε «έξυπνα» σπίτια, όπου μπορούν να συνδεθούν με εφαρμογές και να ελέγχονται μέσω κινητού τηλεφώνου είτε με πρωτόκολλα επικοινωνίας. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να έχει πλήρη έλεγχο του φωτισμού του χώρου του, ακόμα και αν βρίσκεται από απόσταση.

Η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και βέλτιστης χρήση του τεχνητού φωτισμού έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη όπως επίσης και στην ευρεία χρήση των <<έξυπνων>> συστημάτων αυτοματισμού. Τα προηγμένα αυτά συστήματα επιτρέπουν τον αυτόματο έλεγχο της ενεργοποίησης-απενεργοποίησης φωτισμού με βάση την παρουσία ανθρώπων σε ένα χώρο ή τις μεταβολές της φυσικής έντασης φωτισμού επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ευχρηστία των εκάστοτε χώρων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτόματης έναυσης φωτισμού διακρίνονται σε αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας γνωστοί στο εμπόριο ως PIR, σε υπερηχητικούς, σε μικροκυματικούς και σε φωτοαισθητήρες. Από τα πρώτα απλά κυκλώματα με ανιχνευτές κίνησης έως τα σύγχρονα πολυαισθητηριακά και συνδυαστικά συστήματα, η τεχνολογία των αισθητήρων έχει εξελιχθεί τόσο σε επίπεδο αισθητικής, λειτουργικότητας όσο και ακρίβειας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί τους, καθώς και συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογών.

2.2.1 Αισθητήρες PIR (Passive Infrared Sensors)

Οι pir είναι συσκευές που ανιχνεύουν κίνηση βασιζόμενοι της μεταβολής της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα ανθρώπινο σώμα. Ο χαρακτηρισμός <<παθητικός>> σημαίνει ότι ο αισθητήρας δεν εκπέμπει ο ίδιος ενέργεια, αλλά όταν ένα άτομο εισέρχεται στο πεδίο ανίχνευσης, ο αισθητήρας⁷ κάνει σύγκριση μεταξύ της θερμοκρασίας μεταξύ περιβάλλοντος με αυτή του ανθρωπίνου σώματος και ενεργοποιεί το σύστημα φωτισμού. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες⁸ παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση σε χώρους με σταθερές θερμοκρασίες, όπως είναι τα γραφεία, οι αίθουσες διδασκαλίας και οι διάδρομοι (Ashwini A. Nawalkhede , Prof. Dr. Mrs. N. R. Kulkarni, 2020). Έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας <60uA, αξιόπιστη λειτουργία αλλά περιορίζεται η λειτουργία του σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία είναι μεταβαλλόμενη, ή τα υπάρχοντα άτομα μέσα στον χώρο πράττουν μικρές κινήσεις έως μηδαμινές (Εικόνα 15).

Στον φωτισμό οι pir χρησιμοποιούνται για αυτόματη ενεργοποίηση φωτιστικών προσφέροντας εξοικονόμηση ενέργειας με βελτιωμένη άνεση και ασφάλεια. Η τοποθέτηση τους γίνεται σε διαδρόμους, σκάλες, εξωτερικούς χώρους και η σύνδεση τους μπορεί να γίνει ανάλογα με το επίπεδο αυτοματισμού δηλαδή με απλή ηλεκτρική σύνδεση on/off από όπου ο αισθητήρας ενεργοποιεί απευθείας ένα φωτιστικό, πάνω σε σύστημα dali όταν έχουμε περίπτωση φωτισμού για επαγγελματική χρήση, σε σύστημα knx επειδή στέλνει δεδομένα στο knx bus το οποίο με την σειρά του αποφασίζει πότε και ποιο φως θα ανάψει και σε σύστημα zigbee.



Εικόνα 15 Αισθητήρας Passive Infrared Sensor. Εταιρία RS PRO Internal security alarm & sensors.

⁷ <https://grobotronics.com/pir-sensor-module.html?srltid=AfmBOoq1SyDQaNuczIN7LiyjutKbnDpDfnGzuzYNdEFKNyuliXnUJj6J>

⁸ <https://www.szhaiwang.com/el/Understanding-PIR-Motion-Sensor-Detectors-How-They-Work-and-Applications-id49472966.html>

2.2.2 Φωτοαισθητήρες (Photo Sensors / Light Sensors)

Οι φωτοαισθητήρες⁹ χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της στάθμης φυσικού φωτισμού σε έναν χώρο. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ένταση του φωτός και η ρύθμιση του τεχνητού φωτισμού γίνεται με σκοπό την σταθεροποίηση της έντασης φωτισμού (Εικόνα 16). Με αυτή τη μέθοδο ρύθμισης σε περιπτώσεις όπου ο φυσικός φωτισμός επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του χώρου, ο τεχνητός φωτισμός παραμένει απενεργοποιημένος ή να μειωθεί σημαντικά ούτως ώστε να περιορίσουμε την σπατάλη ενέργειας. Στην πράξη, τα πλέον αποδοτικά συστήματα έναυσης φωτισμού είναι όσα λειτουργούν συνδυαστικά δηλαδή η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος βασίζεται στον συνδυασμό δύο ή περισσότερων αισθητήρων. Ο συνδυασμός των αισθητήρων PIR με αυτή των φωτοαισθητήρων συναντιέται πολύ συχνά σε κοινόχρηστους χώρους, όπου το φως ανάβει μόνο σε περίπτωση αντίληψης παρουσίας και ταυτόχρονα η στάθμη του φυσικού φωτός είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων (Khairul Rijal Wagiman, Mohd Noor Abdullah, Mohammad Yusri Hassan, Nur Hanis Mohammad Radzi, 2019).

Οι photo sensors μπορούν να συνδεθούν με φωτιστικά ή συστήματα ελέγχου dali, knx, zigbee όπως οι pir με την διαφορά ότι ένας pir ανιχνεύει κίνηση βασισμένη σε υπέρυθρη ακτινοβολία δηλαδή ανιχνεύει παρουσία ανθρώπου ή ζώου ενώ ο photo sensor ανιχνεύει το φως και ελέγχει την ένταση του ανάλογα με την ένταση του περιβάλλοντα φωτισμού.



Εικόνα 16 Photo sensor. Εταιρία TE connectivity μοντέλο ALR 11000 ZHAGA DIGITAL PHOTOCCELL

⁹ <https://www.istockphoto.com/fi/valokuvat/light-sensor>

2.2.3 Μικροκυματικοί αισθητήρες (Microwave Sensors)

Λειτουργούν με τρόπο όμοιο όπως οι υπερηχητικοί με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα¹⁰ υψηλής συχνότητας στις 360°. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν κίνηση ακόμη και μέσα σε λεπτούς τοίχους εν αντιθέσει με τους αισθητήρες τύπου pir και photo sensors ή εμπόδια πράγμα που σημαίνει ότι το πεδίο κάλυψης τους είναι αυξημένο (Εικόνα 17). Η συγκεκριμένη ικανότητα του αισθητήρα είναι βασισμένη στην τεχνολογία Doppler η οποία επιτρέπει την ανίχνευση πολύ μικρών κινήσεων με μεγάλη ακρίβεια. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας χρησιμεύει για αυτόματη ενεργοποίηση φωτισμού όταν ανιχνεύει κίνηση πίσω από γυάλινες πόρτες, κοντά σε θερμαντικά σώματα και τους συναντάμε σε διαδρόμους, αποθήκες, χώρους στάθμευσης καθώς και σε εφαρμογές έξυπνων σπιτιών.



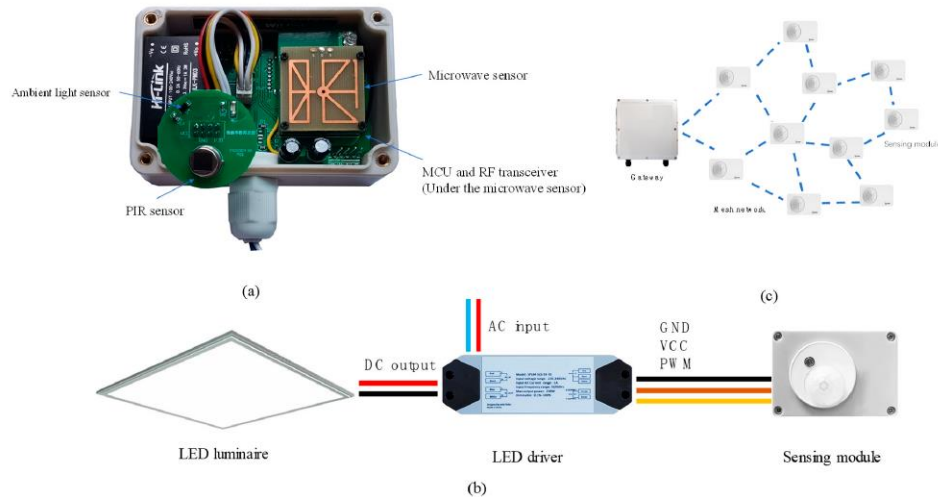
Εικόνα 17 Αισθητήρας microwave Εταιρία RS Pro μοντέλο MWS3A Microwave Ceiling Microwave Detector,

Maximum of 50Hz.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 18). Κάθε φωτιστικό σώμα led εξοπλίζεται με μια ολοκληρωμένη μονάδα ανίχνευσης καθώς περιλαμβάνει μια ή περισσότερες πηγές φωτός τύπου led. Κάθε μονάδα ανίχνευσης αποτελείται από ένα αισθητήρα PIR, έναν Doppler μικροκυμάτων και έναν φωτοαισθητήρα. Ο μικροελεγκτής MCU αποσκοπεί η χρήση του για την επεξεργασία δεδομένων που λαμβάνει από τους αισθητήρες και μέσα στη μονάδα υπάρχει ένας ασύρματος πομποδέκτης ο οποίος με την σειρά του ευθύνεται για την μετάδοση και λήψη δεδομένων εντός του δικτύου. Η τροφοδοσία της μονάδας ανίχνευσης γίνεται μέσω του driver και το επίπεδο έντασης φωτισμού καθορίζεται από το σήμα που δίνει η μονάδα στην έξοδο. Με το σήμα εξόδου ρυθμίζεται η ένταση φωτισμού του led, πετυχαίνουμε ακριβή έλεγχο της έντασης του φωτός ανάλογα με τον επιθυμητό φωτισμό και την ανίχνευση παρουσίας.

¹⁰ <https://www.ledlights4you.co.uk/blog/article/microwave-sensors-how-do-they-work>

Το σύστημα επικοινωνεί ασύρματα μέσω Zigbee χωρίς να απαιτείται καλωδίωση (Yusi Cheng , Chen Fang , Jingfeng Yuan and Lei Zhu, 2020).



Εικόνα 18 Σύστημα αισθητήρων Microwave, PIR και Light sensor. Πηγή *Design and Application of a Smart Lighting System Based on Distributed Wireless Sensor Networks*

2.2.4 Υπερηχητικοί αισθητήρες (Ultrasonic Sensors)

Η λειτουργία ¹¹τους βασίζεται στην εκπομπή ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας καθώς και στην ανάλυση της αντανάκλασης τους από αντικείμενα ά ανθρώπους. Μόλις εντοπίσει κίνηση, μεταβάλλει η ανάκλαση και ενεργοποιείται ο φωτισμός (Εικόνα 19). Μπορούν να ανιχνεύουν μικρές κινήσεις αλλά δεν αναγνωρίζουν ψευδείς συναγερμούς. Επιπρόσθετα, παρέχετε η δυνατότητα κάλυψης περιοχών με εμπόδια, καθώς τα υπερηχητικά κύματα διαχέονται και ανακλώνται, απαιτούν προσεκτική τοποθέτηση και σωστή ρύθμιση λειτουργίας για αποφυγή ψευδών κινήσεων. Εκτός αυτού, παρουσιάζουν καλή απόκριση σε χώρους με χαμηλή θερμοκρασία ή όπου οι PIR είναι λιγότερο αποτελεσματικοί. Οι υπερηχητικοί εφαρμόζονται κυρίως σε φωτισμό αποθηκών και υπόγειους χώρους στάθμευσης. Επιπλέον, τους συναντάμε σε μεγάλα ανοιχτά γραφεία όπου απαιτείται ακριβής ανίχνευση παρουσίας και συνδέεται με τα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως τα υπόλοιπα είδη αισθητήρων.

¹¹ <https://www.bjultrasonic.com/el/how-do-ultrasonic-sensors-work/>



Εικόνα 19 Αισθητήρας ultrasonic Εταιρεία Rs pro. Μοντέλο ultrasonic proximity sensor.

Παρακάτω φαίνονται συνοπτικά όλα τα είδη αισθητήρων με τα χαρακτηριστικά τους όπως επίσης ο τρόπος χρήσης.

Πίνακας 2.1 Είδη αισθητήρων και χαρακτηριστικά

Αισθητήρας	Ανίχνευση	Χαρακτηριστικά	Χρήση
PIR	Υπέρυθρη ακτινοβολία	Ανιχνεύει θερμό σώμα, δεν βλέπει μέσα από αντικείμενα	Διάδρομοι, σκάλες, εσωτερικός φωτισμός
PHOTO SENSOR	Φως	Μετράει ένταση φωτός	Αυτόματος φωτισμός ανάλογα με φυσικό φως
MICROWAVE	Μικροκύματα	Ανιχνεύει κίνηση μέσα από λεπτά αντικείμενα, πιο ευαίσθητος	Αποθήκες, γυάλινες πόρτες, εξωτερικοί χώροι
ULTRASONIC	Υπερήχοι	Ανιχνεύει κίνηση ανεξάρτητα από θερμοκρασία, καλύπτει εμπόδια	Αποθήκες, καμπύλοι διάδρομοι, χώρους με περιορισμένη ορατότητα



2.3 Σύγχρονα έξυπνα και δικτυωμένα συστήματα

Η τεχνολογία εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και να νέα συστήματα ελέγχου του τεχνητού φωτισμού έρχονται να δώσουν λύσεις στον φωτισμό όπως επίσης ευελιξία και επέκταση που σε άλλη περίπτωση παλαιά συστήματα έναυσης και ελέγχουν δεν μπορούσαν λειτουργικά να πραγματοποιήσουν. Ο αυτοματισμός, η εξοικονόμηση ενέργειας τόσο σε χώρο όσο και υλικών, όπως επίσης η ευκολία διαχείρισης φωτισμού έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών ελέγχου και πρωτοκόλλων όπως είναι το DALI, το KNX, το Z wave και το Zigbee (Christopoulos, Antonopoulos, Voros & Orphanoudakis, 2017).

Το πρωτόκολλο DALI αποτελεί βασικό πυλώνα στον ψηφιακό έλεγχο φωτισμού, προσφέροντας ευελιξία, αξιοπιστία και ενεργειακή αποδοτικότητα. Η μετάβαση από τα αναλογικά συστήματα σε ψηφιακά, όπως το DALI, έχει επιτρέψει την ανάπτυξη έξυπνων και προσαρμοστικών συστημάτων φωτισμού που ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες των κτιρίων. Με την εξέλιξη προς το DALI-2 και την ενσωμάτωση σε IoT εφαρμογές, το πρωτόκολλο αναμένεται να διαδραματίσει ακόμη σημαντικότερο ρόλο στο μέλλον.

Το Zigbee αποτελεί μία αποδοτική και ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία για εφαρμογές IoT και έξυπνων κατοικιών, όπου η ευελιξία, το χαμηλό κόστος και η ευκολία εγκατάστασης υπερισχύουν έναντι της απόλυτης αξιοπιστίας. Η συνεχής εξέλιξή του και η ενσωμάτωσή του σε οικοσυστήματα έξυπνων συσκευών αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω τη σημασία του στο μέλλον.

Το πρωτόκολλο KNX αποτελεί μία από τις πλέον ώριμες και αξιόπιστες τεχνολογίες στον τομέα του αυτοματισμού κτιρίων. Η ευρεία αποδοχή του ως διεθνές πρότυπο, σε συνδυασμό με τη διαλειτουργικότητα που προσφέρει μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών, το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για σύνθετες και μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Το KNX μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία τεχνολογία υψηλής αξιοπιστίας και μακροχρόνιας επένδυσης, η οποία ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις απαιτήσεις σύγχρονων έξυπνων κτιρίων, όπου η σταθερότητα, η ασφάλεια και η ολοκληρωμένη διαχείριση συστημάτων είναι καθοριστικής σημασίας.



2.3.1 Έλεγχος φωτισμού με σύστημα Dali

Πρόκειται για ένα επαγγελματικό πρωτόκολλο διασύνδεσης το οποίο περιλαμβάνει αισθητήρες, λαμπτήρες, διατάξεις και συστήματα ελέγχου φωτισμού και τα αρχικά του σημαίνουν στην ελληνική διάλεκτο Ψηφιακή Διευθυνσιοδοτούμενη Διεπαφή Φωτισμού. Πριν την εμφάνιση του Dali, τα συστήματα ελέγχου που βασίζονται σε BMS ήταν πολύπλοκα, δαπανηρά, ενσύρματα και άκαμπτα. Το σύστημα Dali αποτελεί ένα διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο για τον ψηφιακό έλεγχο φωτισμού σε κτιριακές εγκαταστάσεις, νοσοκομεία, εκπαιδευτικά ιδρύματα, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, γραφεία, εμπορικά κτίρια, δημόσιο φωτισμό και έξυπνα σπίτια διότι επιτρέπει τον έλεγχο μεμονωμένων φωτιστικών, αισθητήρες, dimmer καθώς και συστήματα ελέγχου δίνοντας με αυτό τον τρόπο την δυνατότητα για ακριβή έλεγχο (Francisco José Bellido-Outeiriño*, Francisco Javier Quiles-Latorre, Carlos Diego Moreno-Moreno, José María Flores-Arias, Isabel Moreno-García και Manuel Ortiz-López, 2016). Ταυτόχρονα, δίνει διευθύνσεις για πολλαπλές συσκευές με το να ενσωματώνει μηνύματα εκπομπής ομάδας και σκηνής. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνει εξοικονόμηση ενέργειας επειδή με μια μόνο εντολή μπορεί να ελέγξει όλα τα εξαρτήματα μονομιάς. Ένα δίκτυο Dali αποτελείται από έναν κύριο ελεγκτή και παραπάνω από μια συσκευή φωτισμού. Το κάθε φωτιστικό ελέγχεται μέσω ανταλλαγής δεδομένων, έχει ξεχωριστή διεύθυνση και η έναυση όπως επίσης το σβήσιμο του εξαρτάται αποκλειστικά από την κεντρική μονάδα (Anand M S, George Kurian, Manu G, Vineeth Narayanan, 2015).

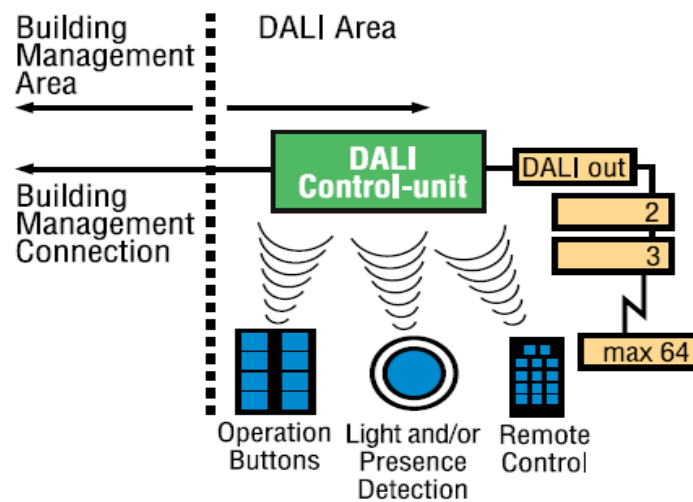
Το dali¹² έχει τυποποιηθεί από την Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) στο πρότυπο IEC 62386 γεγονός που εξασφαλίζει λειτουργικότητα μεταξύ συσκευών οι οποίες προέρχονται από διαφορετικό κατασκευαστή. Επιπλέον, βασίζεται σε αρχιτεκτονική λειτουργία¹³ master-slave δηλαδή ο ελεγκτής που είναι ο master στη συγκεκριμένη περίπτωση στέλνει εντολές, ενώ οι συσκευές που έχουν τον ρόλο των slaves ανταποκρίνονται σε αυτές. Ως προς την τοπολογία του δικτύου η εφαρμογή του παρουσιάζει ευελιξία επειδή μπορεί η σύνδεση μεταξύ κεντρικής μονάδας και συσκευών μπορεί να γίνει σε συνδεσμολογία αστέρα και peer-to-peer χωρίς αυστηρούς περιορισμούς εξαιρούνται οι περιπτώσεις όπου έχουμε κλειστό βρόχο¹⁴.

¹² <https://www.hitaltech.com/en/articles/what-is-dali/>

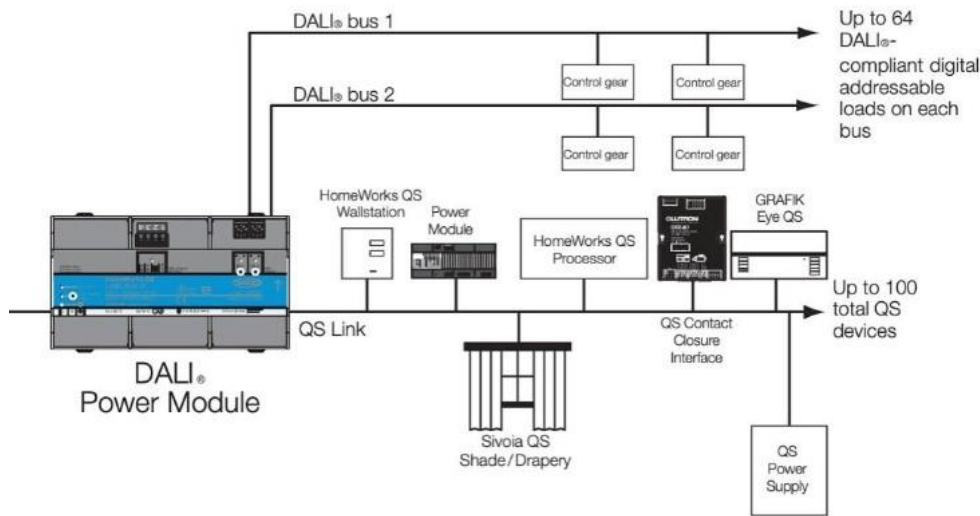
¹³ <https://www.ekinex.com/en/ekinex-solutions-for-smart-lighting-control/the-dali-protocol>

¹⁴ <https://www.palazzoli.com/en/news/lighting/technical-advice/dali-protocol-what-it-means-and-what-is-it-for>

Το ψηφιακό πρωτόκολλο Dali μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε φωτιστικά που υποστηρίζουν το σύστημα του και όχι σε οποιαδήποτε φωτιστικά σώματα (Δούλος, 2013). Η χρήση του είναι φιλική στον χρήστη, ασφαλής, διαχειρίζεται εύκολα χωρίς την απουσία τεχνικού, ενώ παράλληλα μπορεί να ενσωματωθεί ως υποσύστημα σε σύγχρονα συστήματα που έχουν να κάνουν με τον φωτισμό κτιρίων (Εικόνα 20). Το ψηφιακό πρωτόκολλο έχει την δυνατότητα να στηρίξει μέχρι 64 συσκευές, δημιουργεί φωτιστικά σενάρια με χαμηλό κόστος και η βασική έκδοση του μπορεί να αποθηκεύσει μέχρι 16 ομάδες φωτιστικών σωμάτων και 16 σκηνές φωτισμού δηλαδή σενάρια που σχετίζονται με την έναυση και τον έλεγχο(Εικόνα 21).



Εικόνα 20 Σύστημα Ελέγχου με Dali. Πηγή *The ABC's of DALI A Guide to Digital Addressable Lighting Interface* επιστημονικό άρθρο.



Εικόνα 21 Πλήρες σύστημα ελέγχου με Dali. Πηγή <https://www.instagram.com/p/CD36etvHog6/>

Το σύστημα ¹⁵Dali πλεονεκτεί έναντι παλαιών συστημάτων διότι ο τρόπος μεταγωγής και ρύθμισης φωτισμού γίνεται μέσω της γραμμής ελέγχου δίχως παρουσίας ρελέ. Εκτός αυτού, οι ομάδες φωτισμού δεν δημιουργούνται με χρήση καλωδίων δηλαδή η ομαδοποίηση των φωτιστικών γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες, παρέχοντας παράλληλα την δυνατότητα μεταβολής των ομάδων όποτε επιθυμεί ο εκάστοτε χρήστης. Επιπλέον, η έναυση των φωτιστικών μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικό επίπεδο ρύθμισης της έντασης φωτισμού ή εφόσον υπάρχει συνδυασμός διαφορετικών λαμπτήρων όσον αφορά το είδος τους, η μετάβαση από μια σκηνή φωτισμού στην άλλη γίνεται με συγχρονισμένο με αποτέλεσμα τα φωτιστικά να έχουν νέο επίπεδο έντασης φωτισμού το οποίο θα έχει ρυθμιστεί από τον χρήστη. Σε περίπτωση που μια λάμπα καεί το σύστημα αυτόματα την βγάζει εκτός και ενημερώνει τον χρήστη. Το μόνο ελάττωμα είναι ότι το νέο φωτιστικό που θα τοποθετηθεί στην θέση του πρέπει να ρυθμιστεί είτε από τεχνικό είτε από τον υπάρχοντα χρήστη εφόσον κατέχει την γνώση με την κεντρική μονάδα και να ενσωματωθεί στο σύστημα για το λόγο ότι θα δουλεύει διαρκώς χωρίς να σβήνει. Ένα σύστημα Dali μπορεί να ενοποιηθεί με ένα σύστημα KNX.

¹⁵ <https://www.electrodomi.gr/el/upiresies/tehnologia-dali>

Κάθε συσκευή¹⁶ στο δίκτυο έχει μοναδική διεύθυνση, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο ατομικό έλεγχο ή ακόμα ομαδική διαχείριση φωτιστικών πράγμα που σημαίνει μεγάλη ευελιξία στη σχεδίαση συστημάτων φωτισμού. Σε αντίθεση με τα αναλογικά συστήματα υποστηρίζει ανατροφοδότηση από τις συνδεδεμένες συσκευές σχετικά με θέματα που αφορούν τυχόν σφάλματα ή κατάσταση λειτουργίας. Επιπλέον, η χρήση δύο αγωγών χωρίς πολικότητα σε συνδυασμό με την τροφοδοσία μειώνει το κόστος της καλωδίωσης καθώς και την αποφυγή πολλών ενώσεων σε αντίθεση με άλλα συστήματα.

Τα στραγγαλιστικά πηνία γνωστά στην αγορά ως ballast μπορούν επίσης να διαμορφωθούν ξεχωριστά καθώς και οι παράμετροι μπορούν να αποθηκευτούν στην μνήμη του ίδιου του πηνίου. Το εύρος ρύθμισης της έντασης φωτισμού των ballast κυμαίνεται από 0.1% έως 100%. Η ρύθμιση της έντασης φωτισμού είναι προσαρμοσμένη στην ευαισθησία του ματιού (Σωτηροπούλου, 2014). Η μέγιστη είσοδος του ρεύματος είναι τα 700mA σε κάθε βρόχο και η μέγιστη ένταση του ρεύματος που καταναλώνει η κάθε συσκευή που είναι συνδεδεμένη αντιστοιχεί στα 2mA. Η μέγιστη πτώση τάσης στην έξοδο είναι μέχρι τα 45V (Εικόνα 22). Τα ballast Dali παρέχουν ανατροφοδότηση πληροφορίας στο σύστημα φωτισμού BMS για θέματα που αφορούν την ισχύ, την ρύθμιση της έντασης φωτισμού και χωρίς την μονάδα δεν μπορούν να δώσουν διεύθυνση ξεχωριστά (Signify Holding, 2019).



Εικόνα 22 Dali Ballast 200,350,700 mA. Πηγή <https://www.ledclusive.de/en/dali-ballast-with-12v-48v-input-for-constant-current-174>

¹⁶ <https://www.dali-alliance.org/dali/>



Το DALI προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων πρωτοκόλλων διότι παρέχει

- Ευελιξία λόγω ότι επιτρέπει εύκολη αλλαγή διαμόρφωσης χωρίς να χρειάζεται αλλαγές στην καλωδίωση
- Επεκτασιμότητα μολονότι μπορούμε να πετύχουμε σύνδεση πολλών γραμμών μέσω gateways
- Ενεργειακή αποδοτικότητα αφού είναι διαμορφωμένο και δομημένο κατασκευαστικά και λειτουργικά με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να έχουμε καλύτερη διαχείριση κατανάλωσης
- Αξιοπιστία όσον αφορά την ψηφιακή επικοινωνία με μικρότερη ευαισθησία σε θόρυβο
- Συντήρηση διότι δίνεται η δυνατότητα άμεσης διάγνωσης σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Το ασύρματο DALI αποτελεί μια σύγχρονη εξέλιξη του παραδοσιακού πρωτοκόλλου φωτισμού, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία, μειωμένο κόστος εγκατάστασης και δυνατότητα ενσωμάτωσης σε έξυπνα συστήματα. Παρότι αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται άμεσα με την ασύρματη επικοινωνία, η συνεχής ανάπτυξη προτύπων και τεχνολογιών καθιστά το ασύρματο DALI μία από τις πιο υποσχόμενες λύσεις για το μέλλον των έξυπνων κτιρίων και πόλεων. Η ανάπτυξη προτύπων όπως το IEC 62386-104 όπως επίσης και οι νέες προδιαγραφές για ενσωμάτωση των Bluetooth Mesh δείχνουν ότι το ασύρματο DALI αποτελεί βασικό άξονα εξέλιξης των συστημάτων φωτισμού. Η ενσωμάτωσή του πάνω σε οικοσυστήματα IoT και η χρήση τεχνολογιών όπως το DALI+ αναμένεται να οδηγήσουν σε πιο έξυπνα, αυτοματοποιημένα και ενεργειακά αποδοτικά κτίρια. Η επιλογή του ασύρματου DALI βασίζεται κυρίως στην ανάγκη για ευελιξία, μείωση κόστους και ενσωμάτωση σε σύγχρονα «έξυπνα» συστήματα (George K. Adam, 2019).

Η χρήση του ασύρματου DALI σε αντίθεση με το παραδοσιακό ενσύρματο DALI, επιτρέπει τη μετάδοση των εντολών χωρίς την ανάγκη εκτεταμένης καλωδίωσης, γεγονός που μειώνει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και τον χρόνο υλοποίησης. Αυτό το χαρακτηριστικό το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο σε περίπτωση ανακαίνισης ή αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού όπου η προσθήκη νέας καλωδιακής υποδομής είναι είτε δύσκολη είτε οικονομικά ασύμφορη. Τα βασικά δομικά στοιχεία του συστήματος είναι ο κεντρικός ελεγκτής ο οποίος αποτελεί την κύρια μονάδα διαχείρισης του συστήματος και είναι υπεύθυνος για την αποστολή εντολών προς τις



επιμέρους συσκευές και τη συλλογή πληροφοριών από αυτές. Ελέγχει όπως ο ενσύρματος έως και 64 συσκευές ανά γραμμή DALI, ενώ υποστηρίζει και ομαδοποίηση συσκευών καθώς και δημιουργία σεναρίων φωτισμού (George K. Adam, 2019).

Η λειτουργία του βασίζεται στην ίδια αρχιτεκτονική master-slave. Κάθε φωτιστικό ή ομάδα φωτιστικών συνδέεται με έναν ασύρματο κόμβο. Οι κόμβοι αυτοί περιλαμβάνουν έναν μικροελεγκτή και διεπαφή DALI που λειτουργούν ως μετατροπείς μεταξύ του ασύρματου δικτύου και του πρωτοκόλλου DALI. Οι ασύρματοι κόμβοι επιτρέπουν την επικοινωνία μέσω τεχνολογιών όπως το ZigBee. Η πύλη επικοινωνίας γνωστή ως gateway αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία του συστήματος, καθώς λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του DALI δικτύου και του ασύρματου ή IP δικτύου. Μεταφράζει δηλαδή τα δεδομένα από το πρωτόκολλο DALI σε μορφή κατάλληλη για ασύρματη μετάδοση και αντίστροφα (Francisco José Bellido-Outeiriño*, Francisco Javier Quiles-Latorre, Carlos Diego Moreno-Moreno, José María Flores-Arias, Isabel Moreno-García και Manuel Ortiz-López, 2016).

Το πρωτόκολλο έχει σχεδιαστεί για τον έλεγχο της έντασης φωτισμού, προσφέροντας ακρίβεια και ομαλές μεταβάσεις. Αυτή η δυνατότητα είναι κρίσιμη για φωτιστικά συστήματα αλλά δεν έχει ιδιαίτερη εφαρμογή σε άλλους τομείς. Το ασύρματο¹⁷ DALI προσφέρει αυξημένη ευελιξία, καθώς δίνει τη δυνατότητα εύκολης προσθήκης, αφαίρεσης ή μετακίνησης συσκευών χωρίς φυσικές παρεμβάσεις στο σύστημα. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπως σύγχρονα γραφεία και εμπορικοί χώροι, όπου οι ανάγκες μεταβάλλονται συχνά.

Το ασύρματο¹⁸ DALI υποστηρίζει τη δημιουργία υβριδικών συστημάτων, στα οποία συνδυάζονται ενσύρματες και ασύρματες υποδομές. Μέσω της χρήσης κατάλληλων gateways, μπορεί να επιτευχθεί η διασύνδεση διαφορετικών τεχνολογιών, διατηρώντας την αξιοπιστία του ενσύρματου συστήματος και παράλληλα αξιοποιώντας την ευελιξία της ασύρματης επικοινωνίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε μεγάλα έργα, όπου απαιτείται συνδυασμός σταθερότητας και προσαρμοστικότητας. Τέλος, η δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης και συντήρησης αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό λόγο επιλογής του ασύρματου DALI. Οι διαχειριστές μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, να εντοπίζουν βλάβες και να πραγματοποιούν παρεμβάσεις χωρίς φυσική παρουσία στον χώρο.

¹⁷ <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4883288/>

¹⁸ <https://www.buildings.com/smart-buildings/article/33017724/dali-platform-delivers-dali-lighting-control-with-wireless-and-ip-based-networking>



Αυτό οδηγεί σε μείωση του λειτουργικού κόστους και βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος (George K. Adam, 2019).

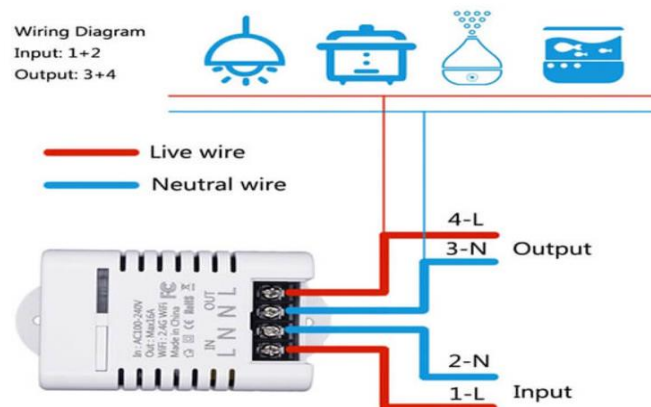
Στην περίπτωση της διασύνδεσης με το KNX, το ασύρματο DALI αναλαμβάνει αποκλειστικά τον έλεγχο φωτισμού, ενώ το KNX αναλαμβάνει τον ρόλο του κεντρικού συστήματος διαχείρισης του κτιρίου. Μέσω ειδικών DALI–KNX gateways, οι εντολές που παράγονται στο δίκτυο KNX μπορούν να μετατραπούν σε εντολές DALI και να αποσταλούν προς τα φωτιστικά σώματα. Αντίστοιχα, πληροφορίες που σχετίζονται με την κατάσταση των φωτιστικών, όπως βλάβες ή επίπεδα έντασης φωτισμού, μπορούν να επιστραφούν στο σύστημα KNX. Το KNX αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα αυτοματισμού που μπορεί να υποστηρίξει λειτουργίες ελέγχου φωτισμού χωρίς την ανάγκη χρήσης πρόσθετων πρωτοκόλλων. Ωστόσο, η ενσωμάτωση του DALI προσφέρει αυξημένη ακρίβεια ελέγχου, διευθυνσιοδότηση φωτιστικών και παροχή πληροφοριών κατάστασης. Επομένως, το DALI δεν αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία του KNX, αλλά χρησιμοποιείται συμπληρωματικά σε εφαρμογές όπου απαιτείται προηγμένος και αποδοτικός έλεγχος φωτισμού (Francisco José Bellido-Outeiriño*, Francisco Javier Quiles-Latorre, Carlos Diego Moreno-Moreno, José María Flores-Arias, Isabel Moreno-García και Manuel Ortiz-López, 2016).

Η σύνδεση με το πρωτόκολλο επικοινωνίας Zigbee λόγω ότι σχετίζονται με ασύρματες τεχνολογίες. Το Zigbee μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο μεταφοράς δεδομένων για το DALI, λειτουργώντας ως υποδομή επικοινωνίας, ενώ το DALI διατηρεί τον ρόλο του ως πρωτόκολλο ελέγχου φωτισμού. Μέσω Zigbee–DALI gateways, οι εντολές που προέρχονται από ασύρματους αισθητήρες ή συσκευές Zigbee μετατρέπονται σε εντολές DALI και εκτελούνται από τα φωτιστικά. Παράλληλα, με την εξέλιξη του προτύπου προς το DALI+, καθίσταται δυνατή η μεταφορά των εντολών DALI απευθείας μέσω ασύρματων ή IP δικτύων, ενισχύοντας ακόμη περισσότερο τη διαλειτουργικότητα με τεχνολογίες όπως το Zigbee (Parneet Dhillon & Harsh Sadawarti, 2014).

Η συνδυαστική χρήση των τριών αυτών πρωτοκόλλων οδηγεί στη δημιουργία υβριδικών συστημάτων αυτοματισμού, στα οποία κάθε τεχνολογία αξιοποιείται με βάση τα πλεονεκτήματά της. Το KNX παρέχει έναν αξιόπιστο και ολοκληρωμένο μηχανισμό κεντρικού ελέγχου, το DALI εξειδικεύεται στον ακριβή και αποδοτικό έλεγχο φωτισμού, ενώ το Zigbee προσφέρει ευέλικτη και χαμηλής κατανάλωσης ασύρματη επικοινωνία. Μέσω αυτής της ενοποίησης επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός αυτοματοποίησης, ενεργειακής αποδοτικότητας και ευκολίας διαχείρισης.

2.3.2 Έλεγχος φωτισμού με Zigbee και Z wave

Το ZigBee είναι ένα πρωτόκολλο¹⁹ ασύρματης μετάδοσης δεδομένων που χρησιμοποιείται για αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Όταν αναφερόμαστε στην αμφίδρομη επικοινωνία εννοούμε ότι η κάθε συσκευή έχει την δυνατότητα λήψης αλλά και λαβής ενός σήματος. Το συγκεκριμένο σύστημα δημιουργήθηκε την χρονιά 2022 από την Zigbee Alliance η οποία εξακολουθεί να ασχολείται και να το αναπτύσσει. Η κατασκευή του συστήματος είναι απλή, με χαμηλό κόστος και δεν απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, το εύρος μετάδοσης του σήματος κυμαίνεται από 10 έως 100 μέτρα εμβέλεια και παρέχει δυνατότητα προσθήκης συσκευών (Εικόνα 23).



Εικόνα 23 Σύστημα ελέγχου φωτισμού με Zigbee. Πηγή <https://www.e-shop.gr/coolseer-zigbee-circuit-breaker-col-wb03zb-30a-p-PER.208363>

Η οργάνωση του συστήματος zigbee μπορεί να γίνει με τρεις τυπολογίες που φέρουν την ονομασία πλέγμα, αστέρας και δέντρο. Το δέντρο είναι τυπολογία η οποία χαρακτηρίζεται από μια ιεραρχία. Αρχικά, υπάρχει ο συντονιστής ο οποίος έχει τον ρόλο της ρίζας. Η ρίζα ελέγχει όλους τους κόμβους του συστήματος οι οποίοι με την σειρά τους καταλήγουν στους εκτελεστές. Ο κάθε εκτελεστής είναι απομονωμένος με τους υπολοίπους και ο ρόλος του είναι να εκτελεί εντολές. Το πλέγμα δεν έχει ιεραρχία και αποτελεί καλύτερο οργανωτή εν αντιθέσει με τους άλλους, μολονότι οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους ή μέσω μιας συσκευής ενδιάμεσης. Το αστέρι είναι μια τυπολογία απλή που την συναντάμε και στα Bluetooth. Υπάρχει ο συντονιστής ως κεντρική μονάδα ενώ όλες οι υπόλοιπες συσκευές ακολουθούν τις εντολές του.

¹⁹ <https://www.andrianos.gr/gr/nea/arthra/diktyo-zigbee-%E2%80%93-ti-akribos-einai-kai-pou-xrisimopoietai>



Να σημειωθεί ότι οι συσκευές είναι φορητές και πως επικοινωνούν μόνο με τον συντονιστή (Shahin Farahani, 2008).

Οι συσκευές zigbee ανά χώρα δεν λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες και η λειτουργία τους είναι μακροχρόνια. Για παράδειγμα στην Αμερική λειτουργεί στα 915 MHz ενώ στην Ευρώπη στα 868 MHz φτάνοντας μέγιστη ταχύτητα τα 250 Kbps. Το zigbee είναι σχεδιασμένο με βάση το πρότυπο IEEE 802.15.4 βάση του οποίου καθορίζεται η μετάδοση του σήματος, πως πολλές συσκευές μπορούν να μοιραστούν το ίδιο κανάλι, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο εφαρμογής καθώς και τους μηχανισμούς ασφαλείας που διέπουν την ομαλή λειτουργία και διαχείρισης του δικτύου (Parneet Dhillon & Harsh Sadawarti, 2014).

Το zigbee δίκτυο δημιουργείται αυτόματα, γίνεται επαναπροσδιορισμός μηνυμάτων σε περίπτωση όπου κοπεί μια διαδρομή και υπάρχουν δύο βασικοί τύποι. Ο πρώτος τύπος φέρει την ονομασία full function device η οποία έχει πλήρη λειτουργικότητα δηλαδή μπορεί να εκτελέσει χρέη συντονιστή ή να γίνει κόμβος. Ο δεύτερος τύπος ονομάζεται reduced function device η οποία είναι μια απλή και φθηνή συσκευή (Shahin Farahani, 2008). Οι λαμπτήρες zigbee μπορούν να ρυθμίζονται από απόσταση και επικοινωνούν όλα μαζί μέσω του ίδιου zigbee δικτύου.

Το Z-Wave όπως και το zigbee είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματων ²⁰επικοινωνιών που χρησιμοποιείται κυρίως για οικιακό αυτοματισμό. Αποτελείται από ένα δίκτυο συσκευών το οποίο η λειτουργία του βασίζεται στα ραδιοκύματα χαμηλής ενέργειας με εύρους 800-900 MHz για την επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο ασύρματο έλεγχο όσον αφορά την έναυση των φωτιστικών σωμάτων. Το Z-Wave είναι ιδανική επιλογή για εφαρμογή έξυπνων σπιτιών.

Η εφαρμογή Z-Wave αναπτύχθηκε από δύο Δανούς μηχανικούς το 2001, και τα πρώτα προϊόντα κυκλοφόρησαν στο εμπόριο το 2004. Η z-Wave Alliance ιδρύθηκε το 2005 και στην σημερινή εποχή έχει έδρα την Καλιφόρνια. Η κύρια της αγορά είναι η Αμερική, λόγω των ραδιοσυχνοτήτων, οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες στα ευρωπαϊκά ή ασιατικά πρότυπα (μεταξύ 850 και 950 MHz, ενώ το ZigBee χρησιμοποιεί 2,4 GHz). Όλα τα προϊόντα Z-Wave χρησιμοποιούν το ίδιο τσιπ, το οποίο θα πρέπει να διασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα των προϊόντων, ωστόσο ενδέχεται να χρειαστούν αλλαγές και προσαρμογές στις εφαρμογές.

²⁰ <https://ggt.gr/el/brand/zwave-44>

Αυτή τη στιγμή, υπάρχουν περισσότερα από 2400 πιστοποιημένα προϊόντα που αναφέρονται στον ιστότοπο της Z-Wave Alliance (Bruno Bueno Unzeta, Jan de Boer, Ruben Delvaeye, Bertrand Deroisy, Marc Fontoynt, Daniel Neves Pimenta, Per Reinhold, Sophie Stoffer & Robert Weitlaner, 2021).

2.3.3 Έλεγχος φωτισμού με KNX

Το KNX είναι ένα τυποποιημένο σύστημα επικοινωνίας ελέγχου το οποίο δεν ελέγχει μόνο το σύστημα παραγωγής τεχνητού φωτισμού. Μαζί με το κύκλωμα φωτισμού μπορεί να ελέγξει για παράδειγμα τον εξαερισμό, την σκίαση ή το σύστημα κλιματισμού. Το KNX παρέχει την δυνατότητα παρακολούθησης ολόκληρου του συστήματος από απόσταση. Η λειτουργία του βασίζεται στη μεταφορά δεδομένων δηλαδή διαμέσου ξεχωριστής γραμμής ελέγχου η οποία απαρτίζεται από διπλό καλώδιο χαμηλής τάσης της τάξεως των 24V γίνεται η μεταφορά των επιθυμητών δεδομένων με ρυθμό 9.6 kbits/sec. Κατόπιν, ο λήπτης έχει την δυνατότητα να παράσχει ανατροφοδότηση πληροφοριών, κάθε συσκευή bus μεταβιβάζει πληροφορίες ανεξάρτητα και με σωστή επικοινωνία αποτρέπουμε τυχόν εμπόδια όσον αφορά την ορθή μεταφορά δεδομένων. Το KNX επίσης είναι ευέλικτο αφού επιτρέπει την εύκολη αλλαγή διαρρύθμισης και προγραμματισμού (Δούλος, 2013). Ένα έργο μπορεί να αποτελείται από 15 περιοχές όπου η κάθε περιοχή περιλαμβάνει μέχρι 16 γραμμές. Οι δε περιοχές όπως επίσης οι γραμμές έχουν γαλβανική απομόνωση και η σύνδεση τους γίνεται μέσω των προσαρμοστών περιοχής γραμμής που σημαίνει ότι η κάθε γραμμή απαιτεί δική της τροφοδοσία(Εικόνα 24).



Εικόνα 24 ABB I/O module for Use with KNX(TP) Bus System. Πηγή <https://za.rs-online.com/web/p/plc-accessories/2462707>



Όλα τα εξαρτήματα όπως είναι για παράδειγμα οι θερμοστάτες, οι αισθητήρες, τα φώτα ενώνονται σε ένα κοινό καλώδιο δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο τα εξαρτήματα επικοινωνούν μεταξύ τους δηλαδή, ο διακόπτης θα στείλει μήνυμα στο φως να ανάψει, ο αισθητήρας κίνησης, ενημερώνει τον θερμοστάτη ότι δεν υπάρχει παρουσία στο δωμάτιο ούτως ώστε να χαμηλώσει την θερμοκρασία και ο αισθητήρας φωτός όταν αντιληφθεί ότι στο δωμάτιο εισέρχεται ηλιακό φως τότε δίνει εντολή να κατέβουν τα ρολά. Το KNX πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων συστημάτων ελέγχου διότι συμβάλει στην μείωση κατανάλωσης έως 50%, είναι ευέλικτο ως προς την επέκταση του, συμβατό μεταξύ πολλών κατασκευαστών και προσφέρει μεγάλη άνεση στον χρήστη (Branko Dvoršak, Juraj Havelka, Elena Mainardi, Hrvoje Pandžić, Tea Selič & Mario Tretinjak, 2017).

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση εφαρμογών

3.1 Εφαρμογές πρωτοκόλλων knx zigbee dali

Η εφαρμογή²¹ των σύγχρονων πρωτοκόλλων όσον αφορά την έναυση και τον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού έχει αναθεωρήσει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα φωτιστικά όσο στους επαγγελματικούς χώρους όσο και σε απλές κατοικίες. Συστήματα όπως το KNX, το Zigbee και το Dali αποτελούν πλέον απαραίτητα εργαλεία για την εύρυθμη λειτουργία των συσκευών στη σημερινή εποχή όπως οι τεχνολογίες εξελίσσονται διαρκώς. Το κάθε σύστημα διαφέρει ως προς την χρήση, την συνδεσμολογία, στα σενάρια φωτισμού αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι δεν μπορούν να λειτουργήσουν συνδυαστικά ή να συνυπάρξουν σε ένα γραφείο, ή μια διώροφη κατοικία.

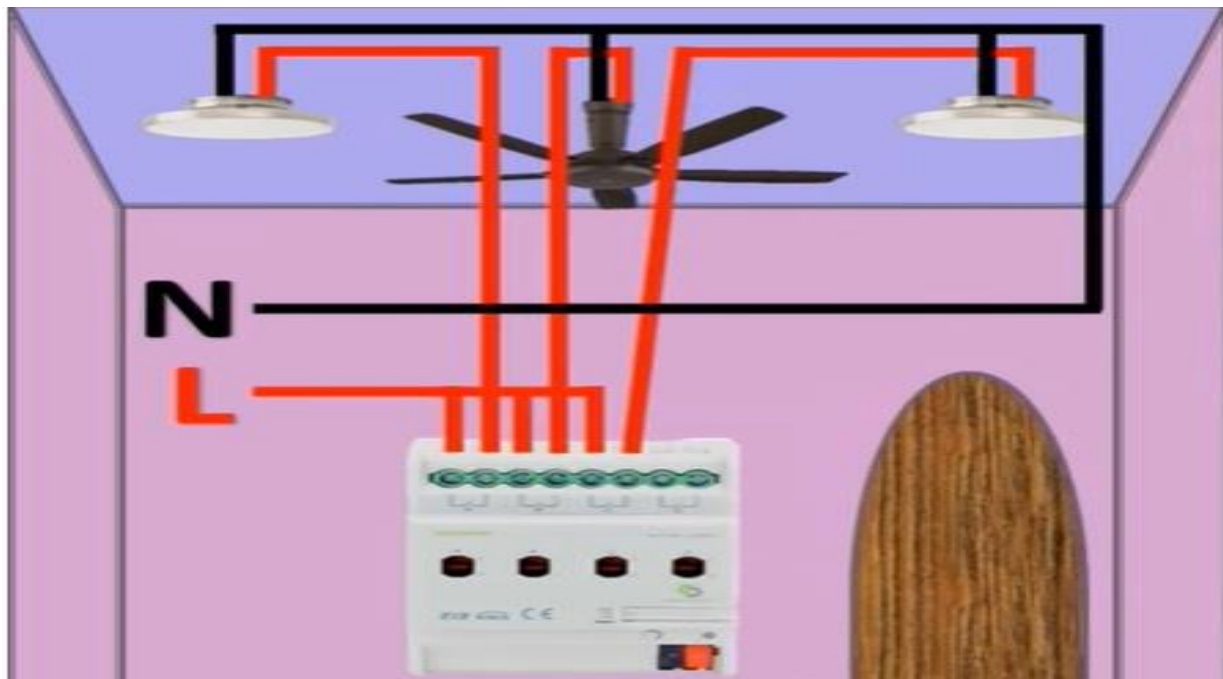
3.1.1 Εφαρμογή πρωτοκόλλου KNX

Το KNX επιτρέπει την επικοινωνία²² μεταξύ αισθητήρων, ελεγκτών και μέσων ενεργοποίησης όπως είναι για παράδειγμα τα bus και το ethernet. Η χρήση του σε κατοικίες εφαρμόζεται σε φωτισμό, ρολά κουρτίνας και θερμοκρασία δωματίου. Για παράδειγμα σε ένα διώροφο κτίριο μπορούμε να ελέγξουμε όλα τα αναφερόμενα φορτία με μία μόνο συσκευή. Η συνδεσμολογία μιας μονάδας KNX μας δείχνει ακριβώς τα μέρη τροφοδοσίας (Εικόνα 25). Η κεντρική παροχή έρχεται από έναν μικροαυτόματο της τάξης των 10A. Οι διατομές των αγωγών έχουν διατομή 1.5mm² (Αντωνόπουλος , Δημητρόπουλος & Μάρης, 2009). Από την πάνω πλευρά του συστήματος, φεύγουν όλες οι γραμμές και τροφοδοτούν με ρεύμα τις συσκευές που επιθυμούμε. Σκοπός της συνδεσμολογίας είναι ο πλήρης έλεγχος όλων των φορτίων ταυτόχρονα (Sapundzhi, 2020). Οι συνδεσμολογίες γίνονται παράλληλα γιατί θέλουν να έχουμε την τιμή της τάσης τροφοδοσίας σταθερή συν του ότι η κάθε γραμμή απαιτεί ξεχωριστή τροφοδοσία (Δροσόπουλος, 2005). Στην πλευρά όπου φαίνεται το μαύρο και το κόκκινο φεύγει το καλώδιο KNX και πηγαίνει με παράλληλη σύνδεση από διακόπτη σε διακόπτη (Εικόνα 26). Ο δε διακόπτης KNX έχει ενσωματωμένες επιλογές για το κάθε φορτίο ξεχωριστά ανάλογα με το τι ρύθμιση θές να κάνεις (Εικόνα 27).

²¹

https://www.researchgate.net/publication/327132460_Lighting_Control_Including_Daylight_and_Energy_Efficiency_Improvements_Analysis

²² <https://www.youtube.com/playlist?list=PLzNoc6bXDBj-HksDWteWYSAXj8uG1E70F>



Εικόνα 25 Συνδεσμολογία φορτίων και κεντρικής παροχής ενός δωματίου με σύστημα πρωτοκόλλου KNX. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/HCdMb1DJ_ZY



Εικόνα 26 Διακόπτες KNX παράλληλη σύνδεση καλωδίου. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/HCdMb1DJ_ZY



Εικόνα 27 Διακόπτης KNX. Πηγή https://www.instagram.com/p/CjSHJEWNqri/?img_index=2

Ο διακόπτης KNX μπορεί να είναι επιτοίχιος είτε ένας ενεργοποιητής συνδεδεμένος πάνω σε φορτία από όπου παίρνει εντολή από την μονάδα KNX (Εικόνα 28). Υπάρχει ένας αισθητήρας όπου ανιχνεύει κάποιο συμβάν δηλαδή μια αλλαγή θερμοκρασίας ή μια αλλαγή στον φωτισμό και στέλνει σήμα στο KNX. Η μονάδα λαμβάνει το μήνυμα, επεξεργάζεται την πληροφορία και αλλάζει την κατάσταση του φορτίου. Η καλωδίωση του bus συμβάλλει στην επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών. Η επεκτασιμότητα του συστήματος KNX δίνει την δυνατότητα επικοινωνίας μέσω μιας IP και ταυτόχρονα καθιστά το σύστημα ιδανικό για εφαρμογή σε μεγάλα και σύνθετα κτίρια.



Εικόνα 28 Καυκάς theben KNX πολυλειτουργικό μπουτόν iON 104 KNX BK Μαύρο 4 πλήκτρα και 4 ενδεικτικά led 4969244.



Μια υποδειγματική εφαρμογή του συστήματος KNX συναντάμε στην κατασκευή ενός θέρετρου στην πόλη της Πάφου. Το σύστημα είναι οργανωμένο σε πολλαπλούς πίνακες διανομής ανά χώρο και όροφο (Εικόνα 29). Όπως παρατηρούμε το σχέδιο παρατηρούμε κώδικες όπου αναφέρονται σε γραμμές²³ και line couplers. Το σχέδιο χωρίζει τους χώρους σε ζώνες και ονοματίζει τους ηλεκτρολογικούς πίνακες βάση των περιοχών. Αυτό γίνεται με σκοπό να διαχωρίσει ανά λειτουργική περιοχή με ξεχωριστούς ηλεκτρολογικούς πίνακες και αντίστοιχες μονάδες KNX. Η συγκεκριμένη συσκευή αποτελεί μια γέφυρα η οποία συνδέει δύο γραμμές KNX μαζί τους και επιτρέπει την μεταφορά μόνο των απαραίτητων τηλεγραφημάτων ανάμεσα στις γραμμές κι όχι όλης της κυκλοφορίας. Το σχέδιο περιλαμβάνει επίσης, τροφοδοσίες, καλωδίωση τύπου KNX τεσσάρων πυρήνων καλωδίου για σύνδεση bus, modules των 16 καναλιών, των 8 καναλιών καθώς και τύπους με 12/4 κανάλια.

Πέραν των εξαρτημάτων του KNX η εγκατάσταση περιλαμβάνει πολλαπλά κλειδιά πάνελ τεσσάρων μπουτόν με λογικούς αριθμούς τα οποία χρησιμεύουν για χειρισμό, πολλαπλές οθόνες αφής των 10 ιντσών με σταθερές IP διευθύνσεις, server και IP modules όπου αναφέρονται με καταγεγραμμένες IP διευθύνσεις και πολλαπλοί αισθητήρες παρουσίας σε όλα τα μέρη του θέρετρου. Το σύνολο εγκατάστασης του εξοπλισμού αποσκοπεί στον έλεγχο φωτισμού δηλαδή επιθυμητό ντιμάρισμα σε περιοχές όπως το spa, τα treatment rooms, δημιουργία σκηνών από φωτισμό, στην ανίχνευση παρουσίας για αυτόματο σβήσιμο φωτισμού σε WC, κουζίνες και χώρους κοινής χρήσης, τοπικούς χειρισμούς και κεντρική επιτήρηση διαμέσου των οθονών αφής και των server.

Από όλα τα μέρη του ξενοδοχείου επέλεξα να ασχοληθώ με την εγκατάσταση του πρώτου και του δεύτερου ορόφου όσον αφορά τα συστήματα του KNX και όχι τον ακριβή αριθμών των φορτίων που επρόκειτο να ελέγχει. Ο παρακάτω πίνακας αποτελεί δημιούργημα του Ηλεκτρολόγου μελετητή και εγκαταστάτη Θειοφάνους Ιωάννη και περιλαμβάνει τα εξαρτήματα KNX που θα χρησιμοποιηθούν στους συγκεκριμένους χώρους όπως επίσης και το συνολικό κόστος όσον αφορά την αγορά των προϊόντων, τον προγραμματισμό και τον αριθμό των υλικών.

²³ <https://www.mdt-group.com/products/product-detail/system-devices/system-devices/line-coupler.html>



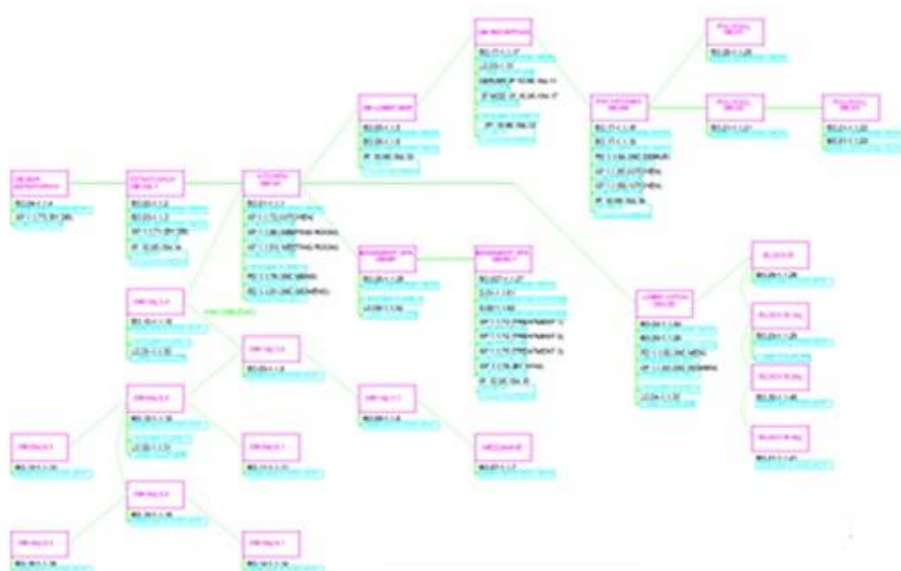
Πίνακας 3.1 Ποσότητες modules και κοστολόγηση Α ορόφου

A/A	A ΟΡΟΦΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ
1	Power Supply 64mA -DB-2os.2	1	€ 165,00	€ 165,00
2	Line Coupler -DB-2os.2	1	€ 200,00	€ 200,00
3	Module 8 chane on/off-DB-1os.1	1	€ 155,00	€ 155,00
4	Module 4 chane on/off-DB-1os.2	1	€ 110,00	€ 110,00
5	Module 4 chane on/off-DB-1os.3	1	€ 110,00	€ 110,00
6	Module 4 chane on/off-DB-2os.1	1	€ 110,00	€ 110,00
7	Module 4 chane on/off-DB-2os.2	1	€ 110,00	€ 110,00
8	Module 4 chane on/off-DB-2os.3	1	€ 110,00	€ 110,00
9	Module 4 chane on/off-DB-3os.1	1	€ 110,00	€ 110,00
10	Module 4 chane on/off-DB-3os.2	1	€ 110,00	€ 110,00
11	Module 4 chane on/off-DB-3os.3	1	€ 110,00	€ 110,00
12	Bus Cable (design base) BY OTHERS	0		€ -
13	installation for all equipment BY OTHERS	0		€ -
14	Programming for all equipment	1	€ 125,00	€ 125,00
	ΣΥΝΟΛΟ ΠΑΡΑΤΗΜΑΤΟΣ:			€ 1.525,00



Πίνακας 3.2 Ποσότητες modules και κοστολόγηση ΈΒ ορόφου

A/A	B ΟΡΟΦΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΣΥΝΟΛΟ
1	Power Supply 64mA -DB-BLOCK B-1os.1	1	€ 165,00	€ 165,00
2	Line Coupler -DB-BLOCK B-1os.1	1	€ 200,00	€ 200,00
3	Module 4 chane on/off-DB-BLOCK B-1os.1	1	€ 110,00	€ 110,00
4	Module 4 chane on/off-DB-BLOCK B-1os.2	1	€ 110,00	€ 110,00
5	Module 4 chane on/off-DB-BLOCK B-1os.3	1	€ 110,00	€ 110,00
6	Bus Cable (design base) BY OTHERS	0		€ -
7	installation for all equipment BY OTHERS	0		€ -
8	Programming for all equipment	1	€ 125,00	€ 125,00
	ΣΥΝΟΛΟ ΠΑΡΑΤΗΜΑΤΟΣ:			€ 695,00



Εικόνα 29 Προσωπικό αρχείο Θεοφάνους Ιωάννη. Μελέτη και κατασκευή συστήματος KNX.

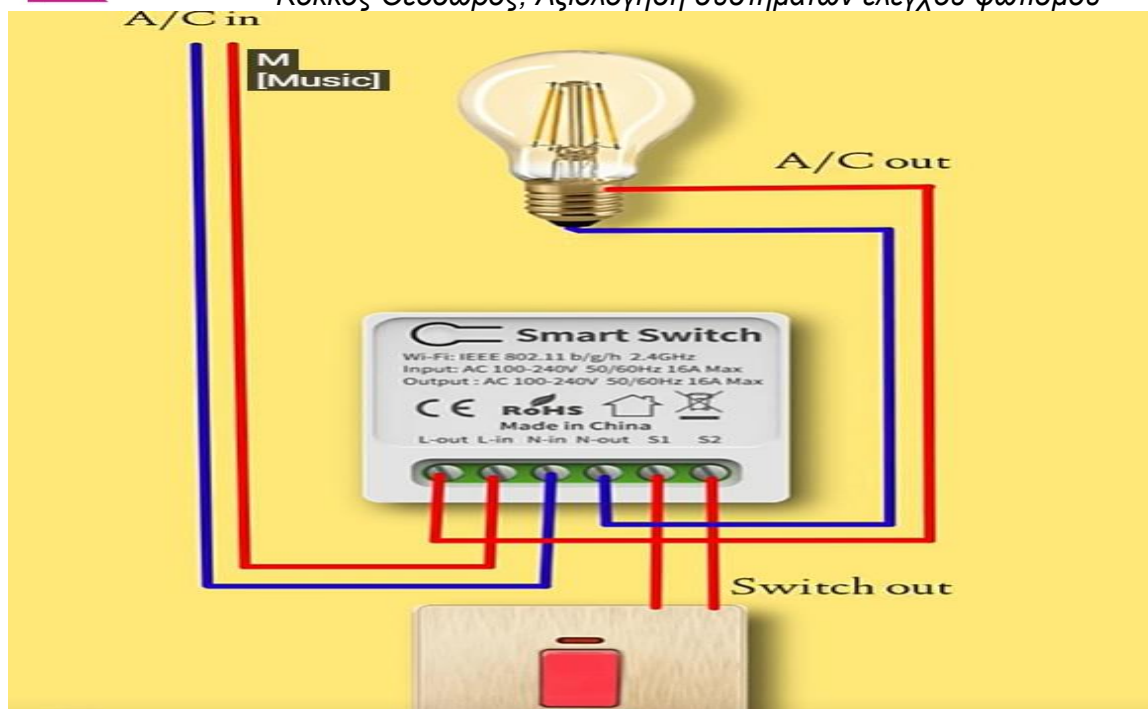


3.1.2 Εφαρμογή πρωτοκόλλου ZigBee

Το zigbee πρόκειται για ένα πρότυπο χαμηλής ισχύος και κόστους συνάμα και σχετίζεται με ασύρματα δίκτυα μικρής εμβέλειας. Η χρήση του αποσκοπεί για να ελέγχει ένα κύκλωμα φωτισμού μια κουρτίνα ρολό και αισθητήρες μέσω Wi-Fi από το κινητό τηλέφωνο. Το σύστημα αποτελείται από μικρές συσκευές που οργανώνονται μόνες σε δίκτυο, έχουν χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, η κατανάλωση τους απαιτεί λίγη ενέργεια και υποστηρίζουν ασφάλεια με κρυπτογράφηση AES. Το IEEE802.15.4 αποτελεί το πρότυπο πάνω στο οποίο έχει σχεδιαστεί η βάση του zigbee και περιλαμβάνει δύο επίπεδα. Το MAC διαχειρίζεται την μετάδοση δεδομένων και το PHY ελέγχει την ραδιοεπικοινωνία (Ken Masica, 2007).

Ολόκληρο το σύστημα αποτελείται από τον συντονιστή ο οποίος είναι ο αρχηγός του δικτύου, ένα router για να προωθούνται τα δεδομένα, συσκευές τερματισμού, ένα κεντρικό σημείο ασφαλείας και μια πύλη εξόδου η οποία συνδέει το zigbee με άλλα δίκτυα. Το zigbee μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον το δίκτυο χωρίζεται από άλλα συστήματα, προστατεύεται το trust center, εφαρμόζονται ορθά οι μηχανισμοί κρυπτογράφησης και τα κλειδιά όπως επίσης ακολουθούνται οι πρακτικές σχεδίασης και ασφαλείας του εκάστοτε οδηγού (Ken Masica, 2007).

Μια εφαρμογή της τεχνολογίας zigbee περιγράφεται στο ακόλουθο παράδειγμα έναυσης ενός φωτιστικού σώματος. Η διατομή που χρησιμοποιείται για την ενσύρματη εγκατάσταση έχει διατομή 1.5 mm^2 . Το σύστημα έχει θύρες εισόδου από όπου εισέρχεται το ρεύμα από τον μικροαυτόματο της τάξεως των 10A και από τις θύρες εξόδου καταλήγει στον λαμπτήρα. Στις επαφές S1 και S2 ενώνονται οι χειροκίνητοι διακόπτες (Εικόνα 30). Το σύστημα επιτρέπει έναυση χειροκίνητα είτε μέσω της εφαρμογής με κινητό τηλέφωνο. Η συσκευή zigbee ενώνεται στο εσωτερικό του διακόπτη στην προκειμένη φάση (Εικόνα 31).



Εικόνα 30 Κύκλωμα φωτισμού με zigbee. Πηγή <https://www.youtube.com/shorts/wf9fy42cGtg>



Εικόνα 31 Εφαρμογή συστήματος Zigbee και ηλεκτρολογική εγκατάσταση εσωτερικά του διακόπτη. Πηγή <https://www.youtube.com/shorts/WmFco3CNyJU>

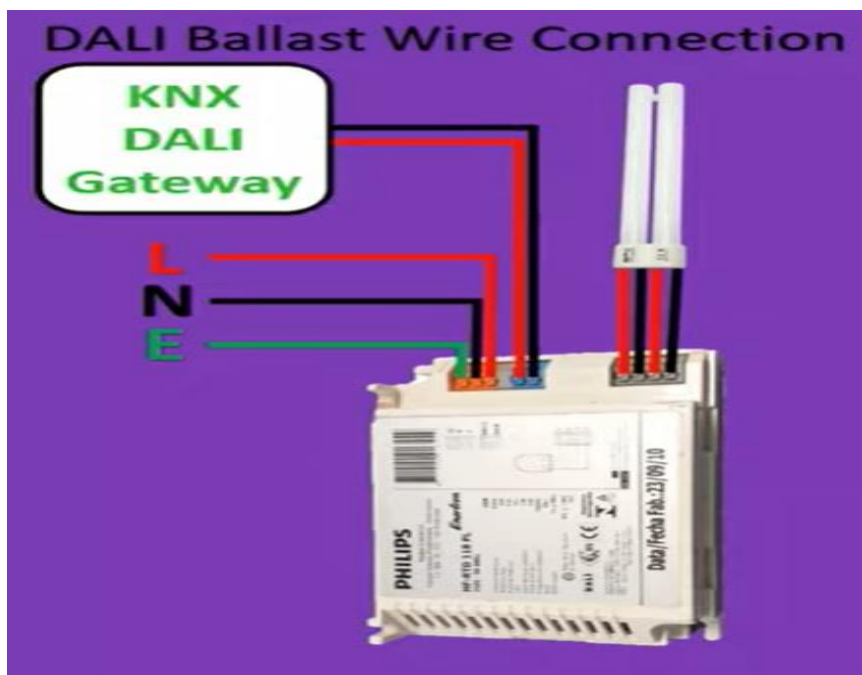


3.1.3 Εφαρμογή πρωτοκόλλου Dali

Το DALI αποτελεί ένα εξειδικευμένο πρωτόκολλο φωτισμού πάνω στο ντιμάρισμα φωτιστικών σωμάτων βάση του οποίου πετυχαίνουμε ακριβή πλήρης ψηφιακό έλεγχο όσον αφορά την ρύθμισης της έντασης φωτισμού και δημιουργίας σεναρίων φωτισμού υψηλής απόκρισης επειδή διαχωρίζει τα φωτιστικά ανά ομάδες. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, ενδείκνυται για χώρους όπου απαιτείται έντονη ανάγκη δυναμικού φωτισμού, όπως είναι για παράδειγμα συνεδριακές αίθουσες, γραφεία και εμπορικά καταστήματα. Επιπλέον, συνδυάζεται και με ένα πρωτόκολλο φωτισμού όπως το KNX. Επίσης, τα κόστη ενέργειας, εγκατάστασης, η δαπάνη εργατωρών μειώνεται σημαντικά και αποτελεί σύγχρονο πρότυπο σε εφαρμογές έξυπνων σπιτιών (Advance by signify, 2019).

Η συνδεσμολογία του συστήματος dali δίνεται από το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 32). Όπως παρατηρούμε το σχήμα στην είσοδο του dali έρχεται η παροχή διατομής 1.5mm^2 από έναν μικροαυτόματο της τάξης των 10A. Κατόπιν μεταξύ εισόδου και εξόδου μεσολαβεί η θύρα από όπου το dali συνδέεται με το πρωτόκολλο του KNX. Στην έξοδο του dali συνδέουμε το φωτιστικό σώμα. Το δε φωτιστικό²⁴ σώμα αποτελείται από τέσσερις αγωγούς. Οι δύο πρώτοι αγωγοί έχουν να κάνουν με αγωγή φάσης και αγωγή ουδετέρου οι οποίοι τροφοδοτούν το φωτιστικό με ρεύμα ενώ οι επόμενοι δύο αγωγοί έχουν να κάνουν με την λειτουργία dali που σημαίνει ότι το πρωτόκολλο δεν μπορεί να δεχτεί φωτιστικό που δεν υποστηρίζει το σύστημα dali.

²⁴ <https://logoslighting.com/blog/how-does-dali-lighting-work-a-comprehensive-guide/>



Εικόνα 32 Ηλεκτρολογική εγκατάσταση DALI. Πηγή https://www.youtube.com/shorts/HCdMb1DJ_ZY

Εφαρμογή του συστήματος dali συναντάμε σε γνωστό ξενοδοχείο στην πόλη της Λεμεσού. Το εστιατόριο, όλα τα εσωτερικά μαγαζιά, το spa, ο χώρος γυμναστικής, η αίθουσα δεξιώσεων, η ρεσεψιόν και οι κεντρικοί διάδρομοι ελέγχονται από σύστημα dali. Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τον πλήρη έλεγχο των φωτιστικών σε όλες τις αναφερόμενες περιοχές προέρχονται από την εταιρεία Lutron lifestyle, έχουν διαφορετικούς κωδικούς ανά μοντέλο όπως επίσης διαφορετική χρήση. Η Lutron με το μοντέλο ²⁵LQSE-2DAL-D μπορεί να πραγματοποιήσει έλεγχο της ρύθμισης έντασης φωτισμού συμβατή με το πρότυπο DALI. Υποστηρίζει μοναχά δύο ζώνες μεταγωγής και ένα κανάλι ρύθμισης έντασης φωτισμού 0-10 V, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο έως και 128 στραγγαλιστικών πηνίων ή οδηγών συμβατών με το πρότυπο DALI (Εικόνα 33). Το μοντέλο²⁶ QSN-4T5-120-D αποτελεί μονάδα ελέγχου φωτισμού που διαχειρίζεται μέχρι τέσσερις ζώνες φωτισμού. Μπορεί να συνδεθεί στο σύστημα Lutron quantum ή Lutron savr node και ελέγχει ντιμαριζόμενα φωτιστικά (Εικόνα 34).

²⁵ https://iqelectro.com/products/lqse-2dal-d-lutron-dimming-control-module?srltid=AfmBOoqlJL_bJWZRts55e514dNNzrch46ijXG9i_TXAT7xmsWWLVpWqQ

²⁶ <https://www.bimobject.com/en/lutronelectronics/product/lutron-athena-qsn-4t5-120-d>



Εικόνα 33 Μοντέλο LQSE-2DALUNV-D της εταιρείας Lutron lifestyle για dimmable φωτισμό. Πηγή <https://wesellstocks.co/products/lutron-homeworks-q5-lqse-2dal-d-dali-power-module>



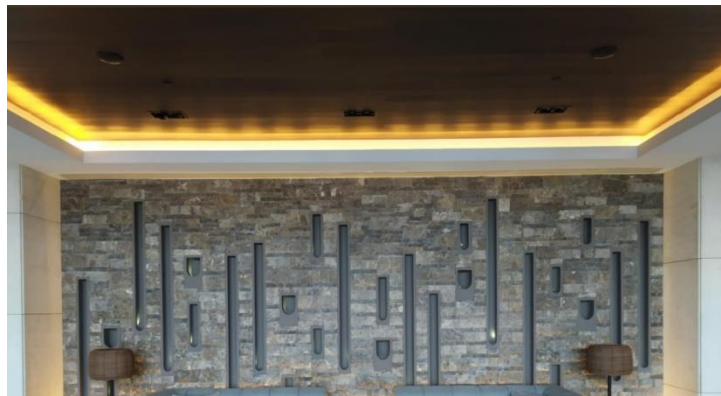
Εικόνα 34 Μοντέλο QSN-4T5-120-D της εταιρείας Lutron lifestyle για dimmable φωτισμό. Πηγή <https://www.bimobject.com/es/lutronelectronics/product/lutron-athena-qsn-4t5-120-d>



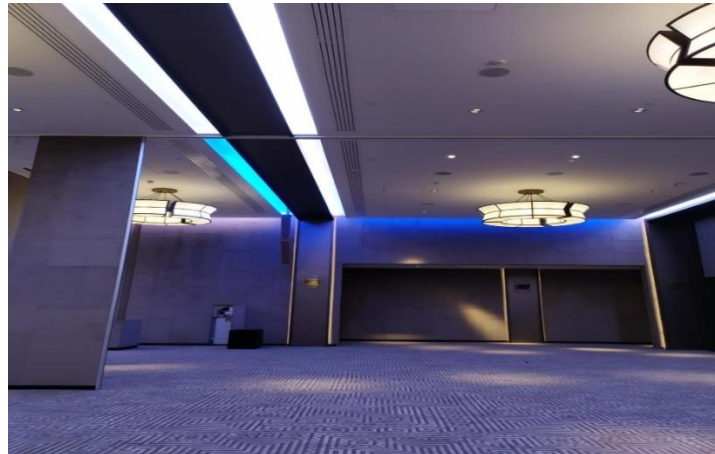
Οι drivers ήταν όλοι τύπου dali και διαφορετικής ισχύος λόγω της μεγάλης ποικιλίας από φωτιστικά (Εικόνα 35). Ιδιαίτερα για σημεία όπου η φωταγωγήση γινόταν από λεντοταινία, η επιλογή της ισχύος driver γινόταν με γνώμονα το μήκος της εκάστοτε ταινίας δηλαδή υπήρχαν περιοχές με τροφοδοσία 35W, 100W, 150W και 200W λόγω ότι η ισχύς της φωτεινής γραμμής αντιστοιχούσε σε 5 W/m (Εικόνα 36). Ακόμα και σε περιπτώσεις όπου έπρεπε βάση σχεδίου να έχουμε χρωματικές δέσμες φωτισμού όπως έγινε στην αίθουσα των δεξιώσεων υπήρχαν φωτιστικά σώματα με τροφοδοσία dali driver RGBW (Εικόνα 37).



Εικόνα 35 Εστιατόριο ξενοδοχείου. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.



Εικόνα 36 Κεντρική αναμονή ξενοδοχείου. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.



Εικόνα 37 Αίθουσα δεξιώσεων ξενοδοχείου. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.

Μια περίπτωση εφαρμογής ασύρματου dali πραγματοποιήθηκε με επιτυχία σε δύο πόλεις στην επαρχία της Κόρδοβα, στην περιοχή της Ανδαλουσίας στη νότια Ισπανία. Βασικός στόχος του συστήματος ήταν να κάνει τον φωτισμό πιο αποδοτικό, πιο οικονομικό και πιο εύκολο στη διαχείριση. Κάθε φωτιστικό δρόμου διέθετε έναν ασύρματο κόμβο. Αυτός ο κόμβος, αποτελεί μια μικρή συσκευή που συνδέεται με τη λάμπα και επιτρέπει την επικοινωνία της με το υπόλοιπο δίκτυο. Οι ερευνητές δεν χρησιμοποίησαν έτοιμες συσκευές, αλλά σχεδίασαν τη δική τους, γιατί οι υπάρχουσες δεν κάλυπταν τις ανάγκες τους. Ο κόμβος αυτός περιλαμβάνει έναν μικροελεγκτή, ένα σύστημα τροφοδοσίας, μια διεπαφή DALI και μια ασύρματη μονάδα επικοινωνίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούσε να ελέγχει τη λάμπα και να επικοινωνεί με άλλους κόμβους. Όλοι οι κόμβοι μαζί αποσκοπούσαν στη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου, μέσω του οποίου θα μεταφέρονται τα δεδομένα. Το σύστημα ελεγχόταν από ένα κεντρικό λογισμικό (SCADA), το οποίο επέτρεπε στον χρήστη να παρακολουθεί την κατάσταση όλων των λαμπτήρων και να τους ελέγχει από απόσταση. Με αυτό τον τρόπο, μπορούσε ο εκάστοτε τεχνικός να δει αν ένα φως είναι αναμμένο, αν υπάρχει τυχόν κάποια βλάβη ή να αλλάξει ακόμα την φωτεινότητά του. Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής για κινητά, οι τεχνικοί είχαν την δυνατότητα να βρίσκουν εύκολα τη θέση του φωτιστικού. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του συστήματος ήταν η δυνατότητα ρύθμισης της έντασης φωτισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας, δηλαδή τα φώτα θα λειτουργούσαν πιο έντονα όταν υπάρχει περισσότερη κίνηση και να χαμηλώνουν αργότερα. Οι δε δοκιμές, τόσο στο εργαστήριο όσο και στην πόλη έδειξαν ότι το σύστημα λειτουργεί σωστά. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, που μπορεί να φτάσει περίπου το 30% έως 40% σε σχέση με παραδοσιακά συστήματα φωτισμού.



Αυτό σημαίνει χαμηλότερο κόστος και μικρότερη επιβάρυνση για το περιβάλλον (Francisco José Bellido-Outeiriño*, Francisco Javier Quiles-Latorre, Carlos Diego Moreno-Moreno, José María Flores-Arias, Isabel Moreno-García και Manuel Ortiz-López, 2016).

3.2 Ερευνητικά έργα και πειραματικές εγκαταστάσεις

Στον τομέα των σύγχρονων συστημάτων έναυσης και διαχείρισης φωτισμού έχουν πραγματοποιηθεί εκτεταμένες ερευνητικές δραστηριότητες και πειραματικές δοκιμές, με βασικό στόχο την αξιολόγηση των τεχνολογιών αυτοματισμού και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε «έξυπνα» κτίρια. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στα πρωτόκολλα Zigbee και KNX, τα οποία αποτελούν δύο από τις πλέον διαδεδομένες λύσεις για τον έλεγχο φωτισμού και γενικότερα για εφαρμογές αυτοματισμού κτιρίων. Οι πειραματικές εγκαταστάσεις που έχουν υλοποιηθεί περιλαμβάνουν τόσο εργαστηριακά περιβάλλοντα όσο και πραγματικές συνθήκες χρήσης, όπως κατοικίες, επαγγελματικούς χώρους, γραφεία και εκπαιδευτικά ή ερευνητικά κέντρα. Στα εργαστήρια, οι ερευνητές έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν με ακρίβεια παραμέτρους όπως η ένταση φωτισμού, η κατανάλωση ενέργειας, η καθυστέρηση απόκρισης των εντολών και η αξιοπιστία της επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών. Παράλληλα, σε πραγματικές εγκαταστάσεις, αξιολογείται η συμπεριφορά των συστημάτων σε καθημερινή χρήση, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι παρεμβολές, η απόσταση μεταξύ των κόμβων και οι συνθήκες περιβάλλοντος. Ένα από τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των συστημάτων αυτών είναι η αποδοτικότητα, τόσο από ενεργειακής όσο και από λειτουργικής πλευράς. Οι μελέτες δείχνουν ότι η χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με αισθητήρες κίνησης, ένταση φωτισμού και παρουσίας. Το Zigbee, ως ασύρματο πρωτόκολλο χαμηλής κατανάλωσης, παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε ευελιξία και ευκολία εγκατάστασης, ενώ το KNX, που μπορεί να λειτουργήσει τόσο ενσύρματα όσο και ασύρματα, ξεχωρίζει για την αξιοπιστία και τη σταθερότητα του σε μεγαλύτερες και πιο απαιτητικές εγκαταστάσεις.



Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στις έρευνες διαδραματίζει η ποιότητα της δέσμης φωτός που παράγεται από τα φωτιστικά σώματα που ελέγχονται μέσω αυτών των πρωτοκόλλων. Παράμετροι όπως η ομοιομορφία φωτισμού, η θερμοκρασία χρώματος, η απόδοση χρωμάτων (CRI) και η δυνατότητα ρύθμισης της έντασης (dimming) εξετάζονται λεπτομερώς. Οι σύγχρονες εφαρμογές απαιτούν όχι μόνο ενεργειακή απόδοση αλλά και υψηλή ποιότητα φωτισμού, ιδιαίτερα σε χώρους εργασίας όπου η άνεση και η παραγωγικότητα των χρηστών επηρεάζονται άμεσα από το φωτιστικό περιβάλλον.

Τέλος, οι συγκριτικές μελέτες καταλήγουν στο ότι δεν υπάρχει μία καθολικά «καλύτερη» λύση, αλλά η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε εγκατάστασης. Το Zigbee θεωρείται ιδανικό για μικρότερες ή οικιακές εφαρμογές λόγω της ευκολίας εγκατάστασης και του χαμηλού κόστους, ενώ το KNX προτιμάται σε μεγάλης κλίμακας έργα, όπως εμπορικά κτίρια και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία και επεκτασιμότητα. Συνολικά, τα ερευνητικά έργα συμβάλλουν σημαντικά στη βελτίωση των τεχνολογιών φωτισμού και στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών και «έξυπνων» ενεργειακών λύσεων.

3.2.1 Πειραματικές έρευνες

Ο κοινός ψηφιακός έλεγχος φωτισμού παγκοσμίως, είναι το DALI. Το DALI καθορίζεται από μια σειρά τεχνικών²⁷ προτύπων στο IEC 62386 τα οποία επιβεβαιώνουν ότι ο εξοπλισμός θα λειτουργεί ασχέτως τον προμηθευτή. Βέβαια, η χρήση φωτισμού μέσω ενός συστήματος KNX παρουσιάζει ομοιότητες με το DALI. Οι συσκευές από διαφορετικούς κατασκευαστές μπορούν να λειτουργούν ομαλά λόγω ότι τα προϊόντα υποβάλλονται αλληπάλληλες δοκιμές από διαφορετικά εργαστήρια δοκιμών ούτως ώστε να εξασφαλίσουν την σωστή λειτουργία του συστήματος. Η σύγκριση μεταξύ KNX και DALI σε επίπεδο συστήματος, επιβεβαιώνει ότι το KNX υπερτερεί του συστήματος DALI.

²⁷ <https://meanwellpowersupplies.com/technical-articles/building-automation/better-than-dali-knx-lighting/?utm>

Πίνακας 3.3 Πλεονεκτήματα- μειονεκτήματα συστημάτων ελέγχου
φωτισμού

Στοιχείο	KNX LED Driver	DALI Gateway + LED Driver
Κόστος συστήματος	Άμεσο KNX, χαμηλότερο κόστος	Απαιτείται πύλη DALI, υψηλότερο κόστος
Αξιοπιστία	Κάθε συσκευή είναι ανεξάρτητη, μια μεμονωμένη βλάβη δεν επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος	Σε περίπτωση βλάβης της πύλης DALI, ολόκληρο το σύστημα φωτισμού τίθεται εκτός ελέγχου
Συμβατότητα	Το KNX εξασφαλίζει τη συμβατότητα	Οι διαφορετικές μάρκες πυλών DALI μπορεί να έχουν προβλήματα συμβατότητας με τους DALI LED Drivers
Αριθμός κόμβων	256 (1 γραμμή bus, TP1-256)	64 (1 γραμμή DALI bus)
Απόσταση μετάδοσης	700 μ.	300 μ.
Ρυθμός επικοινωνίας	9600 bps	1200 bps
Ευκολία ρύθμισης	Βάση δεδομένων KNX (ETS)	Βάση δεδομένων KNX (ETS) + ρύθμιση DALI
Ασφάλεια	Επεκτάσιμη KNX Secure	Καμία
Άλλα	Π.χ.: Χρόνος λειτουργίας / Κατανάλωση ενέργειας	Καμία

Βάση των ερευνών²⁸ που έχουν γίνει με την πάροδο του χρόνου έχει αποδειχθεί ότι κανένα σύστημα δεν υπερτερεί έναντι των άλλων. Η ορθή επιλογή ενός συστήματος εξαρτάται από το είδος του κτιρίου, το ποσό που μπορεί να διαθέσει κάποιος ούτως ώστε να επιλέξει ένα σύστημα ελέγχου, το επιθυμητό επίπεδο αυτοματισμού καθώς και τις συνθήκες εγκατάστασης.

²⁸ <https://www.qub.nl/en/faq/qub-blog/when-to-choose-which-dimming-technology/>



Ωστόσο η χρήση των συστημάτων έναυσης μπορεί να φέρει μελλοντικά οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά οφέλη. Η επιλογή²⁹ μεταξύ KNX και Zigbee εξαρτάται από το εύρος, την πολυπλοκότητα και τους μακροπρόθεσμους στόχους του έργου. Το KNX είναι ιδανικό για εγκαταστάσεις επαγγελματικής ποιότητας που απαιτούν σταθερότητα, ενσωμάτωση με ενσύρματα συστήματα και μακροπρόθεσμη υποστήριξη εν αντιθέσει με το σύστημα Zigbee είναι ιδανικό για οικονομικά αποδοτικά, έξυπνα σπίτια σε επίπεδο καταναλωτή που δίνουν προτεραιότητα στην γρήγορη εγκατάσταση και την ευελιξία. Μολονότι η εφαρμογή Zigbee είναι ιδανική για ανθρώπους που τους αρέσουν να φτιάχνουν μόνοι τους πράγματα, το KNX είναι η επιλογή για τους επαγγελματίες των κλάδων της Ηλεκτρονικής όπως επίσης και της Ηλεκτρολογίας. Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε πρωτόκολλου αναγράφεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά πρωτοκόλλων

Τεχνολογική Επικοινωνία	Επικοινωνία	Τυπική εφαρμογή	Πλεονεκτήματα	Θεωρήσεις
Zigbee	Με δίκτυο	Έξυπνο σπίτι	Ασύρματο	Απαιτεί πύλη/γέφυρα
KNX	Σύστημα Bus	Αυτοματισμοί κτιρίων	Προηγμένη τεχνολογία	Απαιτεί πιστοποίηση
DALI	Ψηφιακό Bus	Γραφεία φωτισμός έργων	Ατομικός έλεγχος	Ζητείται ειδικός

3.2.2 Μετρήσεις απόδοσης αισθητήρων και αξιολόγηση συστημάτων

Η έναυση των φωτιστικών σωμάτων όσον αφορά τα έξυπνα σπίτια έχει να κάνει με την αξιοποίηση των σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών και με τον όρο σύγχρονες εφαρμογές κάνουμε αναφορά στην χρήση αισθητήρων. Οι αισθητήρες ποικίλουν ανάλογα με το είδος της λειτουργίας δηλαδή η ενεργοποίηση τους γίνεται με την δύση του ηλίου, είτε με την διαφορά θερμοκρασίας στον εκάστοτε περιβάλλοντα χώρο ή με την μεταφορά ηχητικών κυμάτων. Για παράδειγμα, σε ένα διάδρομο ξενοδοχείου ένας αισθητήρας που ανιχνεύει την διαφορά θερμοκρασίας³⁰ όπως είναι οι αισθητήρες

²⁹ <https://www.knxhub.com/knx-rf-vs-zigbee-comparison/>

³⁰ <https://csc-led.com/media-hub/pir-vs-microwave-motion-sensors-which-is-right-for-your-lighting-project?utm>

τύπου PIR είναι κατάλληλος για την έναυση των φωτιστικών διότι ανιχνεύει την ανθρώπινη παρουσία μέσω θερμικής ακτινοβολίας. Ο αισθητήρας τοποθετείται συνήθως οροφή αλλά τον συναντάς και τοποθετημένο στον πλαϊνό τοίχο (Εικόνα 38). Η τοποθέτηση του αποφεύγεται να είναι κοντά σε πόρτες. Επιπλέον, παρέχει δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου παραμονής δηλαδή τα φώτα να μένουν αναμμένα για δευτερόλεπτα ή λεπτά.



Εικόνα 38 Αισθητήρας PIR. Πηγή <https://www.istockphoto.com/photo/motion-sensor-or-detector-for-security-system-mounted-on-wall-gm541851046-96902479?searchscope=image%2Cfilm>

Για τον οδοφωτισμό καλύτερη επιλογή είναι ο αισθητήρας με φωτοκύτταρο γνωστός σαν photo sensor ή light sensor. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας ανιχνεύει την ένταση του φυσικού φωτός και όταν δύσει ο ήλιος ή η ένταση μειωθεί σημαντικά ανάλογα με την ρύθμιση που του έχουμε κάνει ενεργοποιεί τον φωτισμό (Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος, 2018). Οι αισθητήρες μικροκυμάτων³¹ χρησιμεύουν σε διαδρόμους ξενοδοχείου, WC και σε κοινόχρηστους χώρους οι οποίοι ανάβουν τα φώτα μόνο όταν υπάρχει παρουσία διότι εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανιχνεύουν την ακτινοβολία όταν έρχεται σε επαφή με κινούμενα αντικείμενα (Εικόνα 39).

³¹ <https://csc-led.com/media-hub/pir-vs-microwave-motion-sensors-which-is-right-for-your-lighting-project?utm>



Εικόνα 39 Τουαλέτες ξενοδοχείου. Έναυση φωτιστικών μέσω αισθητήρα microwave. Προσωπικό αρχείο Ζεντύλη Ιωάννη.

Ο υπερηχητικός αισθητήρας³² αλλιώς ultrasonic χρησιμοποιείται για να ανιχνεύει την παρουσία ή την κίνηση των ανθρώπων μέσα σε έναν χώρο. Ο αισθητήρας βλέπει εντός απόστασης των δύο μέτρων ένα άτομο και ανάβει το φωτιστικό. Μόλις αντιληφθεί ότι το άτομο δεν υπάρχει πλέον στον χώρο δίνει εντολή να σβήσει το φως. Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε αισθητήρα ξεχωριστά.

³² <https://www.blog.heykangaroo.com/blog/motion-sensor-showdown-pir-vs-microwave-vs-ultrasonic-which-is-best-for-your-home?utm>

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Χαρακτηριστικό	PIR	MICROWAVE	ULTRASONIC	PHOTO SENSOR
Λειτουργική αρχή	Ανιχνεύει αλλαγές στην θερμική ενέργεια.	Μετράει τη μετατόπιση Doppler των ανακλώμενων μικροκυμάτων.	Μετράει τον χρονισμό ήχου των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων.	Ελέγχει την ένταση του φυσικού φωτισμού
Πλεονεκτήματα	Χαμηλή ισχύς, χαμηλό κόστος, υψηλή αξιοπιστία για ανθρώπινους στόχους.	Μεγάλη εμβέλεια, διεισδύει σε μη μεταλλικά υλικά.	Υψηλή ευαισθησία, μπορεί να ανιχνεύσει γύρω από εμπόδια.	Λειτουργεί μόνο όταν υπάρχει ανάγκη
Μειονεκτήματα	Απαιτείται οπτική επαφή, ευαίσθητο στις θερμικές αλλαγές.	Υψηλότερο κόστος και κατανάλωση ενέργειας, μπορούν να ενεργοποιηθούν εξωτερικά.	Μικρή εμβέλεια, ευαίσθητο στη ροή του αέρα και τον θόρυβο.	Ευαισθησία σε καιρικές συνθήκες
Κύρια εφαρμογή	Κατοικία	Ζώνες υψηλής ασφάλειας, μεγάλοι εμπορικοί χώροι.	Μικρά δωμάτια, συστήματα ανίχνευσης πληρότητας.	Οδοφωτισμός εξωτερικοί χώροι



3.3 Συγκριτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Με βάση τα στοιχεία που προκύπτουν από τις παραπάνω έρευνες όσον αφορά την αξιολόγηση σε ότι έχει να κάνει με τα είδη αισθητήρων όπως επίσης και με τα πρωτόκολλα έναυσης συμπεραίνουμε αρχικά, ότι οι αισθητήρες PIR μπορεί να παρουσιάζουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος αλλά μπορούν να εμφανίσουν σφάλματα σε περιπτώσεις όπου η κίνηση είναι περιορισμένη ή όταν δεν έχουμε σημαντική αλλαγή της θερμοκρασίας. Κατόπιν, οι microwave αισθητήρες είναι πολύ ευαίσθητοι, καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και μπορούν να ενεργοποιούνται κατά λάθος σε περίπτωση ανακλάσεων. Επίσης, οι light sensors βάση της παρουσίας του φυσικού φωτισμού φαίνεται πως αποδίδουν ιδιαίτερα σημαντικά όταν η σκίαση και η αξιοποίηση του φωτός διατίθενται. Τα τρία είδη αισθητήρων όπως περιγράφεται μπορεί να έχουν διαφορετικό τρόπο λειτουργίας αλλά ο σκοπός τους είναι κοινός.

Τα πρωτόκολλα ελέγχου παρουσιάζουν τόσο περιορισμούς όσο και πλεονεκτήματα. Η εφαρμογή KNX αποτελεί ολοκληρωμένη λύση αυτοματισμού, έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών, καλό έλεγχο και είναι συμβατή με όλες τις συσκευές. Παρόλα τα πλεονεκτήματα έχει υψηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης και απαιτεί καλωδίωση τόσο στην περιοχή από όπου τροφοδοτεί με ισχυρό ρεύμα όσο και στην περιοχή με τα ασθενή. Επιπρόσθετα, απαιτεί προγραμματισμό από άτομο με εξειδίκευση. Η εφαρμογή DALI έχει υψηλή ακρίβεια στο dimming, αλλά απαιτεί καλωδίωση, τροφοδοτεί συμβατικά φωτιστικά κι όχι οποιοδήποτε φωτιστικά σώματα και υστερεί σε επέκταση δικτύου. Τέλος, η εφαρμογή zigbee έχει εύκολη τοποθέτηση, χαμηλό κόστος αλλά απαιτεί διαμόρφωση και ενδέχεται σε μεγάλες εγκαταστάσεις να μην μπορεί να ανταποκριθεί.

Κεφάλαιο 4: Πολυκριτήρια ανάλυση

4.1 Εισαγωγή

Η πολυκριτήρια ανάλυση αποτελείται από ένα σύνολο διαδικασιών και μεθόδων που ακολουθούνται, προκειμένου να παρθούν αποφάσεις που έχουν να κάνουν με την ορθή επιλογή συστήματος ελέγχου τεχνητού φωτισμού (Andelka Štilic and Adis Puška, 2023). Όταν καλούμαστε να επιλέξουμε ή να αξιολογήσουμε ένα σύστημα φωτισμού δεν αρκεί να εξετάσουμε μόνο το κόστος ή το πόσο φωτεινός είναι ο εκάστοτε χώρος. Η επιλογή ενός φωτιστικού σώματος εξαρτάται από παραμέτρους που σχετίζονται άμεσα με την ενεργειακή κατανάλωση, την ποιότητα οπτικής άνεσης, το πόσο ασφαλής είναι η εγκατάσταση ως προς τον άνθρωπο, το είδος του χώρου που επρόκειτο να φωτιστεί, την υγεία μολονότι επιδρά σημαντικά στον κερκάρδιο ρυθμό και τελευταία το κόστος (Ζερεφός, 2014). Εν αντιθέσει με τις κλασσικές μεθόδους επιλογής φωτιστικού σώματος δηλαδή για επαγγελματική ή οικιακή χρήση, θερμός ή ψυχρός φωτισμός, άμεσος, διάχυτος, έμμεσος ή κρυφός, η πολυκριτήρια ανάλυση λαμβάνει υπόψη ότι οι πραγματικές αποφάσεις όσον αφορά την καλύτερη επιλογή φωτισμού λαμβάνονται από ένα ευρύ φάσμα παραγόντων επομένως επιτρέπει μια πιο ρεαλιστική, ισορροπημένη και συνάμα αντικειμενική αξιολόγηση. Τέτοιου είδους παράγοντες έχουν να κάνουν με την επιλογή τεχνολογίας, τον σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων, την διαχείριση οικονομικών πόρων και το πως είναι σχεδιασμένος ο φωτισμός.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα του φωτισμού και των συστημάτων αυτοματισμού κτιρίων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών λύσεων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπως είναι το dali, zigbee και το knx. Ωστόσο, η επιλογή κατάλληλου φωτιστικού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως όπως και η επιλογή του ιδανικού πρωτοκόλλου επικοινωνίας ανάλογα τα κριτήρια που έχουμε ορίσει δεν αποτελεί εύκολη διαδικασία. Τέτοιου είδους κριτήρια έχουν να κάνουν με την ορατότητα, την ομοιομορφία φωτισμού, τον χαμηλό δείκτη θάμβωσης, τον υψηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης, την ενεργειακή απόδοση, την απόδοση του φωτιστικού σώματος και το κόστος αγοράς-εγκατάστασης. Η πολυκριτήρια ανάλυση αρχικά συγκεντρώνει πληροφορίες που έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά ενός φωτιστικού σώματος. Κατόπιν, επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων τεχνολογικών επιλογών, υπολογίζοντας ποιο σύστημα προσφέρει την βέλτιστη ισορροπία μεταξύ των κριτηρίων όπου έχουμε ορίσει.



Ταυτόχρονα, παρουσιάζει εναλλακτικά αποτελέσματα σε περίπτωση αλλαγής βάρους μεταξύ των κριτηρίων, κάνει εκτίμηση και παίρνει μια τεκμηριωμένη απόφαση (Othman Alshamrani, Adel Alshibani and Mohammed Alogaili, 2018).

4.1.1 Βασικές μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης

Οι βασικές μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης καλύπτουν προβλήματα που ενδεχομένως να προκύψουν στην διαδικασία ορθής επιλογής. Κάθε μέθοδος που ακολουθεί περιλαμβάνει ξεχωριστά πλεονεκτήματα όπως επίσης περιορισμούς και αναλόγως με το είδος της απόφασης που έχει παρθεί, τον όγκο πληροφορίας ο οποίος είναι διαθέσιμος και την εμπειρία του εκάστοτε αναλυτή γίνεται η επιλογή. Η χρήση της κάθε μεθόδου αποσκοπεί στην τεχνική αξιολόγηση φωτιστικών και συστημάτων έντασης με σκοπό την καλύτερη επιλογή τοποθέτησης ενός συστήματος φωτισμού (Andelka Štilic and Adis Puška, 2023).

Η μέθοδος αναλυτικής ιεραρχίας γνωστή με τα αρχικά AHP, θεωρείται η πιο διαδεδομένη μέθοδο πολυκριτήριας λήψης αποφάσεων μολονότι γίνεται οργάνωση πολύπλοκων προβλημάτων σε απλή μορφή, λαμβάνει υπόψη τεχνικά, οικονομικά και αισθητικά κριτήρια που σχετίζονται με τα φωτιστικά σώματα με αποτέλεσμα να οδηγήσει σε τεχνικά τεκμηριωμένες επιλογές. Αρχικά γίνεται δόμηση του προβλήματος σε μια ιεραρχία στόχου δηλαδή η επιλογή ενός βέλτιστου συστήματος τεχνητού φωτισμού για ένα εσωτερικό χώρο γραφείων. Κατόπιν, γίνεται επιλογή του φωτισμού με βάση την ενεργειακή απόδοση, την οπτική άνεση, τον δείκτη χρωματικής απόδοσης, την θερμοκρασία χρώματος, το κόστος αγοράς του φωτιστικού, το πως ενσωματώνεται αισθητικά στον χώρο και τι επιπτώσεις έχει στο περιβάλλον (Othman Alshamrani, Adel Alshibani and Mohammed Alogaili, 2018). Έπειτα ο αξιολογητής ελέγχει κριτήρια που είναι σημαντικά για μια περίπτωση φωτισμού ενός χώρου και διεξάγει αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μπορεί να θεωρήσει ότι η ενεργειακή απόδοση είναι σημαντικότερη από την καλαισθησία ή ότι η οπτική άνεση υπερτερεί έναντι του κόστους εγκατάστασης. Επιπλέον, εάν δει ότι η επιλογή φωτισμού επιδρά αρνητικά στην κερκαδική ρύθμιση, ή ότι ο φωτισμός δεν πληροί τα μέτρα ασφαλείας προτείνει εναλλακτικές επιλογές (Pablo Pérez-Gosende, 2019).



Η μέθοδος Topsis αποτελεί μια διαφορετική μέθοδο εξίσου σημαντική για την επιλογή συστήματος φωτισμού. Τα αρχικά της σημαίνουν τεχνική για την προτίμηση παραγγελίας με ομοιότητα με την ιδανική λύση. Η τεχνική TOPSIS για την απόδοση κατά σειρά με βάση την ομοιότητα με την ιδανική λύση αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους Hwang & Yoon το 1981. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, η καλύτερη εναλλακτική λύση θα ήταν αυτή που είναι πλησιέστερη στη θετική ιδανική λύση και πιο μακριά από την αρνητική ιδανική λύση (Arvind Jayant and Janpriy Sharma, 2018). Σκοπός της μεθόδου είναι η επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης ανάμεσα σε πολλές πιθανές επιλογές. Οι αποφάσεις που παίρνει γίνονται μεταξύ της χειρότερης επιλογής και της καλύτερης δηλαδή βοηθά να βρεθεί λύση που προσεγγίζει την τέλεια επιλογή και διαφέρει πολύ από το χειρότερο σενάριο λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια (Salvatore Corrente and Menelaos Tasiou, 2023).

Η μέθοδος Vikor εστιάζει στην κατάταξη και την επιλογή από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων και καθορίζει συμβιβαστικές λύσεις για ένα πρόβλημα με αντικρουόμενα κριτήρια, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να καταλήξουν σε μια τελική απόφαση. Εδώ, η συμβιβαστική λύση είναι μια εφικτή λύση που είναι η πλησιέστερη στην ιδανική λύση, και συμβιβασμός σημαίνει μια συμφωνία που επιτυγχάνεται μέσω αμοιβαίων παραχωρήσεων (Arvind Jayant and Janpriy Sharma, 2018). Χαρακτηριστικό παράδειγμα της εφαρμογής της μεθόδου είναι η επιλογή ενός συστήματος φωτισμού για ένα κτίριο το οποίο απαρτίζεται από γραφεία. Στην επιλογή μας υπάρχουν τρεις εναλλακτικές λύσεις όπως λάμπες φθορισμού, led και λάμπες αλογόνου. Τα κριτήρια που έχουμε ορίσει είναι χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, υψηλή ποσότητα φωτισμού και χαμηλό κόστος εγκατάστασης. Πραγματοποιώντας χρήση της μεθόδου ορίζουμε την ιδανική λύση δηλαδή το φωτιστικό με την καλύτερη ενέργεια, το χαμηλότερο κόστος και την καλύτερη ποιότητα. Στην συνέχεια, για κάθε εναλλακτική μετράμε πόσο η επιλογή μας απέχει από την ιδανική δηλαδή η λάμπα led προσεγγίζει την ιδανική σε μεγάλο βαθμό ενώ η φθορισμού σε χαμηλό και τελευταία έρχεται η αλογόνου. Επιπλέον, η φθορισμού έχει το χαμηλότερο κόστος σε αντίθεση με τις άλλες δύο λάμπες που σημαίνει ότι η μέθοδος λαμβάνει όλες τις παραμέτρους και βρίσκει μια συμβατική λύση.



Η μέθοδος Promethee στην ελληνική γλώσσα προμηθέας βοηθά να συγκρίνουμε πολλές επιλογές όταν υπάρχουν διαφορετικά κριτήρια. Αποτελεί μια μέθοδο ιδανική όσον αφορά περιπτώσεις λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων που αναπτύχθηκε από τους Brans, Vincke και Mareschal την χρονιά του 1986. Η φιλοσοφία της στηρίζεται στην σύγκριση κάθε ζεύγος εναλλακτικών λύσεων για κάθε κριτήριο και βαθμολογεί τις εναλλακτικές λύσεις στο διάστημα 0-1. Βασική σύγκριση γίνεται μεταξύ συστημάτων φωτισμού ή φωτιστικών σωμάτων προκειμένου να καταλήξουμε στην ιδανική επιλογή. Σημαντικό στοιχείο της μεθόδου είναι η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης προτίμησης. Υπάρχουν έξι βασικοί τύποι συναρτήσεων (συνήθης, U-σχήματος, V-σχήματος, επίπεδη, γραμμική με κατώφλια, και Gaussian), οι οποίοι επιτρέπουν την προσαρμογή της μεθόδου στις ιδιαιτερότητες κάθε προβλήματος. Η επιλογή εξαρτάται από τη φύση του κριτηρίου και τον τρόπο με τον οποίο αυτός που θα πάρει την απόφαση αντιλαμβάνεται τις διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών. Επιπλέον, για κάθε κριτήριο καθορίζονται βάρη, τα οποία εκφράζουν τη σχετική σημασία του κριτηρίου στο συνολικό πρόβλημα. Τα βάρη αυτά είναι κρίσιμα, καθώς επηρεάζουν άμεσα το τελικό αποτέλεσμα της κατάταξης. Η διαδικασία καθορισμού τους μπορεί να γίνει είτε υποκειμενικά είτε με πιο δομημένες μεθόδους, όπως η AHP (Σίσκος, 2008).

Αφού καθοριστούν οι συναρτήσεις προτίμησης και τα βάρη, υπολογίζεται ο δείκτης προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τον συνολικό βαθμό στον οποίο η μία εναλλακτική υπερέχει της άλλης, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια. Στη συνέχεια, υπολογίζονται η θετική ροή και η αρνητική ροή. Η θετική ροή εκφράζει το πόσο μια εναλλακτική υπερέχει των υπόλοιπων, ενώ η αρνητική ροή δείχνει το πόσο υστερεί σε σύγκριση με τις άλλες. Με βάση αυτές τις δύο ροές, μπορούν να εξαχθούν διαφορετικοί τύποι κατάταξης. Η μέθοδος PROMETHEE I παρέχει μία μερική κατάταξη, επιτρέποντας την ύπαρξη μη συγκρίσιμων εναλλακτικών. Αντίθετα, η PROMETHEE II προσφέρει μία πλήρη κατάταξη, χρησιμοποιώντας τη καθαρή ροή, η οποία προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ θετικής και αρνητικής ροής (Σίσκος, 2008).



Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της PROMETHEE είναι η διαφάνεια και η ευκολία κατανόησης των αποτελεσμάτων. Σε αντίθεση με άλλες πιο πολύπλοκες μεθόδους, η PROMETHEE προκειμένου να επιλέξουμε ορθά χωρίς τυχόν αποκλείσεις ή λάθη να κατανοήσουμε εύκολα πώς προκύπτει η τελική κατάταξη. Επιπλέον, η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ευέλικτη και μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων, όπως η επιλογή επενδύσεων, η αξιολόγηση προμηθευτών, ο σχεδιασμός έργων και η περιβαλλοντική διαχείριση.

Η μέθοδος PROMETHEE μπορεί να μας βοηθήσει σημαντικά στην επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας για τον φωτισμό ενός εσωτερικού χώρου, όπως είναι τα συστήματα KNX, Zigbee και DALI. Η επιλογή ανάμεσα σε αυτές τις τεχνολογίες δεν είναι εύκολη, γιατί η καθεμία παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, το KNX είναι πολύ αξιόπιστο αλλά έχει υψηλό κόστος σε αντίθεση με το Zigbee που είναι πιο οικονομικό και εύκολο στην εγκατάσταση, ενώ το DALI είναι εξειδικευμένο στον έλεγχο φωτισμού και προσφέρει μεγάλες δυνατότητες ρύθμισης. Η PROMETHEE μας βοηθά να οργανώσουμε αυτή την επιλογή με έναν απλό και λογικό τρόπο. Αρχικά, ορίζουμε τα κριτήρια που μας ενδιαφέρουν. Κατόπιν, δίνουμε μεγαλύτερο βάρος σε κριτήρια θεωρούμε πιο σημαντικά για τον σκοπό μας και τα κατατάσσουμε αναλόγως. Στη συνέχεια, συγκρίνουμε τις τεχνολογίες μεταξύ τους με βάση αυτά τα κριτήρια. Για παράδειγμα, στο κόστος το Zigbee μπορεί να είναι καλύτερο, ενώ στην αξιοπιστία το KNX υπερέχει. Το κρίσιμο σημείο είναι ότι δεν έχουν όλα τα κριτήρια την ίδια σημασία. Για παράδειγμα, σε ένα σπίτι μπορεί να δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στο κόστος και την ευκολία εγκατάστασης, ενώ σε ένα επαγγελματικό κτίριο στην αξιοπιστία και τον έλεγχο. Η μέθοδος υπολογίζει συνολικά ποια λύση υπερτερεί, λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις συγκρίσεις. Η μέθοδος πλεονεκτεί στο ότι δεν βασιζόμαστε μόνο στη γνώμη μας, αλλά σε μια οργανωμένη διαδικασία. Έτσι, μπορούμε να καταλήξουμε σε μια πιο σωστή και τεκμηριωμένη επιλογή, ανάλογα με τις ανάγκες του χώρου. Το σημαντικό είναι ότι η κατάταξη αυτή δεν είναι «γενική αλήθεια», αλλά προσαρμόζεται πλήρως στις ανάγκες του χρήστη δηλαδή εάν δώσουμε προτεραιότητα σε άλλο βάρος συνεπώς θα αλλάξει το αποτέλεσμα (Σίσκος, 2008).



Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η επιλογή μεταξύ τριών φωτιστικών σωμάτων. Κριτήρια επιλογής αποτελούν η τιμή, η ένταση φωτισμού και η κατανάλωση. Το φωτιστικό Α έχει μεγαλύτερη κατανάλωση από το φωτιστικό Β και το φωτιστικό Γ που σημαίνει ότι η επιλογή του απορρίπτεται. Έπειτα, το φωτιστικό Γ παρουσιάζει μεγαλύτερη ένταση φωτισμού εν αντιθέσει με το φωτιστικό Β άρα η καλύτερη επιλογή είναι το φωτιστικό Γ. Το Electre στην πορεία ελέγχει αν μια επιλογή υπερτερεί μιας άλλης και εφόσον η υπεροχή αυτή είναι αρκετά ισχυρή. Για παράδειγμα έχεις τρία φωτιστικά σώματα και τα όρια – προδιαγραφές που έχουμε ορίσει είναι ηλεκτρική ισχύς στα 100W και φωτεινή ροή στα 3500lm. Εφόσον το φωτιστικό Γ περνά τα όρια τότε μονομιάς η επιλογή του απορρίπτεται και σε περίπτωση που το φωτιστικό Β υπερಿಸχύει του φωτιστικού Α τότε επιλέγεται (Arvind Jayant and Janpriy Sharma, 2018).

Η πιο απλή πολυκριτήρια μέθοδος είναι το σταθμισμένο άθροισμα γνωστή και ως WSM. Σαν μέθοδο είναι γρήγορη και βολική διότι προσθέσει, πολλαπλασιάζει και επιλέγει το μεγαλύτερο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα έχεις να επιλέξεις μεταξύ τριών φωτιστικών όσον αφορά το κόστος, την απόδοση και τον δείκτη χρωματικής απόδοσης. Αρχικά πολλαπλασιάζεις των αριθμό των φωτιστικών ξεχωριστά με το κόστος, την απόδοση και το CRI. Στη πορεία προσθέτεις τα αποτελέσματα ανά φωτιστικό και επιλέγεις το μεγαλύτερο άθροισμα (Mahdi Anbari Moghadam and Deniz Besiktepe, 2025).

4.2 Κριτήρια αξιολόγησης συστημάτων

Η πολυκριτήρια αξιολόγηση προσφέρει μια τεκμηριωμένη και αντικειμενική μέθοδο παράλληλα όπου για την επιλογή συστημάτων τεχνητού φωτισμού, συνδυάζει οικονομικές, τεχνικές και λειτουργικές παραμέτρους. Μέσω της ανάλυσης, παρέχεται η δυνατότητα στους σχεδιαστές φωτισμού να μπορούν να επιλέξουν λύσεις μέσω των οποίων ωφελούνται το περιβάλλον και οι ανάγκες των εκάστοτε χρηστών. Στην αξιολόγηση συστημάτων τεχνητού φωτισμού λαμβάνουμε υπόψη κριτήρια που οδηγούν σε λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Τέτοιου είδους κριτήρια έχουν να κάνουν με την ενεργειακή απόδοση, την αξιοπιστία, το κόστος αγοράς- συντήρησης και το πόσο ευέλικτο είναι ένα σύστημα όσον αφορά την λειτουργικότητα του. Η απόδοση των φωτιστικών σωμάτων ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει το κάθε φωτιστικό (Μπουρούσης, 2014). Όσο πιο υψηλή είναι η απόδοση τόσο περισσότερο φως δίνει με λιγότερη κατανάλωση ρεύματος επομένως έχουμε αυτόματα μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας.

Κόκκος Θεόδωρος, *Αξιολόγηση συστημάτων ελέγχου φωτισμού*
Επιπροσθέτως, φωτιστικό του οποίου η έναυση του γίνεται με χρήση αισθητήρων συμβάλει άμεσα στην μείωση του κόστους (Δούλος, 2013).

Το κόστος αποτελεί ένα από τα κριτήρια επιλογής. Το αρχικό κόστος σχετίζεται με την αγορά του προϊόντος, την συντήρηση και την εργασία εγκατάστασης(Δούλος,2013). Στην πολυκριτήρια ανάλυση γίνεται συχνή χρήση του δείκτη συνολικού κόστους σε βάθος χρόνου της ζωής του φωτιστικού προσφέροντας με αυτό τον τρόπο μια πλήρη εικόνα για το αν συμφέρει οικονομικά η τοποθέτηση του. Η αξιοπιστία ενός φωτιστικού σώματος έχει να κάνει με την μακροχρόνια σταθερότητα και αντοχής του συστήματος φωτισμού. Σε κάθε φωτιστικό υπάρχουν αναγραφόμενες τιμές που έχουν να κάνουν με την διάρκεια ζωής, τον δείκτη προστασίας από εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι η σκόνη, η υγρασία και οι βανδαλισμοί, την φωτεινή ροή, τον δείκτη χρωματικής απόδοσης όπως επίσης και την ενεργειακή κλάση (Δούλος, 2013). Η λειτουργικότητα και η αξιοπιστία ενός συστήματος ελέγχου προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών. Μέσω των σύγχρονων συστημάτων έναυσης όπως είναι το dali, knx, zigbee και dmx πετυχαίνουμε ρύθμιση της έντασης φωτισμού, του χρώματος, την ομοιομορφία και την μελλοντική τροποποίηση.

4.3 Μεθοδολογία επιλογής βέλτιστης λύσης

Η πολυκριτήρια ανάλυση αποτελεί μια μέθοδο λήψης αποφάσεων και αξιολόγησης στον τομέα του τεχνητού φωτισμού επειδή υπάρχει μεγάλη γκάμα πληροφοριών όπως επίσης και αντικρουόμενα κριτήρια όσον αφορά τα συστήματα έναυσης φωτισμού. Η πολυκριτήρια ανάλυση πραγματοποιεί σύγκριση μεταξύ των συστημάτων knx, dali και zigbee προτού πάρει την τελική απόφαση. Πραγματοποιώντας τις κατάλληλες μετρήσεις και εξετάζοντας τις παραμέτρους αναλυτικά μπορεί να καθοδηγήσει έναν σχεδιαστή φωτισμού όσον αφορά την λήψη τεκμηριωμένων και αποδοτικών αποφάσεων (Maria Cristea, Radu Adrian Tîrnovan, Ciprian Cristea, Constantin Sorin Pică and Cristian Făgărășan, 2018). Η συγκεκριμένη εφαρμογή ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα ωστόσο για να είναι αποτελεσματική απαιτείται προσοχή στην μεθοδολογία όσον αφορά την επιλογή κριτηρίων, την στάθμιση και την προσομοίωση. Το πρώτο βήμα έχει να κάνει με τον καθορισμό των εναλλακτικών λύσεων δηλαδή ποιο από τα αναφερόμενα συστήματα θα επιλέξει σε συνεργασία με τοπικούς αισθητήρες. Κάθε σύστημα ελέγχου του φωτισμού παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που σχετίζονται άμεσα με την κατανάλωση ενέργειας, την αξιοπιστία, το κόστος, την δυνατότητα τροποποίησης, επέκτασης και κατά πόσο εύκολη είναι η συντήρηση του.



Ένα πρωτόκολλο³³ φωτισμού dali θεωρείται ένα αξιόπιστο σύστημα λόγω ότι επιτρέπει ακριβή έλεγχο της έντασης του ρεύματος, χωρίζει τα φωτιστικά ανά ομάδες, παρέχει υποστήριξη αισθητήρων και εξοικονομεί ενέργεια. Η διαφορά του με το πρωτόκολλο knx είναι ότι το τελευταίο μπορεί να ελέγχει παράλληλα με τον φωτισμό την θέρμανση, τα ρολά κουρτίνας και τον συναγερμό. Το zigbee αποτελεί την ασύρματη λύση η οποία ενδείκνυται για ανακαινίσεις ή μετακόμιση με χαμηλό το κόστος υλοποίησης. Μετά τον καθορισμό κριτηρίων ακολουθεί η στάθμιση τους δηλαδή προσδιορίζεται η σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου. Σε ένα κτίριο όπου απαρτίζεται από γραφεία τα οποία καταναλώνουν ενέργεια, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας έχει μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με το κόστος εγκατάστασης. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η AHP επειδή χωρίζει τα κριτήρια ανά ζεύγη, βοηθώντας τα μέγιστα στην αντικειμενική λήψη αποφάσεων. Το επόμενο βήμα που ακολουθεί είναι η κανονικοποίηση των δεδομένων. Κάθε κριτήριο έχει διαφορετική μονάδα μέτρησης που σημαίνει ότι η κανονικοποίηση μετατρέπει τις τιμές σε κλίμακα από το μηδέν έως το ένα. Αμέσως μετά υπολογίζεται ο συνολικός βαθμός της κάθε εναλλακτικής. Εδώ γίνεται χρήση των μεθοδολογιών WSM και TOPSIS (Mahdi Anbari Moghadam and Deniz Besiktepe, 2025).

Το πρωτόκολλο³⁴ knx σε συνεργασία με το πρωτόκολλο dali αφενός μεν παρουσιάζουν την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας αφετέρου δε σηκώνουν ψηλά το κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον, το σύστημα μειώνει την ένταση των φωτιστικών όταν έχουμε ύπαρξη φυσικού φωτισμού. Το πρωτόκολλο³⁵ zigbee παρουσιάζει αστάθεια διότι εξαρτάται η λειτουργία σε μεγάλο βαθμό από το δίκτυο. Απεναντίας, ένα απλό σύστημα φωτισμού χωρίς αυτοματισμούς παρουσιάζει κακή απόδοση διότι απαιτεί φυσική παρουσία χρήστη και πάσχει από ευελιξία. Κάνοντας χρήση του μοντέλου WSM έχοντας ως βασικό κριτήριο την ενέργεια τότε η πιθανή λύση αποτελεί ο συνδυασμός dali με knx ενώ σε περίπτωση όπου το κόστος αποτελεί βασικό κριτήριο τότε το πρωτόκολλο zigbee αποτελεί την ιδανική επιλογή.

³³ <https://www.dali-alliance.org/d4i/> (Ανακτήθηκε στις 09/12/2025)

³⁴ <https://www.knxhub.com/knx-rf-vs-zigbee-comparison/> (Ανακτήθηκε στις 09/12/2025)

³⁵ <https://www.knxhub.com/knx-vs-other-building-automation-protocols-a-comparison-guide/> (Ανακτήθηκε στις 09/12/2025)



Αφού γίνει η επιλογή ενός πρωτοκόλλου, τότε προχωρούμε στο τελευταίο βήμα αυτό της προσομοίωσης των αποτελεσμάτων. Η προσομοίωση του φωτισμού μας επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων, ιδανικών και μη αποτελεσμάτων και σε αξιολόγηση των εναλλακτικών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα κάνουμε μελέτες περίπτωσης φωτισμού σε εικονικούς χώρους μέσω της εφαρμογής Relux. Κάνοντας χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος μπορούμε να εξετάσουμε σενάρια φωτισμού, να δούμε την απόδοση των φωτιστικών, διάφορες στρατηγικές dimming όπως είναι η εναλλαγή χρώματος φωτεινής δέσμης, να επιλέξουμε τα lux, τον συντελεστή ομοιομορφίας και τον δείκτη θάμβωσης (Τοπαλής Φραγκίσκος Β. Οικονόμου Λάμπρος, Κουρτέση Σταυρούλα, 2021).



Κεφάλαιο 5: Εφαρμογή, αποτελέσματα και οικονομοτεχνική αξιολόγηση

5.1 Επιλογή συστήματος για μελέτη περίπτωσης

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στην επιλογή και αξιολόγηση ενός συστήματος ελέγχου τεχνητού φωτισμού για έναν εσωτερικό χώρο. Θα γίνει αξιοποίηση των μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης από όπου θα παρθούν αποφάσεις. Η ανάγκη που προκύπτει για αποδοτική διαχείριση του φωτισμού όσον αφορά την περίπτωση ενός εσωτερικού χώρου αποτελεί βασικό παράγοντα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, της οπτικής άνεσης καθώς και την συνολική βιωσιμότητα των σύγχρονων κτιριακών υποδομών. Με την εξομοίωση του φωτισμού μέσω του προγράμματος Relux, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων, έγκαιρη διόρθωση σφαλμάτων, αποφυγή λανθάνων επιλογής, η αναπαράσταση εικονικών σεναρίων, αποφυγή πραγματικής εγκατάστασης όσον αφορά την δοκιμή ενός συστήματος και υπολογισμοί μεγάλης ακρίβειας.

Η επιλογή των φωτιστικών σωμάτων όπως επίσης το πρωτόκολλο επικοινωνίας βασίζεται στην πολυκριτήρια ανάλυση. Μέσω της διαδικασίας εξετάζονται πολλά σενάρια φωτισμού, τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις. Μέσω της στάθμισης κριτηρίων και την σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών προκύπτει η κατάλληλη επιλογή συστήματος για τον φωτισμό ενός εσωτερικού χώρου. Το σύστημα φωτισμού θα περιλαμβάνει επίσης, αισθητήρες έντασης φωτισμού, είτε θερμοκρασίας ή ακόμα παρουσίας μέσα στον χώρο. Μέσω του προγράμματος Relux οι εκάστοτε αισθητήρες προσομοιώνονται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε η αναπαράσταση τους όσον αφορά την λειτουργία τους να είναι ρεαλιστική. Τα δε φωτιστικά σώματα, θα είναι τύπου led κατά προτίμηση διότι παρέχουν δυνατότητα ρύθμισης της έντασης φωτισμού γεγονός που επιτρέπει την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, την προσαρμογή του φωτισμού ανάλογα με το είδος εργασίας και την μείωση του κόστους του ρεύματος.

Οι αισθητήρες και τα φωτιστικά σώματα θα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός πρωτόκολλου επικοινωνίας ή συνδυασμός πρωτοκόλλων. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας θα επιλεγούν με βάση την απόδοση, την χρήση και την αξιόπιστη λειτουργία. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, θα διασφαλιστεί μια τεκμηριωμένη και αντικειμενική διαδικασία λήψης αποφάσεων.

5.2 Υπολογισμοί, προσομοιώσεις και αξιολόγηση

Στη παρούσα ενότητα θα πραγματοποιήσουμε μια μελέτη φωτισμού εσωτερικών χώρων (Εικόνα 40). Ο ρόλος της πολυκριτήριας ανάλυσης είναι η προσέγγιση του τεχνητού φωτισμού, με το να συνδυάσει άνεση, ασφάλεια, την αισθητική και την ενεργειακή απόδοση. Η κατάλληλη επιλογή των φωτιστικών σωμάτων οι φωτιζόμενοι χώροι πρέπει να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών. Η μελέτη περιλαμβάνει τον χώρο ενός γραφείου, μιας κουζίνας και τον χώρο υποδοχής. Για τον φωτισμό ενός γραφείου βασικό κριτήριο αποτελεί η οπτική άνεση των εργαζομένων με την χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση (Δούλος, 2013).

Ο φωτισμός είναι προσαρμοσμένος με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να εξασφαλίζει επαρκή και ομοιόμορφο φωτισμό χωρίς θάμβωση παρέχοντας ταυτόχρονα αποδοτικό εργασιακό περιβάλλον, άνεση και ασφάλεια. Η επιλογή φωτιστικών led με ουδέτερη θερμοκρασία χρώματος 4000K συμβάλει στην ενίσχυση της συγκέντρωσης και στην μείωση της κόπωσης των ματιών (Σωτηροπούλου, 2014). Ο χώρος υποδοχής αποτελεί σημείο πρώτης εντύπωσης για τους επισκέπτες που σημαίνει ότι πέραν της λειτουργικότητας θα δοθεί έμφαση στην αισθητική. Ο φωτισμός πρέπει να είναι επαρκής αλλά ήπιος εν αντιθέσει με το γραφείο με θερμοκρασία χρώματος 3000K έως 3500K (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017). Επιθυμούμε δημιουργία φιλικού περιβάλλοντος. Ο χώρος της κουζίνας λόγω των αυξημένων αναγκών απαιτεί ασφάλεια και λειτουργικότητα. Στη προκειμένη περίπτωση η πολυκριτήρια ανάλυση δίνει βάρος στην επαρκή ένταση φωτισμού των επιφανειών εργασίας και στην αποφυγή ανεπιθύμητων σκιών.



Εικόνα 40 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου

Βάση σχεδίου η κουζίνα, το γραφείο, το WC και ο χώρος υποδοχής αποτελούν ξεχωριστές θερμικές ζώνες. Οι στάθμες φωτισμού ορίζονται από το πρότυπο EN 12464-1 σύμφωνα με την χρήση του εκάστοτε χώρου. Κάθε ζώνη τεχνητού φωτισμού αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ποσοστό κάλυψης του συνολικού εμβαδού της θερμικής ζώνης στην οποία ανήκει (Εικόνα 41). Κατόπιν, τα ποσοστά κάλυψης των επιμέρους ζωνών τεχνητού φωτισμού σχετίζονται με τα όρια εγκατεστημένης ισχύος φωτισμού (W/m^2) που προβλέπεται για το κτήριο αναφοράς έχοντας ως στόχο τον υπολογισμό ενός μέσου ορίου εγκατεστημένης ισχύος φωτισμού (W/m^2) το οποίο είναι μοναδικό για κάθε θερμική ζώνη και αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017).

Πίνακας 5.1 Προδιαγραφές για μελέτη φωτισμού

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ	Στάθμη φωτισμού [lx]	Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m]	Δείκτης θάμβωσης UGR	Ομοιομορφία φωτισμού U_0 (min/μέση τιμή)
ΥΠΟΔΟΧΗ	300	0.8	22	0.6
ΓΡΑΦΕΙΟ	500	0.8	19	0.6
ΚΟΥΖΙΝΑ	500	0.8	22	0.6
WC	100	0.8	25	0.4

Ζώνες τεχνητού φωτισμού / Στάθμη φωτισμού [lx]	Ισχύς για κτήριο αναφοράς [W/m^2]	Ισχύς για ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης κτιρίων [W/m^2]
1000	32	28,0
500	16	14,0
400	12,8	11,2
300	9,6	8,4
250	8,0	7,0
200	6,4	5,6
100	3,2	2,8

Εικόνα 41 Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017. Εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού (W/m^2) κτηρίου αναφοράς ανάλογα της στάθμης φωτισμού για τον υπολογισμό της ενεργειακής του απόδοσης.

5.2.1 Τοποθέτηση φωτιστικών σε χώρο γραφείου με βάση πρωτοκόλλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης

Η επιλογή συστήματος φωτισμού για ένα γραφείο αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία όσον αφορά το θέμα λήψης μιας απόφασης. Βασική επιδίωξη στον τεχνητό φωτισμό είναι η εξοικονόμηση ενέργειας μαζί με την απόδοση (Δούλος, 2013). Μολονότι, ο φωτισμός δεν λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα, η επιλογή των φωτιστικών γίνεται με βάση την αξιολόγηση συστημάτων και την εφαρμογή μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης. Στη παρούσα εργασία θα δούμε περιπτώσεις φωτισμού με KNX, Dali και zigbee. Κατόπιν, θα αξιολογήσουμε ποια επιλογή είναι η καλύτερη επιλογή για τον φωτισμό υποδοχής, κουζίνας και γραφείου. Τα κριτήρια που θα λάβουμε υπόψιν για τον φωτισμό των χώρων με βάση την προτεραιότητα και το βάρος που επιθυμούμε είναι η ένταση φωτισμού κατά κύριο λόγο ειδικά για τον χώρο γραφείου και της υποδοχής όπου ο φωτισμός προορίζεται για επαγγελματική χρήση, ο χαμηλός δείκτης θάμβωσης, η απόδοση των φωτιστικών σωμάτων, ο δείκτης χρωματικής απόδοσης, η ενεργειακή απόδοση και τέλος το συνολικό κόστος εγκατάστασης.

Για τον φωτισμό του γραφείου με συνολική ισχύς ανά περιοχή στα 14.05m^2 θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά την μέθοδο AHP. Η σύγκριση θα γίνει μεταξύ πρωτοκόλλων επικοινωνίας KNX και dali. Για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων η AHP χρησιμοποιεί τη σύγκριση ανά ζεύγη όλων των κριτηρίων. Σε κάθε σύγκριση η σπουδαιότητα του ενός στοιχείου σε σχέση με το άλλο βαθμολογείται με μια κλίμακα από 1-9. Η σημασία της κλίμακας όπως επίσης η σειρά των κριτηρίων βάση προτεραιότητας φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.2 Βάρη για την μέθοδο AHP

Κλίμακα 1-9	Σημασία
1	Ίση
3	Μέτρια σημαντικότερο
5	Αρκετά σημαντικότερο
7	Πολύ σημαντικότερο
9	Εξαιρετικά σημαντικότερο
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές

Η μέθοδος ΑΗΡ χρησιμοποιεί τους συγκεκριμένους πίνακες για να κάνει συγκρίσεις και βαθμολογούμε ανάλογα μεταξύ δύο κριτηρίων την φορά πόσο σημαντικό είναι το ένα σε σχέση με το άλλο. Όταν έχουμε την ίδια περίπτωση τότε έχουμε τον λόγο 1:1. Για παράδειγμα κρίνουμε στον χώρο εργασίας για τις περιπτώσεις γραφείου και υποδοχής ότι η ένταση φωτισμού είναι 9 φορές πιο σημαντική από το κόστος. Ο κλασματικός αριθμός 1/9 είναι το ανάποδο της σύγκρισης μεταξύ του κόστους και της έντασης φωτισμού.

Πίνακας 5.3 Συγκρίσεις μεταξύ κριτηρίων με την μέθοδο ΑΗΡ

	Ένταση φωτισμού	Χαμηλή θάμβωση	Απόδοση φωτιστικού	CRI	Ενεργειακή απόδοση	Κόστος
Ένταση φωτισμού	1	3	5	7	7	9
Χαμηλή θάμβωση	1/3	1	3	5	5	7
Απόδοση φωτιστικού	1/5	1/3	1	3	3	5
CRI	1/7	1/5	1/3	1	3	3
Ενεργειακή απόδοση	1/7	1/5	1/3	1/3	1	3
Κόστος	1/9	1/7	1/5	1/3	1/3	1

Κατόπιν, για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε πόσο σημαντικό είναι κάθε κριτήριο συνολικά, προσθέτουμε όλους τους αριθμούς που βρίσκονται σε κάθε στήλη του πίνακα. Αυτό σημαίνει πως μαζεύουμε πόση «συνολική σημασία» έχουν δώσει όλα τα κριτήρια σε ένα συγκεκριμένο κριτήριο. Με άλλα λόγια, βλέπουμε πόσο «βάρος» συγκεντρώνει κάθε κριτήριο από τις συγκρίσεις. Έπειτα, προχωράμε στην κανονικοποίηση του πίνακα. Αυτό γίνεται διαιρώντας κάθε αριθμό μέσα στον πίνακα με το άθροισμα της στήλης στην οποία βρίσκεται. Με αυτό τον τρόπο, μετατρέπουμε τις τιμές σε αναλογίες, ώστε τα στοιχεία κάθε στήλης να προσθέτουν αθροιστικά σε 1. Αυτή η διαδικασία μας βοηθά να συγκρίνουμε τα κριτήρια σε μια κοινή κλίμακα. Στη πορεία, για κάθε κριτήριο υπολογίζουμε το μέσο όρο των αριθμών που βρίσκονται στην αντίστοιχη γραμμή του κανονικοποιημένου πίνακα. Αυτός ο μέσος όρος

Κόκκος Θεόδωρος, Αξιολόγηση συστημάτων ελέγχου φωτισμού
αντιπροσωπεύει το τελικό βάρος ή προτεραιότητα που έχει το συγκεκριμένο κριτήριο
σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Με αυτόν τον τρόπο, ξεκινώντας από ζευγαρωτές συγκρίσεις, καταλήγουμε σε μια
συνολική ιεράρχηση που μας δείχνει ποια κριτήρια είναι πιο σημαντικά για την
απόφαση που θέλουμε να πάρουμε. Η μέθοδος αυτή κάνει πιο ξεκάθαρο και
αντικειμενικό το πώς βγάζουμε προτεραιότητες σε πολύπλοκα προβλήματα όπου
έχουμε να ζυγίσουμε πολλά διαφορετικά στοιχεία μαζί. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται
στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.4 Συγκρίσεις μεταξύ κριτηρίων με την μέθοδο ΑΗΡ

	Ένταση φωτισμού	Χαμηλή θάμβωση	Απόδοση φωτιστικού	CRI	Ενεργειακή απόδοση	Κόστος
Ένταση φωτισμού	1	3	5	7	7	9
Χαμηλή θάμβωση	0,33	1	3	5	5	7
Απόδοση φωτιστικού	0,2	0,33	1	3	3	5
CRI	0,14	0,2	0,33	1	3	3
Ενεργειακή απόδοση	0,14	0,2	0,33	0,33	1	3
Κόστος	0,11	0,14	0,2	0,33	0,33	1
Άθροισμα	1,92	4,87	9,86	16,66	19,33	28



Πίνακας 5.5 Συγκρίσεις μεταξύ κριτηρίων με την μέθοδο ΑΗΡ

	Ένταση φωτισμού	Χαμηλή θάμβωση	Απόδοση φωτιστικού	CRI	Ενεργειακή απόδοση	Κόστος
Ένταση φωτισμού	0,52	0,61	0,51	0,42	0,36	0,32
Χαμηλή θάμβωση	0,17	0,2	0,3	0,3	0,26	0,25
Απόδοση φωτιστικού	0,1	0,06	0,1	0,18	0,16	0,18
CRI	0,07	0,04	0,03	0,06	0,16	0,11
Ενεργειακή απόδοση	0,07	0,04	0,03	0,02	0,05	0,11
Κόστος	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04
Άθροισμα	1,92	4,87	9,86	16,66	19,33	28

Πίνακας 5.6 Μέσος όρος ανά γραμμή με την μέθοδο ΑΗΡ

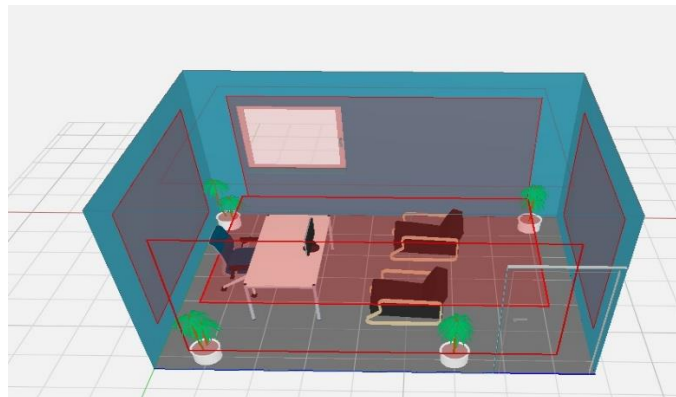
	Ένταση φωτισμού	Χαμηλή θάμβωση	Απόδοση φωτιστικού	CRI	Ενεργειακή απόδοση	Κόστος	Μ.Ο
Ένταση φωτισμού	0,52	0,61	0,51	0,42	0,36	0,32	0,46
Χαμηλή θάμβωση	0,17	0,2	0,3	0,3	0,26	0,25	0,25
Απόδοση φωτιστικού	0,1	0,06	0,1	0,18	0,16	0,18	0,13
CRI	0,07	0,04	0,03	0,06	0,16	0,11	0,08
Ενεργειακή απόδοση	0,07	0,04	0,03	0,02	0,05	0,11	0,05
Κόστος	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03

Πίνακας 5.7 Τελικά αποτελέσματα

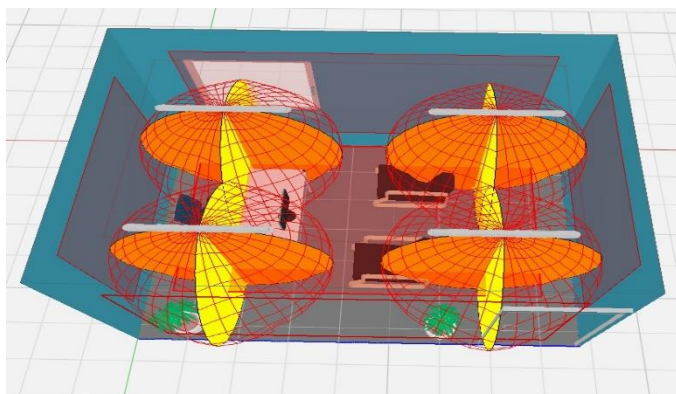
Κριτήριο	Βάρος
Ένταση φωτισμού	0,46
Χαμηλή θάμβωση	0,25
Απόδοση φωτιστικού	0,13
CRI	0,08
Ενεργειακή απόδοση	0,05
Κόστος	0,03

Μέσω της εφαρμογής Relux τοποθετήσαμε στην οροφή γραμμικά φωτιστικά LEDVANCE θερμοκρασίας χρώματος 4000K αλλά διαφορετικής φωτεινής ροής και συνολικής ισχύς κάθε φορά (Εικόνα 42). Κριτήριο αναφοράς για την εξοικονόμηση ενέργειας έχουμε τα 16 W/m^2 . Το επίπεδο αναφοράς μέτρησης είναι τα 0.80m (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017). Μέσω της μεθόδου Topsis και με βάση των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι η καλύτερη επιλογή φωτιστικού για το πρωτόκολλο μεταξύ φωτιστικών DALI είναι η συνολική ισχύς 72W επειδή παρουσιάζει τον χαμηλότερο δείκτη θάμβωσης. Επιπλέον, προσφέρει ομοιομορφία φωτισμού στον χώρο στα 0.6 , λιγότερη κατανάλωση ισχύος και καλύπτει τα επιθυμητά 500Lx που αντιστοιχούν για τον φωτισμό ενός γραφείου (Εικόνα 43). Ειδικά η περίπτωση των 156W απορρίπτεται διότι για να πετύχουμε ομοιομορφία φωτισμού στον χώρο απαιτεί την ύπαρξη έξι φωτιστικών σωμάτων έναντι των υπολοίπων που καλύπτουν τον φωτισμό με τέσσερα φωτιστικά που σημαίνει ότι ανεβαίνει το κόστος εγκατάστασης παράλληλα με την συνολική ισχύ και πιάνει περισσότερο χώρο στην οροφή (Εικόνα 44).

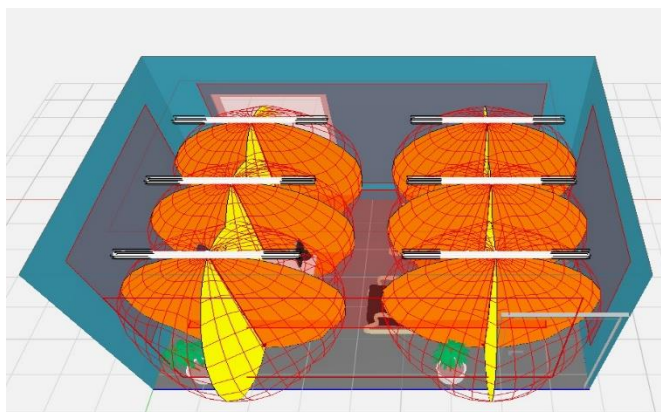
Η επιλογή φωτιστικού με την ονομασία IKON XSB κατηγορίας πρωτοκόλλου KNX με τιμές 1200lm και 10W εν συγκρίσει με την καλύτερη επιλογή μεταξύ των φωτιστικών dali, υποστηρίζει πρωτόκολλο επικοινωνίας dali, τα δε φωτιστικά είναι σημειακές πηγές πράγμα που σημαίνει ότι πιάνουν λιγότερο χώρο στην οροφή, παράγουν συνολική ισχύ 60W, συνολική φωτεινή ροή στα 7200lm, συνολική ισχύς ανά περιοχή 4.27W/m^2 , έχουν δείκτη θάμβωσης ≤ 15.6 και αποδίδουν 120lm/W (Εικόνες 45 και 46). Επιπλέον, όσον αφορά τα lx οι σημειακές πηγές καλύπτουν τις απαιτήσεις του φωτισμού το ίδιο με τα γραμμικά φωτιστικά τύπου dali (Εικόνες 47 και 48). Το σύστημα KNX γενικά προτείνεται ως συμπληρωματική λύση σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ολοκληρωμένος αυτοματισμός κτιρίου. Επομένως, η χειρότερη επιλογή είναι σύστημα dali όσον αφορά αποκλειστικά το κομμάτι του φωτισμού ενώ σε περίπτωση που επιθυμούμε έλεγχο περισσότερων φορτίων η καλύτερη επιλογή είναι το σύστημα KNX.



Εικόνα 42 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κάτοψη Γραφείου.



Εικόνα 43 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός με σύστημα ελέγχου DALI.



Εικόνα 44 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός με σύστημα ελέγχου DALI.

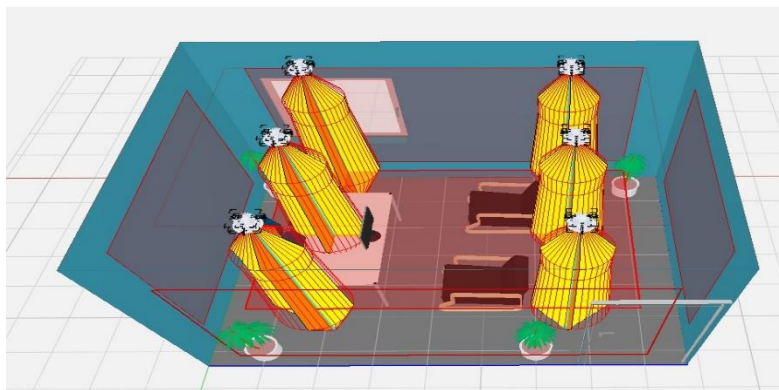
Πίνακας 5.8 Φωτιστικά τύπου Dali

Κωδικός Προϊόντος DAMP PROOF DALI	Total lumen	Συνολική ισχύς ανά περιοχή W/m^2	Συνολική ισχύς W	UGR	Απόδοση φωτισμού Lm/W	CRI
4058075541641	9600	5.13	72	$\leq$ 24.6	133.33	47 77 94 97 100
4058075541702	17600	9.11	128	$\leq$ 26.6	137.5	48 78 94 97 100
4058075541740	21000	11.11	156	$\leq$ 25.3	134.6	47 77 94 97 100
4058075541801	25600	13.10	184	$\leq$ 27.5	139.13	47 77 94 97 100

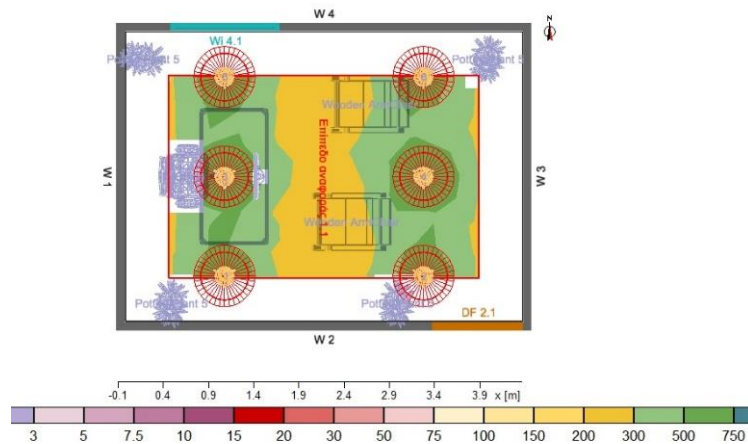
 ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ *Κόκκος Θεόδωρος, Αξιολόγηση συστημάτων ελέγχου φωτισμού*
Η εφαρμογή των μεθόδων της πολυκριτήριας ανάλυσης μας έδειξε ότι η επιλογή συστήματος ελέγχου φωτισμού πρέπει να βασίζεται κυρίως στην ποιότητα του παραγόμενου φωτισμού και την οπτική άνεση. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, το σύστημα DALI αναδεικνύεται ως η καταλληλότερη επιλογή όσον αφορά αποκλειστικά το κομμάτι του φωτισμού, καθώς ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα σημαντικότερα κριτήρια. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας zigbee δεν μας κάνει διότι για την συγκεκριμένη εφαρμογή δεν υπάρχει στην κατηγορία του φωτιστικό με θερμοκρασία χρώματος 4000K.

Γενικά Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται Ύψος επιπέδου φωτιστικού Συντελεστής συντήρησης		Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού 2.80 m 0.80
Total lamp luminous flux Luminaire luminous flux Συνολική ισχύς Συνολική ισχύς ανά περιοχή (14.05 m²)		7200.00 lm 7089.14 lm 60.0 W 4.27 W/m ² (1.07 W/m ² /100lx)
Περιοχή αξιολόγησης 1 E_m E_{min} E_{min}/E_m (U₀) E_{min}/E_{max} (U_d) E_z/E_h Θέση R_{UG} (2.0H 2.0H) Φωτιστικό: (IKON X SB, IKNX120SBNW)	Επίπεδο αναφοράς 1.1 Οριζόντιος 399 lx 239 lx 0.60 0.37 0.80 m <=15.6	κυλινδρικός 81 lx 54 lx 0.67 0.19 1.25 m
Μένιστες επιφάνειες m 1.9 (Οροφή) m 1.5 (Τοίχος) m 1.6 (Τοίχος) m 1.7 (Τοίχος) m 1.8 (Τοίχος)	E_m 43 lx 68 lx 95 lx 61 lx 96 lx	U₀ 0.65 0.53 0.33 0.46 0.33
Τύπος Αριθ. Κατασκ.		
 Tamlite Lighting Αρ. Παραγγελίας : IKNX120SBNW Όνομα φωτιστικού : IKON X SB Εξοπλισμός : 1 x LED 10 W / 1200 lm		

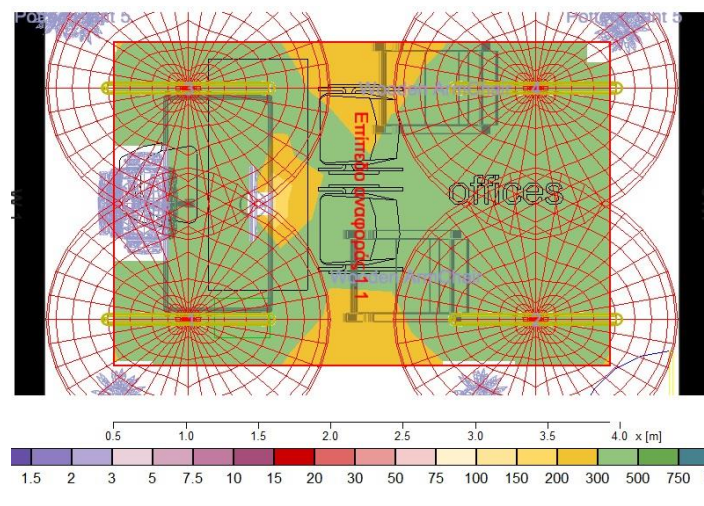
Εικόνα 45 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα της επιλογής φωτιστικού με πρωτόκολλο επικοινωνίας ΚΝΧ.



Εικόνα 46 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Φωτισμός με σύστημα ελέγχου KNX.



Εικόνα 47 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα της επιλογής φωτιστικού με πρωτόκολλο επικοινωνίας KNX με ψευδοχρώματα.



Εικόνα 48 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα της επιλογής φωτιστικού με πρωτόκολλο επικοινωνίας DALI με ψευδοχρώματα.

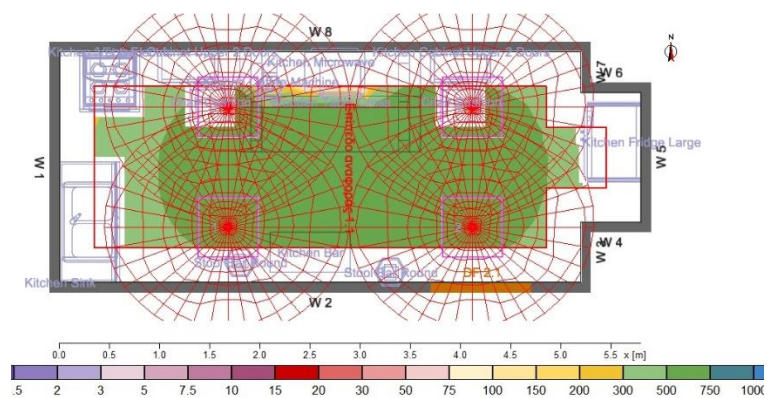
5.2.2 Τοποθέτηση φωτιστικών σε χώρο κουζίνας με βάση πρωτοκόλλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης

Ο χώρος της κουζίνας απαρτίζεται από θερμά χρώματα που σημαίνει ότι η θερμοκρασία χρωμάτων των φωτιστικών σωμάτων θα είναι στα 2700K με 3000K (Τοπαλής Φραγκίσκος Β. Οικονόμου Λάμπρος, Κουρτέση Σταυρούλα, 2021). Ολόκληρος ο χώρος είναι βαμμένος κατά τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να δημιουργεί ατμόσφαιρα χαλάρωσης, να εισέρχεται ο εργαζόμενος με σκοπό να ξεκουραστεί, να νιώσει μια ευχαρίστηση, να κάνει ένα διάλειμμα από το φόρτο εργασίας, να απολαύσει το κολατσιό και να νιώθει σαν να βρίσκεται για λίγο στο σπίτι του (Εικόνα 49).



Εικόνα 49 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κάτοψη κουζίνας.

Κάνοντας εφαρμογή του πρωτοκόλλου zigbee το σχεδιαστικό πρόγραμμα Relux μας εμφανίζει δύο δυνατές επιλογές φωτιστικών σωμάτων. Σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 5.3 και βάση της πολυκριτήριας WSM η καλύτερη επιλογή φωτιστικού είναι η space HUMANITAS επειδή υπερτερεί σε όλα τα κριτήρια έναντι του Granada φωτιστικού. Επίσης, ο φωτισμός είναι επαρκής για να καλύψει τις ανάγκες του χώρου δηλαδή τα 500lx (Εικόνα 50). Για τον φωτισμό της κουζίνας δεν μπορώ να χρησιμοποιήσω πρωτόκολλο Knx διότι δεν υπάρχει φωτιστικό που να υποστηρίζει ομοιομορφία φωτισμού στα 0.6 και δεν μπορώ να κάνω εφαρμογή μέσω dali επειδή δεν υπάρχουν φωτιστικά σώματα που να έχουν θερμοκρασία στα 2700K έως 3000K. υπάρχει μια περίπτωση επιλογής φωτιστικού σώματος αλλά απαιτεί μεγάλο πλήθος φωτιστικών σωμάτων για να πετύχουμε την ομοιομορφία που απαιτεί ο χώρος (Μπουρούσης, 2014).



0

Εικόνα 50 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Ψευδοχρώματα από την εφαρμογή φωτιστικών σωμάτων space HUMANITAS και πρωτοκόλλου zigbee.



Πίνακας 5.9 Φωτιστικά τύπου Zigbee

Ονομασία Προϊόντος	Total lumen	Συνολική ισχύς ανά περιοχή W/m^2	Συνολική ισχύς W	UGR	Απόδοση φωτισμού Lm/W	CRI
Granada HUMANITAS	10520	9.49	120.8	10	87.08	80
Space HUMANITAS	12600	9.49	120.9	≤ 16.6	104.2	85

5.2.3 Τοποθέτηση φωτιστικών σε χώρο υποδοχής με βάση πρωτόκολλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης

Ο φωτισμός του χώρου υποδοχής είναι θερμός στα 3000K επειδή τα χρώματα του χώρου είναι εξίσου θερμά και απαιτεί 300lx για να φωτιστεί πλήρως εν αντιθέσει με το γραφείο και την κουζίνα (Εικόνα 51). Η συνολική ισχύς ανά περιοχή είναι στα $13.64m^2$. Κριτήριο αναφοράς για την εξοικονόμηση ενέργειας έχουμε τα $9.6 W/m^2$. Η μόνη ιδανική περίπτωση για να καλύψουμε πλήρως τις προδιαγραφές του φωτισμού είναι ο συνδυασμός dali με knx. Μόνο το πρωτόκολλο knx αρκεί για να καλύψει τις ανάγκες φωτισμού αλλά επειδή το σύστημα υποστηρίζει dali θα προτιμήσουμε σύμφωνα με την μέθοδο Topsis το φωτιστικό σώμα με την ονομασία IKON XSB (Εικόνες 52 και 53). Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας zigbee και dali από μόνα τους δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν τις προδιαγραφές, διότι υστερούν σε θερμοκρασία χρώματος και στην απαιτούμενη τιμή της ομοιομορφίας του χώρου που είναι στην περίπτωση μας το 0.6 (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2017).

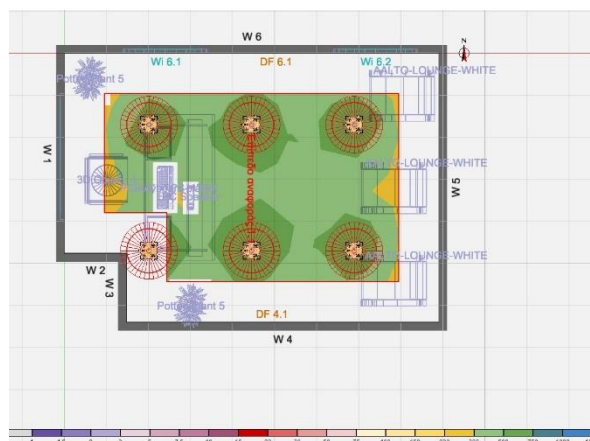


Εικόνα 51 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Κάτοψη χώρου υποδοχής.

Γενικά Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται Ύψος επιπέδου φωτιστικού Συντελεστής συντήρησης		Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού 2.80 m 0.80
Total lamp luminous flux Luminaire luminous flux Συνολική ισχύς Συνολική ισχύς ανά περιοχή (13.64 m ²)		7200.00 lm 7089.14 lm 60.0 W 4.40 W/m ² (0.91 W/m ² /100lx)
Περιοχή αξιολόγησης 1		
Επίπεδο αναφοράς 1.1		
E_m E_{min} $E_{min}/E_m (U_0)$ $E_{min}/E_{max} (U_d)$ E_z/E_h Θέση $R_{us} (2.0H \ 2.0H)$ Φωτιστικό: (IKON X SB, IKNX120SBWWD)	Οριζόντιος 483 lx 289 lx 0.60 0.41 0.80 m ≤ 14.4	κυλινδρικός 102 lx 74 lx 0.73 0.19 1.25 m
Μέγιστες επιφάνειες		
m 1.15 (Οροφή) m 1.1 (Τοίχος) m 1.12 (Τοίχος) m 1.13 (Τοίχος) m 1.14 (Τοίχος)	E_m 54 lx 65 lx 100 lx 85 lx 94 lx	U_0 0.73 0.57 0.52 0.55 0.44
Τύπος Αριθ. Κατασκ.		
Tamlite Lighting Αρ. Παραγγελίας Όνομα φωτιστικού Εξοπλισμός		: IKNX120SBWWD : IKON X SB : 1 x LED 10 W / 1200 lm



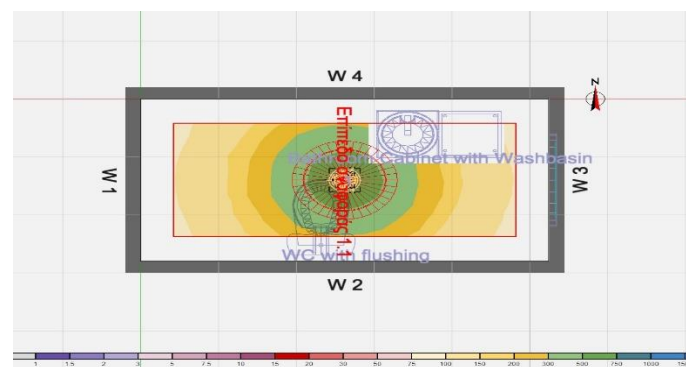
Εικόνα 52 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα φωτισμού με knx-dali στον χώρο υποδοχής.



Εικόνα 53 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα φωτισμού με knx-dali στον χώρο υποδοχής ψευδοχρώματα.

5.2.4 Τοποθέτηση φωτιστικών στο WC με βάση πρωτοκόλλα επικοινωνίας και μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης

Ο φωτισμός στον παρών χώρο δεν έχει τις ίδιες απαιτήσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους χώρους. Ένα φωτιστικό κηχ της εταιρίας Tamlite Lighting των 10W/1200lm και θερμοκρασία χρώματος 4000K επαρκεί για να φωτιστεί ομοιόμορφα όλος ο χώρος. Μεταξύ φωτιστικού και κεντρικής μονάδας θα παρεμβάλλεται ένας αισθητήρας³⁶ κίνησης (Εικόνες 54, 55 και 56). Το φωτιστικό θα ελέγχεται από την κεντρική μονάδα κηχ και αποτελεί ξεχωριστή ομάδα.



Εικόνα 54 Μοντέλο IKNX120SBNW Φωτισμός WC με ψευδοχρώματα. Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου.

Γενικά		Μέσος όρος έμμεσου ποσοστού
Αλγόριθμος υπολογισμού που χρησιμοποιείται		2.80 m
Ύψος επιπέδου φωτιστικού		0.80
Συντελεστής συντήρησης		
Total lamp luminous flux		1200.00 lm
Luminaire luminous flux		1181.52 lm
Συνολική ισχύς		10.0 W
Συνολική ισχύς ανά περιοχή (3.67 m ²)		2.73 W/m ² (1.04 W/m ² /100lx)
Περιοχή αξιολόγησης 1		
Επίπεδο αναφοράς 1.1		
E_m	Οριζόντιος	κυλινδρικός
E_{min}	262 lx	53 lx
$E_{min}/E_m (U_o)$	99 lx	35 lx
$E_{min}/E_{max} (U_a)$	0.38	0.67
E_z/E_h	0.17	
Ούση		0.16
$R_{uc} (1.6H \text{ } 0.9H)$	0.80 m	1.25 m
R_{uc}	10.0	
Φωτιστικό: (IKON X SB, IKNX120SBNW)		
Hints: Encountered room dimensions less than 2H. RUG value has been set to 10 as lower limit.		
Μέγιστες επιφάνειες		
m 1.6 (Οροφή)	E_m	U_o
m 1.4 (Ταίχος)	22 lx	0.78
m 1.5 (Ταίχος)	63 lx	0.35
	59 lx	0.26
ΤύποςΑριθ.Κατασκ.		
4 1 x Tamlite Lighting		
Αρ. Παραγγελίας : IKNX120SBNW		
Όνομα φωτιστικού : IKON X SB		
Εξοπλισμός : 1 x LED 10 W / 1200 lm		

Εικόνα 55 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτελέσματα φωτιστικού για τον φωτισμό WC

³⁶ <https://www.skroutz.gr/s/60228651/eurolamp-ensyrmatos-aisthitiras-kinisis-147-02322.html#description> (Ανακτήθηκε στις 24/12/2025)



Εικόνα 56 Αισθητήρας κίνησης. Πηγή <https://www.skroutz.gr/s/60228651/eurolamp-ensyrmatos-aisthitiras-kinisis-147-02322.html#description>

5.2.5 Εφαρμογή λογισμικού visual Promethee

Το λογισμικό Visual PROMETHEE αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων, βασισμένο στη μέθοδο PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation). Χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπου πρέπει να επιλεγεί η καλύτερη εναλλακτική λύση ανάμεσα σε πολλές, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια. Στην περίπτωση επιλογής μεταξύ τεχνολογιών όπως KNX, Zigbee και DALI, το Visual PROMETHEE μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην αντικειμενική αξιολόγηση και κατάταξή τους. Η μέθοδος promethee είναι ιδανική σε περίπτωση ύπαρξης πολλών κριτηρίων με διαφορετική φύση, επιδιώκουμε ρεαλιστική μοντελοποίηση των εκάστοτε προτιμήσεων, χρειαζόμαστε διαφάνεια και εξήγηση αποτελεσμάτων και είναι αποτελεσματική σε τεχνικές εφαρμογές. Η υλοποίηση της εφαρμογής δεν εφαρμόζεται σε περίπτωση απλού προβλήματος όσον αφορά μια επιλογή, όταν χρειαζόμαστε συμμετοχή πολλών εναλλακτικών όπου εκεί χρησιμοποιούμε την μέθοδο AHP όπως επίσης και όταν δεν έχουμε σαφή δεδομένα μολονότι υπάρχει κίνδυνος να γίνει δύσχρηστη. Η promethee συνδυάζει ακρίβεια, ευελιξία, πρακτικότητα και σε επιλογή χρήσης μεταξύ των πρωτοκόλλων μπορεί να αποτυπώσει με ρεαλισμό τις τεχνικές διαφορές αλλά και τις προτεραιότητες του έργου (Brans, J. P., & Vincke, P., 1985).

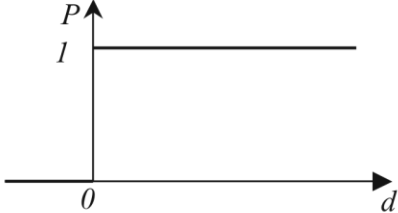
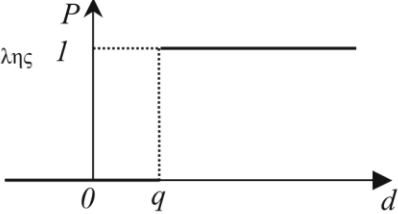
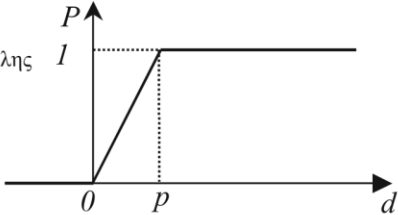
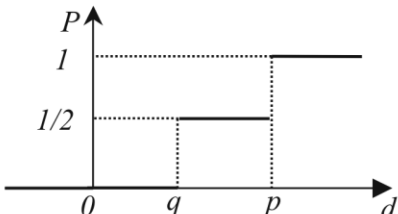
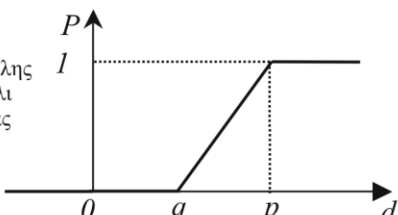
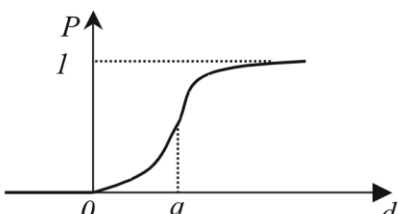
Αρχικά, είναι σημαντικό να κατανοηθεί πώς λειτουργεί το Visual PROMETHEE. Η βασική ιδέα είναι ότι ο χρήστης ορίζει ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών στην περίπτωση μας μεταξύ KNX, Zigbee, DALI και ένα σύνολο κριτηρίων αξιολόγησης. Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία ενός νέου project στο Visual PROMETHEE. Εκεί εισάγονται οι εναλλακτικές επιλογές και στη συνέχεια τα κριτήρια. Για κάθε κριτήριο, ο χρήστης πρέπει να ορίσει αν επιθυμεί μεγιστοποίηση και συνοδεύεται από ένα βάρος, που εκφράζει τη σχετική του σημασία.



Η PROMETHEE κάνει χρήση συναρτήσεων προτίμησης. Αυτές οι συναρτήσεις μετατρέπουν τη διαφορά μεταξύ των τιμών δύο εναλλακτικών σε έναν βαθμό προτίμησης (Chen, S. J., & Hwang, C. L., 1992). Το Visual PROMETHEE προσφέρει διάφορους τύπους συναρτήσεων, οι οποίοι αναφέρονται στον πίνακα 5.10 επιτρέποντας στον χρήστη την μοντελοποίηση. Για παράδειγμα, μικρές διαφορές μεταξύ φωτιστικών ιδίου πρωτοκόλλου όσον αφορά τα κριτήρια επιλογής μπορεί να θεωρούνται αμελητέες, ενώ μεγάλες διαφορές να επηρεάζουν σημαντικά την απόφαση. Αφού εισαχθούν τα δεδομένα, το λογισμικό υπολογίζει τους δείκτες υπεροχής για κάθε εναλλακτική. Αυτοί οι δείκτες εκφράζουν πόσο μια επιλογή υπερέχει έναντι των άλλων και πόσο υστερεί. Ο καθαρός δείκτης χρησιμοποιείται για την τελική κατάταξη με αποτέλεσμα ο χρήστης να μπορεί να δει ποια τεχνολογία είναι συνολικά η καλύτερη με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια (Mareschal, B., 2013).



Πίνακας 5.10 Συναρτήσεις προτίμησης της μεθόδου Promethee από το βιβλίο μοντέλα
αποφάσεων του Σίσκου Ιωάννη 2008

Γενικευμένο κριτήριο	Ορισμός	Παράμετροι
Τύπος 1: Κριτήριο κοινό 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	-
Τύπος 2: Κριτήριο U - καμπύλης 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
Τύπος 3: Κριτήριο V - καμπύλης 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
Τύπος 4: Κριτήριο επιπέδων 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Τύπος 5: Κριτήριο V - καμπύλης με κατώφλι αδιαφορίας 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Τύπος 6: Κριτήριο Gauss 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s



Το KNX είναι ένα ενσύρματο και πολύ αξιόπιστο σύστημα, κατάλληλο για μεγάλες εγκαταστάσεις. Το Zigbee είναι ασύρματο, ευέλικτο και οικονομικό, αλλά μπορεί να επηρεάζεται από παρεμβολές. Το DALI χρησιμοποιείται κυρίως για φωτισμό και προσφέρει υψηλή ακρίβεια στον έλεγχο φωτιστικών συστημάτων. Με τη χρήση του Visual PROMETHEE, ο μηχανικός ή ο μελετητής μπορεί να συγκρίνει αυτές τις τεχνολογίες με πιο αντικειμενικό τρόπο. Έπειτα, μέσω της στάθμισης των κριτηρίων, το τελικό αποτέλεσμα προσαρμόζεται στις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου.

Το Visual PROMETHEE παρέχει γραφικά εργαλεία, όπως το GAIA plane, που επιτρέπουν την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Μέσω αυτών των διαγραμμάτων, ο χρήστης μπορεί να δει τη σχέση μεταξύ των κριτηρίων και των εναλλακτικών, καθώς και πιθανές συγκρούσεις μεταξύ κριτηρίων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν οι αποφάσεις δεν είναι προφανείς και απαιτείται βαθύτερη ανάλυση. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ανάλυσης ευαισθησίας. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα βάρη των κριτηρίων και να δει πώς επηρεάζεται η τελική κατάταξη. Αυτό βοηθά στην κατανόηση του πόσο σταθερή είναι η απόφαση. Για παράδειγμα, αν μικρές αλλαγές στα βάρη αλλάζουν δραστικά το αποτέλεσμα, τότε η απόφαση είναι ευαίσθητη και απαιτείται προσοχή (Mareschal, B., & De Smet, Y., 2009).

5.2.6 Μελέτη φωτισμού για τον χώρο γραφείου μέσω της εφαρμογής visual Promethee

Για την μελέτη περίπτωσης εσωτερικού χώρου γραφείου έχουμε κάνει εφαρμογή ενός πλήρους μοντέλου πολυκριτηριακής ανάλυσης στο Visual PROMETHEE βάση του οποίου θα αξιολογήσουμε τρία είδη εναλλακτικών συστημάτων ελέγχου φωτισμού, αυτά των KNX, DALI και Zigbee, με βάση συγκεκριμένα τεχνικά και λειτουργικά κριτήρια που σχετίζονται με την ποιότητα φωτισμού και τη συνολική απόδοση μιας εγκατάστασης. Για να είμαστε ακριβείς μετατρέπουμε ένα πρόβλημα επιλογής τεχνολογίας σε ένα μαθηματικά δομημένο μοντέλο λήψης απόφασης, όπου κάθε επιλογή αξιολογείται συστηματικά και συγκρίνεται με τις υπόλοιπες (Εικόνα 57).



	ΓΡΑΦΕΙΟ	ΕΝΤΑΣΗ ΦΩ...	ΘΑΜΒΩΣΗ	ΑΠΟΔΟΣΗ Φ...	CRI	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ...	ΚΟΣΤΟΣ
Unit		unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group		◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences							
Min/Max		max	min	max	max	min	min
Weight		0,25	0,20	0,20	0,15	0,10	0,10
Preference Fn.		Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Thresholds		percentage	percentage	percentage	percentage	percentage	percentage
- Q: Indifference		0,2	0,2	0,3	0,1	0,5	1
- P: Preference		1	1	1	0,5	1,5	3
- S: Gaussian		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics							
Minimum		6	6	6	6	7	5
Maximum		9	9	9	9	9	9
Average		7	7	7	7	8	7
Standard Dev.		1	1	1	1	1	2
Evaluations							
☒ KNX		7	7	7	7	8	5
☒ DALI		9	9	9	9	9	6
☒ ZIGBEE		6	6	6	6	7	9

Εικόνα 57 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Μοντέλο λήψης αποφάσεων visual Promethee.

Αρχικά γνωρίζουμε ότι το KNX λειτουργεί ως ένα γενικό σύστημα αυτοματισμού κτιρίων, το DALI εξειδικεύεται στον έλεγχο φωτισμού ενώ το Zigbee αποτελεί μια ασύρματη λύση που δίνει έμφαση στο χαμηλό κόστος και την ευκολία εγκατάστασης. Αυτές οι τρεις επιλογές εισάγονται στο μοντέλο ως συγκρίσιμες οντότητες μολονότι παρουσιάζουν φιλοσοφία ως προς την λειτουργία του, κάτι που καθιστά ακόμη πιο σημαντική την εφαρμογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Κατόπιν, ορίζουμε κριτήρια κατά προτεραιότητα με βάση του τι επιδιώκουμε από τον φωτισμό και το τι θέλουμε να ελέγχουμε μέσω της εφαρμογής ενός πρωτοκόλλου. Τα δε κριτήρια είναι η ένταση φωτισμού, η θάμβωση, η απόδοση φωτιστικού, ο δείκτης CRI, η ενεργειακή απόδοση και τελευταίο το κόστος (Mareschal, B., 2013).

Η ανάθεση των βαρών βλέπε πίνακα 5.11 αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα, καθώς καθορίζει πόσο επηρεάζει κάθε κριτήριο το τελικό αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα ευνοεί λύσεις που προσφέρουν καλύτερη ποιότητα φωτισμού, ακόμη και αν αυτές έχουν υψηλότερο κόστος όπου είναι απόλυτα λογικό διότι η επαγγελματική χρήση ενός φωτισμού εστιάζει στην οπτική άνεση και στην απόδοση τους (Σωτηροπούλου, 2014).



Πίνακας 5.11 Κλίμακα βαρών της μεθόδου Promethee

Εύρος Βάρους	Ερμηνεία
0,00 – 0,10	Χαμηλή Σημαντικότητα
0,11 – 0,20	Μεσαία Σημαντικότητα
0,21 – 0,30	Υψηλή Σημαντικότητα
> 0,30	Πολύ Υψηλή / Κρίσιμη

Σε όλα τα κριτήρια επιλέγουμε γραμμική συνάρτηση προτίμησης (linear preference function) επειδή, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ δύο εναλλακτικών σε ένα κριτήριο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η προτίμηση της μίας έναντι της άλλης, με τρόπο αναλογικό γιατί αποφεύγουμε απότομες αλλαγές και μας επιτρέπει μια πιο ομαλή αλλά επίσης μια ρεαλιστική σύγκριση.

Τα λεγόμενα thresholds που έχουμε ορίσει, δηλαδή τα q και p , καθορίζουν πότε μια διαφορά θεωρείται αμελητέα και πότε σημαντική. Οι τιμές που έχουμε ορίσει είναι σχετικά μικρές για τα περισσότερα lighting criteria, επειδή μικρές διαφορές στις επιδόσεις θέλουμε να λαμβάνονται υπόψη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο κομμάτι του φωτισμού λόγω ότι μικρές αλλαγές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Για το κόστος, έχουμε επιλέξει μεγαλύτερα thresholds, επειδή δεν θεωρούμε τις μικρές διαφορές κόστους κρίσιμες, αλλά μόνο τις μεγάλες αποκλίσεις (Brans, J. P., & Vincke, P., 1985).

Στο κομμάτι των statistics, έχουμε κάνει εισαγωγή βασικών περιγραφικών στατιστικών για κάθε κριτήριο, όπως το ελάχιστο, το μέγιστο, τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση. Αυτές οι τιμές δεν επηρεάζουν άμεσα τον υπολογισμό των flows, αλλά χρησιμοποιούνται για αναλύσεις ευαισθησίας και για την κατανόηση της διασποράς των δεδομένων. Η τυπική απόκλιση είναι σχετικά χαμηλή, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι τιμές είναι συγκεντρωμένες και δεν υπάρχουν έντονες αποκλίσεις, εκτός από το κόστος όπου η απόκλιση είναι μεγαλύτερη λόγω του zigbee.

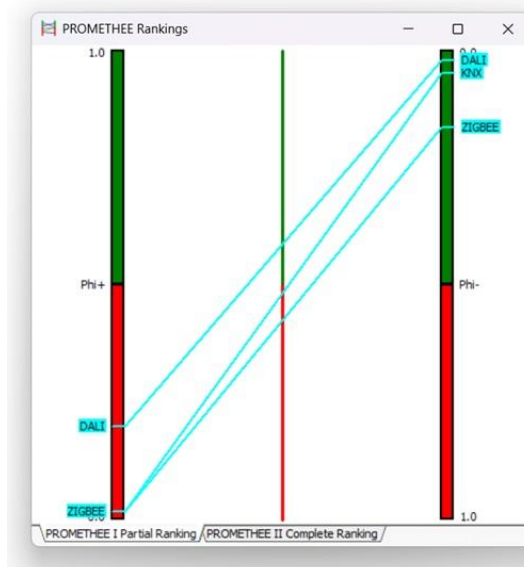
Το πιο ουσιαστικό μέρος είναι οι αξιολογήσεις (evaluations), όπου έχουμε κάνει απόδοση συγκεκριμένων τιμών σε κάθε εναλλακτική για κάθε κριτήριο. Το DALI έχει τις υψηλότερες τιμές στα περισσότερα κριτήρια που σχετίζονται με την ποιότητα φωτισμού, κάτι που αντικατοπτρίζει την πραγματική του υπεροχή στον έλεγχο φωτιστικών και στο dimming.

Το KNX βρίσκεται σε ενδιάμεση θέση, προσφέροντας ικανοποιητική απόδοση αλλά χωρίς την εξειδίκευση του DALI. Το Zigbee έχει χαμηλότερες επιδόσεις στα περισσότερα τεχνικά κριτήρια, αλλά υπερέχει στο κόστος, όπου έχει την υψηλότερη βαθμολογία λόγω χαμηλότερης τιμής (Brans, J. P., & Vincke, P., 1985).

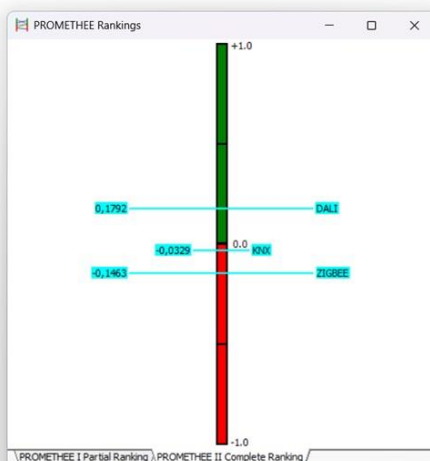
Ένα κρίσιμο σημείο αποτελεί ο ορισμός του min/max για κάθε κριτήριο. Στην προκειμένη φάση έχουμε δηλώσει ότι η θάμβωση είναι κριτήριο προς ελαχιστοποίηση, ενώ ταυτόχρονα έχουμε δώσει υψηλότερη τιμή στο DALI. Αυτό δημιουργεί μια αντίφαση, μολονότι το μοντέλο ερμηνεύει τη μεγαλύτερη τιμή ως χειρότερη επίδοση.

Το μοντέλο βάση των παραμέτρων που έχουμε δώσει εν τέλει ευνοεί το DALI λόγω της υψηλής του απόδοσης στα βασικά κριτήρια φωτισμού, ενώ το KNX ακολουθεί ως μια ισορροπημένη λύση και το Zigbee τοποθετείται χαμηλότερα.

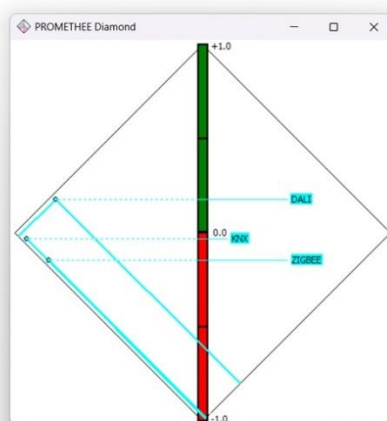
Το αποτέλεσμα που εμφανίζονται σύμφωνα με τις μετρήσεις μας δείχνουν την συνολική κατάταξη των τριών συστημάτων. Η εφαρμογή visual promethee σύγκρινε την απόδοση της κάθε επιλογής στην ορατότητα, τη θάμβωση, την ποιότητα φωτισμού, το CRI, την ενεργειακή συμπεριφορά και το κόστος, και κατέληξε στο ποιο σύστημα υπερέχει συνολικά (Εικόνες 58, 59, 60 και 61).



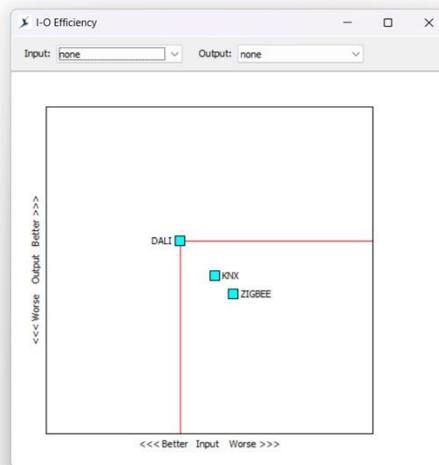
Εικόνα 58 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Promethee II Rankings.



Εικόνα 59 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. *Promethee I Rankings*

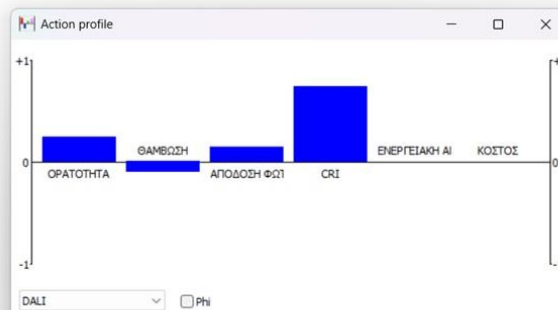


Εικόνα 60 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. *Promethee Diamond*

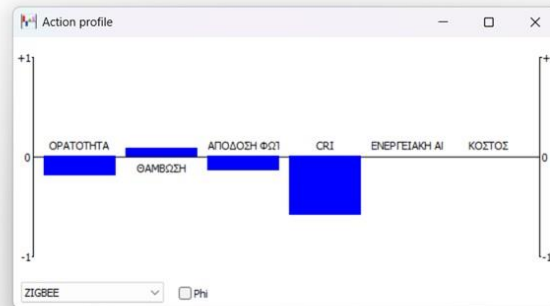


Εικόνα 61 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. I-O Efficiency

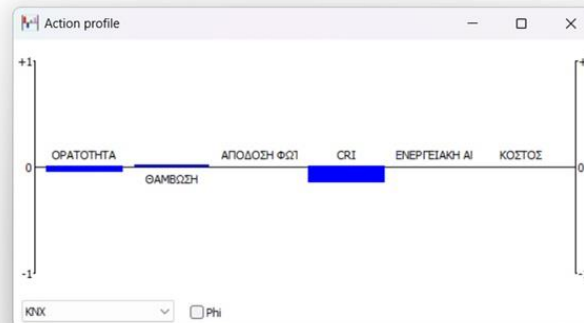
Στα γραφήματα φαίνεται ότι το DALI βρίσκεται πιο ψηλά έναντι των υπολοίπων, κάτι που σημαίνει ότι τη παρουσιάζει καλύτερη συνολική επίδοση. Αυτό συμβαίνει επειδή στα περισσότερα βασικά κριτήρια φωτισμού, όπως η ένταση φωτισμού στα διαγράμματα αναφέρεται με τον όρο ορατότητα, η χαμηλή θάμβωση, η απόδοση και το CRI, του έχει δώσει υψηλότερες τιμές και ταυτόχρονα αυτά τα κριτήρια έχουν και τα μεγαλύτερα βάρη. Με άλλα λόγια, το μοντέλο δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην ποιότητα του φωτισμού και εκεί το DALI υπερέχει. Το KNX εμφανίζεται στη δεύτερη θέση, κάτι που δείχνει ότι αποτελεί μια καλή αλλά όχι κορυφαία λύση. Έχει πιο ισορροπημένες επιδόσεις χωρίς μεγάλες αδυναμίες, αλλά δεν φτάνει την εξειδίκευση του DALI όσον αφορά τον έλεγχο φωτισμού (Εικόνες 62,63 και 64).



Εικόνα 62 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Action profile dali



Εικόνα 63 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Action profile zigbee



Εικόνα 64 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Action profile knx

Το Zigbee βρίσκεται χαμηλότερα στην κατάταξη, παρόλο που έχει πλεονέκτημα στο κόστος. Ο λόγος είναι ότι το κόστος έχει μικρότερο βάρος σε σχέση με τα υπόλοιπα κριτήρια, οπότε δεν μπορεί να αντισταθμίσει τις χαμηλότερες επιδόσεις του στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φωτισμού. Το μοντέλο δηλαδή “προτιμά” καλύτερο φωτισμό με λίγο μεγαλύτερο κόστος, παρά φθηνότερη λύση με χαμηλότερη ποιότητα.

Συνολικά, το αποτέλεσμα είναι απολύτως συνεπές με τον τρόπο που στήσαμε το πρόβλημα. Έχεις δώσει προτεραιότητα στην ποιότητα φωτισμού και όχι στο κόστος, και το σύστημα που είναι τεχνικά καλύτερο σε αυτά τα κριτήρια βγαίνει πρώτο. Έτσι, η κατάταξη που προκύπτει δεν είναι τυχαία αλλά αντικατοπτρίζει τις προτιμήσεις που ορίσαμε από την αρχή.

Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στις παρακάτω εικόνες αποτελεί τον πίνακα ρωών της μεθόδου PROMETHEE και χρησιμοποιείται για την τελική κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών. Στην προκειμένη περίπτωση, οι εναλλακτικές που αξιολογούνται είναι τα συστήματα DALI, KNX και ZIGBEE.



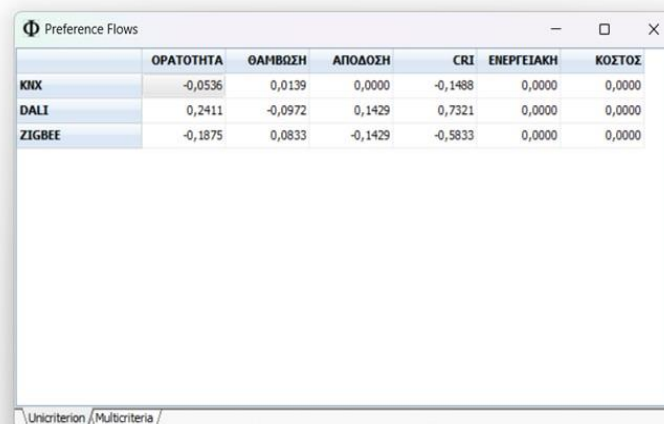
Ο πίνακας παρουσιάζει με αριθμητικό τρόπο το πόσο καλή είναι κάθε επιλογή, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια που έχουν οριστεί στην ανάλυση (Εικόνες 65 και 66). Η πρώτη στήλη μας δείχνει τη θέση κατάταξης κάθε εναλλακτικής. Βλέπουμε ότι το DALI βρίσκεται στην πρώτη θέση, το KNX στη δεύτερη και το ZIGBEE στην τρίτη. Αυτή η κατάταξη βασίζεται στη συνολική επίδοση κάθε επιλογής, όπως αυτή προκύπτει από τους υπολογισμούς της μεθόδου. Η στήλη Φ_i αντιπροσωπεύει τη συνολική καθαρή ροή για κάθε εναλλακτική. Πρόκειται για τον βασικό δείκτη που καθορίζει την τελική κατάταξη. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του Φ_i , τόσο καλύτερη θεωρείται η εναλλακτική. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας DALI έχει θετική τιμή, γεγονός που δείχνει ότι υπερέχει συνολικά έναντι των άλλων επιλογών. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας KNX έχει τιμή κοντά στο μηδέν, πράγμα που σημαίνει ότι βρίσκεται περίπου στη μέση, ενώ το πρωτόκολλο επικοινωνίας ZIGBEE έχει αρνητική τιμή, υποδηλώνοντας ότι υστερεί σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Οι στήλες Φ_i^+ και Φ_i^- δείχνουν πιο αναλυτικά από πού προκύπτει αυτή η συνολική εικόνα. Η τιμή Φ_i^+ εκφράζει τη θετική ροή, δηλαδή το πόσο μια εναλλακτική υπερέχει των άλλων. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή, τόσο περισσότερο «κερδίζει» σε συγκρίσεις με τις υπόλοιπες επιλογές. Αντίθετα, η τιμή Φ_i^- εκφράζει την αρνητική ροή, δηλαδή το πόσο μια εναλλακτική υστερεί σε σχέση με τις άλλες. Όσο μικρότερη είναι αυτή η τιμή, τόσο λιγότερο «χάνει». Συνδυάζοντας τις δύο αυτές τιμές, προκύπτει η καθαρή ροή Φ_i , η οποία είναι ουσιαστικά η διαφορά μεταξύ της θετικής και της αρνητικής ροής. Για παράδειγμα, το DALI έχει υψηλή θετική ροή και πολύ μικρή αρνητική, γεγονός που εξηγεί γιατί βρίσκεται στην κορυφή της κατάταξης. Το KNX έχει μικρότερη θετική ροή και μεγαλύτερη αρνητική σε σχέση με το DALI, ενώ το ZIGBEE εμφανίζει χαμηλή θετική ροή και υψηλή αρνητική, κάτι που το τοποθετεί τελευταίο (Mareschal, B., & De Smet, Y., 2009).



Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	DALI		0,1792	0,1987	0,0194
2	KNX		-0,0329	0,0153	0,0482
3	ZIGBEE		-0,1463	0,0167	0,1629

Εικόνα 65 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Promethee Flow Table



	ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ	ΘΑΜΒΩΣΗ	ΑΠΟΔΟΣΗ	CRI	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	ΚΟΣΤΟΣ
KNX	-0,0536	0,0139	0,0000	-0,1488	0,0000	0,0000
DALI	0,2411	-0,0972	0,1429	0,7321	0,0000	0,0000
ZIGBEE	-0,1875	0,0833	-0,1429	-0,5833	0,0000	0,0000

Unicriterion / Multicriteria

Εικόνα 66 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Preference Flows

Μέσω της εφαρμογής visual promethee μας παρέχετε η δυνατότητα χρήσης ενός εργαλείου με την ονομασία GAIA, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά για την οπτικοποίηση και κατανόηση σύνθετων αποφάσεων. Στο κέντρο της απεικόνισης βρίσκεται ένα σύστημα αξόνων δύο διαστάσεων, όπου προβάλλονται τόσο τα κριτήρια όσο και οι εναλλακτικές επιλογές, επιτρέποντας στον χρήστη να κατανοήσει τις σχέσεις, τις συγκρούσεις και τις προτιμήσεις που προκύπτουν από τα δεδομένα (Εικόνα 67).



Ο οριζόντιος και ο κάθετος άξονας σχηματίζουν ένα επίπεδο στο οποίο προβάλλονται διανύσματα. Τα διανύσματα αυτά αντιπροσωπεύουν τα κριτήρια αξιολόγησης, που τα έχουμε λάβει υπόψη στην ανάλυση. Κάθε κριτήριο εμφανίζεται ως ένα βέλος που ξεκινά από το κέντρο και κατευθύνεται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η κατεύθυνση και το μήκος του διανύσματος υποδηλώνουν τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου κριτηρίου σε σχέση με τα υπόλοιπα. Όταν δύο διανύσματα είναι κοντά μεταξύ τους, αυτό σημαίνει ότι τα αντίστοιχα κριτήρια είναι συμβατά ή παρουσιάζουν παρόμοια τάση αξιολόγησης. Αντιθέτως, όταν τα διανύσματα έχουν αντίθετη κατεύθυνση, υποδηλώνεται σύγκρουση μεταξύ των κριτηρίων, δηλαδή ένα κριτήριο ευνοεί κάτι που το άλλο αποθαρρύνει (Brans, J.-P., & De Smet, Y., 2016).

Στην εικόνα διακρίνονται διανύσματα, τα οποία φέρουν ελληνικές ονομασίες, όπως η απόδοση, η ορατότητα, η χαμηλή θάμβωση και ο δείκτης χρωματικής απόδοσης γνωστός με τα αρχικά CRI. Αυτά αποτελούν τα κριτήρια της ανάλυσης. Για παράδειγμα, η «Απόδοση Φωτιστικού» φαίνεται να κατευθύνεται προς τα πάνω, υποδηλώνοντας ότι αυτό το κριτήριο διαφοροποιείται έντονα από άλλα που βρίσκονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Από την άλλη πλευρά, η «Θάμβωση» εμφανίζεται σε διαφορετική κατεύθυνση, γεγονός που πιθανόν σημαίνει ότι υπάρχει αντίθεση μεταξύ της βελτίωσης της απόδοσης και της μείωσης της θάμβωσης. Αυτού του είδους η οπτικοποίηση βοηθά τον εκάστοτε αναλυτή να εντοπίσει συγκρούσεις που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο να παρατηρηθούν μέσα από απλούς πίνακες δεδομένων. Εκτός από τα κριτήρια, στο ίδιο επίπεδο προβάλλονται και οι εναλλακτικές λύσεις, οι οποίες συνήθως απεικονίζονται ως σημεία ή μικρά τετράγωνα. Στην εικόνα φαίνονται ορισμένα τέτοια σημεία, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές επιλογές που αξιολογούνται. Η θέση τους σε σχέση με τα διανύσματα των κριτηρίων δείχνει πόσο καλά ικανοποιούν το κάθε κριτήριο. Για παράδειγμα, μια εναλλακτική που βρίσκεται κοντά στην κατεύθυνση ενός συγκεκριμένου διανύσματος θεωρείται ότι αποδίδει καλά ως προς το συγκεκριμένο κριτήριο. Αντίθετα, αν βρίσκεται στην αντίθετη κατεύθυνση, τότε πιθανόν υστερεί (Brans, J.-P., & De Smet, Y., 2016).

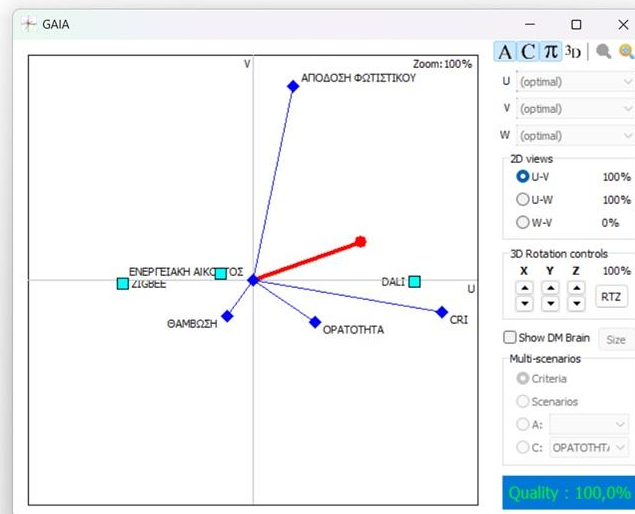
Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία που απεικονίζεται είναι το κόκκινο διάνυσμα, το οποίο αντιπροσωπεύει τον άξονα απόφασης, γνωστό και ως “decision axis”. Αυτό το διάνυσμα συνοψίζει τις προτιμήσεις που έχουμε αποφασίσει, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τη βαρύτητα που έχει δοθεί σε κάθε κριτήριο. Η κατεύθυνσή του δείχνει τη συνολική τάση της απόφασης, ενώ το μήκος του συνδέεται με την ποιότητα της αναπαράστασης.



Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι καλύτερες εναλλακτικές στην κατεύθυνση αυτού του άξονα, τόσο πιο κατάλληλες θεωρούνται σύμφωνα με τα δεδομένα και τις προτιμήσεις που έχουν τεθεί (Brans, J.-P., & De Smet, Y., 2016).

Στη δεξιά πλευρά της εικόνας υπάρχει ένα πάνελ ρυθμίσεων που επιτρέπει την προσαρμογή της προβολής. Εκεί εμφανίζονται επιλογές όπως διαφορετικοί συνδυασμοί αξόνων, για παράδειγμα U-V, U-W και V-W, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές δισδιάστατες προβολές ενός πολυδιάστατου χώρου. Αυτό είναι σημαντικό γιατί η ανάλυση βασίζεται σε περισσότερες από δύο διαστάσεις, αλλά για λόγους οπτικοποίησης προβάλλεται σε δύο. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει την προβολή ώστε να εξετάσει τα δεδομένα από διαφορετικές οπτικές γωνίες και να εντοπίσει σχέσεις που μπορεί να μην είναι εμφανείς σε μια μόνο προβολή. Επιπλέον, υπάρχει ένδειξη "Quality: 100,0%", η οποία δείχνει το ποσοστό της πληροφορίας που διατηρείται στην τρέχουσα δισδιάστατη προβολή. Σε αυτή την περίπτωση, η ποιότητα είναι μέγιστη, πράγμα που σημαίνει ότι η προβολή αποτυπώνει πλήρως τη δομή των δεδομένων χωρίς απώλειες. Αυτό δεν είναι πάντα δεδομένο, καθώς σε πολλές περιπτώσεις η μείωση των διαστάσεων συνεπάγεται απώλεια πληροφορίας (Brans, J.-P., & De Smet, Y., 2016).

Η χρήση του GAIA δεν περιορίζεται μόνο σε τεχνικές εφαρμογές, αλλά μπορεί να αξιοποιηθεί και σε διοικητικά, οικονομικά ή περιβαλλοντικά ζητήματα, όπου απαιτείται αξιολόγηση πολλαπλών παραγόντων. Μέσα από τέτοιου είδους εργαλεία, η διαδικασία λήψης αποφάσεων γίνεται πιο διαφανής, πιο κατανοητή και πιο αξιόπιστη, καθώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει ξεκάθαρα πώς επηρεάζουν τα διάφορα κριτήρια το τελικό αποτέλεσμα (Mareschal, B., & De Smet, Y., 2009).



Εικόνα 67 Προσωπικό αρχείο σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Gaia

5.2.7 Ανάλυση ευαισθησίας της εφαρμογής visual Promethee

Η πολυκριτήρια αν και αποτελεί ισχυρό εργαλείο λήψης αποφάσεων δεν θεωρείται απόλυτα αληθές, αλλά ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων που βοηθά τον εκάστοτε μελετητή να επιλέξει την βέλτιστη λύση σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Αυτό συμβαίνει διότι, οι αριθμοί του πίνακα όσον αφορά τα βάρη τα thresholds, τα min-max ορίζονται από τον χρήστη. Κατόπιν, το πρόγραμμα αναλαμβάνει να πραγματοποιήσει μαθηματικούς τύπους και παρουσιάζει τα αποτελέσματα με μορφή εύκολη προς κατανόηση. Η ποιότητα της τελικής απόφασης εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των δεδομένων και το πόσο σωστά έχουν οριστεί οι παράμετροι της αξιολόγησης. Εφόσον οι βαθμολογίες είναι αυθαίρετες το αποτέλεσμα δεν είναι αξιόπιστο.

Κάθε στήλη του πίνακα αντιστοιχεί σε ένα κριτήριο αξιολόγησης. Τα κριτήρια αυτά εκφράζουν διαφορετικές ιδιότητες του συστήματος. Η ένταση φωτισμού σχετίζεται με το πόσο αποτελεσματικός είναι ο φωτισμός σε έναν χώρο. Η θάμβωση σχετίζεται με την οπτική άνεση των χρηστών. Το CRI εκφράζει την πιστότητα απόδοσης των χρωμάτων. Η ενεργειακή απόδοση αφορά την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος αφορά την οικονομική επιβάρυνση της εγκατάστασης. Σε πραγματικές μελέτες, τα κριτήρια αυτά μπορεί να προκύπτουν από τεχνικές προδιαγραφές, πρότυπα φωτισμού, μετρήσεις ή απαιτήσεις του πελάτη. Αν δώσουμε πολύ μεγάλο βάρος στο κόστος το φθηνότερο σύστημα σχεδόν πάντα θα κερδίζει.



Οι αριθμοί στον πίνακα εμφανίζονται με διαφορετικά χρώματα. Το πράσινο δείχνει καλύτερη επίδοση ενώ το κόκκινο δείχνει χειρότερη επίδοση. Το χρώμα εξαρτάται από το αν το κριτήριο είναι “max” ή “min” επομένως δεν δείχνουν μόνο το μέγεθος του αριθμού, αλλά το πόσο επιθυμητός είναι ο αριθμός σε σχέση με τον στόχο του κριτηρίου.

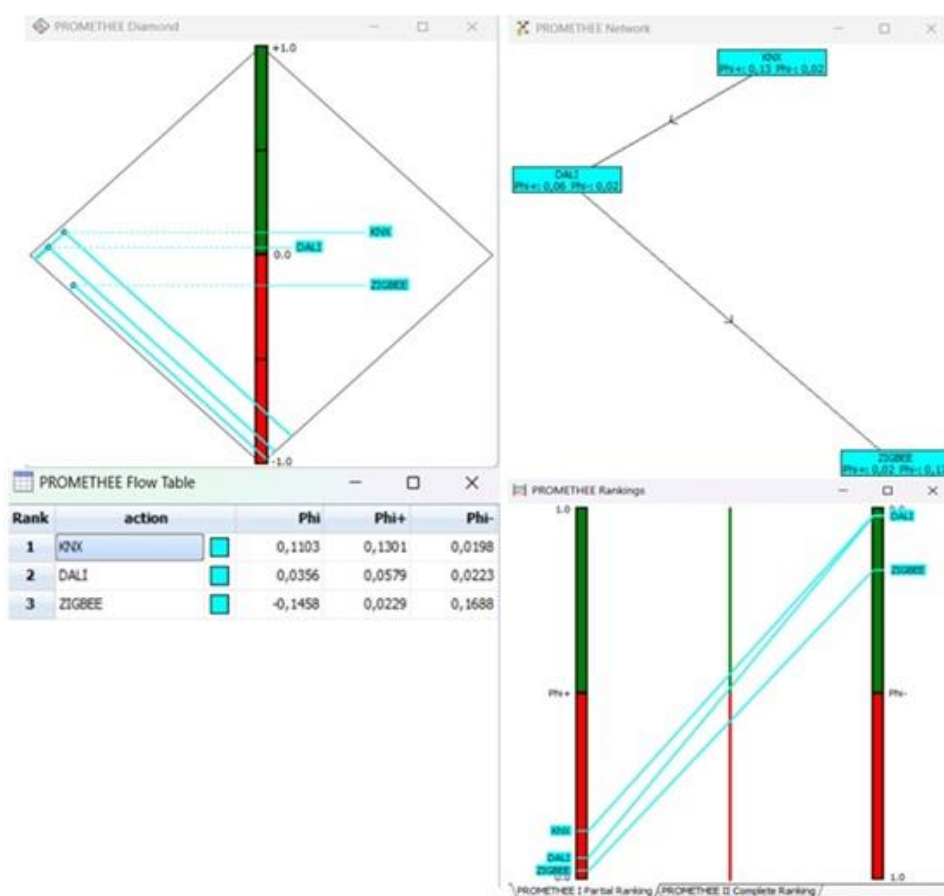
Στη γραμμή “Min/Max” ορίζεται αν ένα κριτήριο πρέπει να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται. Όταν εμφανίζεται η ένδειξη “max”, σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή τόσο καλύτερο θεωρείται το αποτέλεσμα. Στην περίπτωση μας ένας υψηλός δείκτης χρωματικής απόδοσης θεωρείται καλύτερος όπως επίσης μια μεγαλύτερη απόδοση φωτισμού θεωρείται θετική. Όταν εμφανίζεται η ένδειξη “min”, σημαίνει ότι επιθυμούμε μικρότερη τιμή. Στις περισσότερες μελέτες το μικρότερο κόστος είναι προτιμότερο και επιθυμητά η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας είναι καλύτερη. Όλη η πληροφορία αυτή είναι πολύ σημαντική, επειδή επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα χρωματίζει τις τιμές και υπολογίζει ποια λύση είναι καλύτερη.

Πάμε να αλλάξουμε τις τιμές στα βάρη και στα evaluations για να δούμε εάν το αποτέλεσμα θα μείνει ίδιο. Σύμφωνα με τις νέες τιμές που έχουμε δώσει το σύστημα Knx υπερτερεί ένα του dali και του zigbee. Αυτό επαληθεύει όσα ειπώθηκαν με αποτέλεσμα η πλατφόρμα να μην είναι απόλυτη με τα συστήματα ελέγχου φωτισμού αλλά εξαρτώμενη από τις τιμές που τις δίνουμε (Εικόνες 68 και 69).



	☒	☒	☒	☒	☒	☒
ΓΡΑΦΕΙΟ	ΕΝΤΑΣΗ ΦΩ...	ΘΑΜΒΩΣΗ	ΑΠΟΔΟΣΗ Φ...	CRI	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ...	ΚΟΣΤΟΣ
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	max	min	max	max	min	min
Weight	0,30	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Thresholds	percentage	percentage	percentage	percentage	percentage	percentage
- Q: Indifference	0,2	0,2	0,3	0,1	0,5	1
- P: Preference	1	1	1	0,5	1,5	3
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	6	6	6	6	7	4
Maximum	9	9	9	9	9	9
Average	7	8	8	8	8	6
Standard Dev.	1	1	1	1	1	2
Evaluations						
☒ K2X	9	9	9	8	9	4
☒ DALI	7	8	8	9	7	6
☒ ZIGBEE	6	6	6	6	7	9

Εικόνα 68 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αλλαγή τιμών στα βάρη και στα Evaluations.



Εικόνα 69 Προσωπικό αρχείο του σπουδαστή Κόκκου Θεόδωρου. Αποτέλεσμα σύμφωνα με τις νέες τιμές .

5.3 Οικονομοτεχνική ανάλυση

Ο χώρος της υποδοχής όπως επίσης ο χώρος του γραφείου για ευκολία εγκατάστασης με το λιγότερο δυνατό κόστος θα ελέγχονται από ένα κεντρικό μηχανήμα κηχ και από μια γραμμή dali. Τα δε φωτιστικά περιλαμβάνουν ενσωματωμένο dali για να αποφύγουμε να αγοράσουμε επιπλέον υλικά. Σε κάθε χώρο θα τοποθετηθούν κηχ μπουτόν από όπου θα ελέγχεται ο φωτισμός. Η ομαδοποίηση των φωτιστικών θα γίνεται λογικά και όχι με καλωδίωση. Κάθε χώρος αποτελείται από έξι σημειακές πηγές φωτισμού. Όλες οι πηγές τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση της τάξεως των 230V και από ένα λεπτό καλώδιο dali το οποίο περιλαμβάνει δύο αγωγούς. Ολόκληρο το σύστημα δουλεύει με ένα κουμπί επειδή όλη η διαδικασία είναι προγραμματισμένη και δεν απαιτεί εναλλαγή καλωδίωσης. Όλα τα φώτα του χώρου ανάβουν, Έπειτα, κρατάμε πατημένο το κουμπί. Με αυτό τον τρόπο χαμηλώνουμε ή δυναμώνουμε το φως. Με το πάτημα ενός άλλου κουμπιού μας δίνεται η δυνατότητα αλλαγής σκηνής δηλαδή όλα τα φώτα να εκπέμπουν χαμηλή ένταση φωτισμού ή δυνατή. Τέλος, σε περίπτωση αλλαγής θα επέμβουμε στον προγραμματισμό και όχι σε καινούργια ηλεκτρολογική εγκατάσταση.

Η μετώπη³⁷ διακόπτη φωτισμού Hager S.1/B.3/B.7 είναι μία εξαιρετική επιλογή για τον έλεγχο του φωτισμού λόγω ότι διαθέτει ενσωματωμένο bus coupler LED, όπως επίσης παρέχει αποτελεσματική και αξιόπιστη λειτουργία. Επιπλέον, συνδυάζεται με άλλες μονάδες φωτισμού, προσφέρει άνεση και είναι εύκολο στον χειρισμό (Εικόνα 70). Το μοντέλο³⁸ KNX-SA41 αποτελεί ένα παγκόσμιο module διακόπτη ενεργοποίησης. Αυτή η συσκευή, επιτυγχάνει διασύνδεση και πλήρη έλεγχο όλων των ηλεκτρικών φορτίων που σχετίζονται με φωτισμό, ρολά κουρτίνας και κλιματισμό συσκευών με το σύστημα KNX (Εικόνα 71). Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει τέσσερις εξόδους ρελέ όπου κάθε έξοδος αντιστοιχεί σε ένα ανεξάρτητο λογικό κανάλι με ευέλικτο σύστημα ελέγχου για τη διαχείριση πολλαπλών ηλεκτρικών κυκλωμάτων ταυτόχρονα. Η ενεργοποίηση του γίνεται με τάση τροφοδότησης 230 V AC και καταναλώνει 5 W. Εκτός αυτού, υποστηρίζει διάφορους τύπους φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των λαμπτήρων πυράκτωσης.

³⁷ <https://www.skroutz.gr/s/32438354/Hager-S-1-B-3-B-7-Metopi-Diakopti-Fotismou-Ensomatomeno-Bus-Coupler-LED-se-Leyko-CHroma-80960289.html#description> (Ανακτήθηκε 23/12/2025)

³⁸ <https://www.skroutz.gr/s/53453996/Satel-CHroniko-Ragas-KNX-KNX-SA41.html#description> (Ανακτήθηκε 23/12/2025)



Η συσκευή είναι σχεδιασμένη για μακροχρόνια χρήση, με εντυπωσιακή αντοχή στη μεταγωγή και γρήγορο χρόνο απόκρισης την οποία την καθιστά ιδανική για τις σύγχρονες ανάγκες αυτοματοποίησης. Ολόκληρο το σύστημα θα ελέγχει συνολικά δώδεκα σημειακές πηγές φωτισμού (Εικόνα 72).



Εικόνα 70 Διακόπτης φωτισμού Hager S.1/B.3/B.7. Πηγή <https://www.skrouz.gr/s/32438354/Hager-S-1-B-3-B-7-Metopi-Diakopti-Fotismou-Ensomatomeno-Bus-Coupler-LED-se-Leyko-CHroma-80960289.html#description>



Εικόνα 71 Μοντέλο KNX-SA41. Πηγή <https://www.skrouz.gr/s/53453996/Satel-CHroniko-Ragas-KNX-KNX-SA41.html#description>



Εικόνα 72 Μοντέλο IKNX120SBWWD. Πηγή <https://tamllite.co.uk/product/ikon-x-sb/IKNX120SBNW/>.



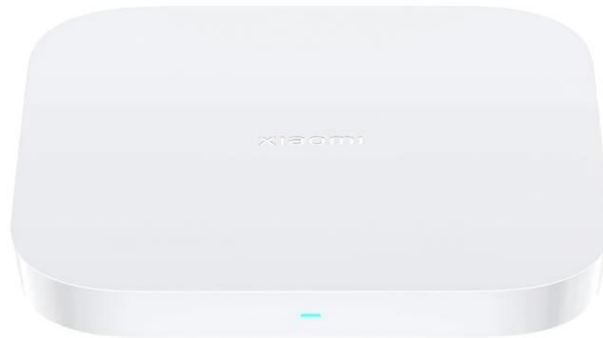
Στον παρακάτω πίνακα 5.12 βλέπουμε το συνολικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης του συστήματος κηχ με υποστήριξη dali. Παρότι το κόστος αγοράς και εγκατάστασης είναι υψηλό το κηχ κάνει απόσβεση σε βάθος χρόνου διότι η προσφορά του όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη ειδικά σε γραφεία που λειτουργούν πολλές ώρες υπερτερεί έναντι των άλλων συστημάτων (Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδας, 2010). Ο σταθερός φωτισμός που παρέχει με την ακριβή ομοιομορφία και τον χαμηλό δείκτη θάμβωσης βελτιώνει την παραγωγικότητα των εργαζομένων και αυξάνει την αξία του ακινήτου. Ο φωτισμός λειτουργεί μόνο όταν χρειάζεται δηλαδή χαμηλώνει ή σβήνει αυτόματα σε περίπτωση ύπαρξης φυσικού φωτισμού πράγμα που σημαίνει μείωση της κατανάλωσης του ρεύματος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των φωτιστικών. Στην περίπτωση του κόστους³⁹ εγκατάστασης οι τιμές διαφέρουν ανάλογα με το είδος της εργασίας. Πρόκειται για νέα εγκατάσταση στην οποία θα τοποθετηθεί ένα απλό σύστημα κηχ με υποστήριξη dali.

Το πρωτόκολλο zigbee για τον χώρο της κουζίνας περιλαμβάνει ένα διακόπτη zigbee και ένα zigbee hub. Το Xiaomi Smart Home Hub 2 αποτελεί μια προηγμένη έξυπνη συσκευή ⁴⁰οικιακού αυτοματισμού που χρησιμεύει ως κεντρικός κόμβος ελέγχου για τις συνδεδεμένες συσκευές σας. Συνδέει τις έξυπνες συσκευές και ελέγχει όλο τον χώρο της κουζίνας. Για λόγους οικονομίας δεν θα συνδεθεί με το σύστημα κηχ (Εικόνα 73). Ο Orb-ZBW1L είναι ένας διακόπτης ⁴¹τοίχου από τη σειρά Fusion που λειτουργεί με την τεχνολογία ZigBee και δεν απαιτεί ουδέτερο καλώδιο. Ιδανική επιλογή για παλαιότερες εγκαταστάσεις, συνεργάζεται με δημοφιλείς κεντρικούς υπολογιστές ZigBee για την αυτοματοποίηση του τεχνητού φωτισμού στον χώρο της κουζίνας (Εικόνα 74). Τα φωτιστικά σώματα ανήκουν στην εταιρεία Robus και φέρουν την ονομασία space humanitas (Εικόνα 75).

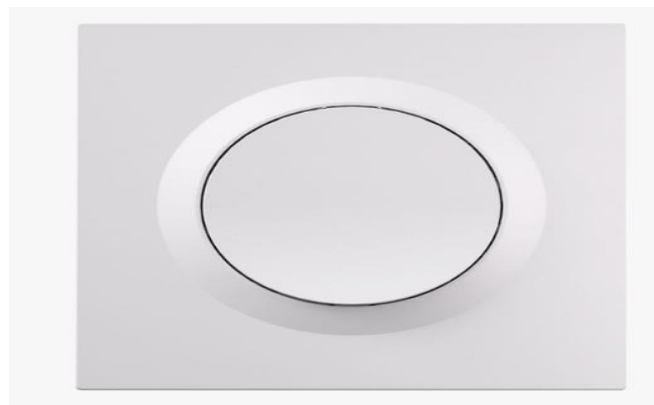
³⁹ <https://www.dreamland-houses.com/ilektrologika-times/?utm> (Ανακτήθηκε 23/12/2025)

⁴⁰ <https://www.skroutz.gr/s/40234107/Xiaomi-Home-Center-Hub-2-Smart-Gateway-Wi-Fi-Bluetooth-Zigbee-BHR6765GL.html#description> (Ανακτήθηκε 24/12/2025)

⁴¹ <https://www.skroutz.gr/s/63152678/sonoff-zbmini2-e-diakoptis-toichou-me-plaisio-leykos-080589.html#description> (Ανακτήθηκε 24/12/2025)



Εικόνα 73 Το Xiaomi Smart Home Hub 2 Πηγή <https://www.skrouz.gr/s/40234107/Xiaomi-Home-Center-Hub-2-Smart-Gateway-Wi-Fi-Bluetooth-Zigbee-BHR6765GL.html#description>



Εικόνα 74 SONOFF ZBMINIL2-E Έξυπνος διακόπτης τοίχου ZigBee. Πηγή <https://www.skrouz.gr/s/63152678/sonoff-zbminil2-e-diakoptis-toichou-me-plaisio-leykos-080589.html#description>



Εικόνα 75 Space humanitas της εταιρείας Robus. Πηγή <https://robus.com/products/lighting-for-wellbeing-robust-humanitas/space-humanitas-30w-zigbee-controlled-tunable-white-hcl-panel-2700-6500k-600x600mm-ugr19>

Πίνακας 5.12 Φωτιστικά και εξαρτήματα πρωτοκόλλου KNX σε συνδυασμό Dali και
Zigbee

Υλικό	Εικόνα	Ποσότητα	Κόστος αγοράς €	Κόστος εγκατάστασης €	Ώρες λειτουργίας	Συνολικό κόστος €
Μοντέλο IKNX120SBWWD		12	1217,16	180	2600	1397,16
Hager S.1/B.3/B.7		2	72,46	40	-	112,46
Μοντέλο KNX-SA41		1	122,26	400	-	522,26
Xiaomi Smart Home Hub 2		1	28,99	20	-	48,99
SONOFF ZBMINIL2-E		1	20,45	20	-	40,45
Μοντέλο Space HUMANITAS		4	240	60	2600	300
Μοντέλο IKNX120SBNW		1	101,43	15	1000	116,43
Eurolamp Ενσύρματος Αισθητήρας Κίνησης		1	26,29	15	1000	41,29
Τελικό ποσό €						2579,04

5.3.1 Κόστος φωτισμού ανά lumen hour

Προκειμένου να γίνει ένας ακριβής υπολογισμός του κόστους είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη όλες τις οικονομικές παραμέτρους. Πέραν του κόστους αγοράς και εγκατάστασης θα υπολογίσουμε και το κόστος λειτουργίας (Δούλος, 2013). Η κοστολόγηση του φωτισμού παρέχουν ένα εύκολο τρόπο σύγκρισης των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται στην ολική εγκατάσταση φωτισμού. Ο πίνακας 5.13 μας παρουσιάζει λεπτομερώς τα κόστη λειτουργίας. Τα φωτιστικά σώματα θα δουλεύουν στην χειρότερη περίπτωση πέντε ημέρες για δέκα ώρες, για πενήντα δύο εβδομάδες επειδή τα συστήματα ελέγχου μεταβάλλουν τις ώρες λειτουργίας ανάλογα τις καιρικές συνθήκες με σκοπό να περιορίζεται η κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 5.13 Τελική επιλογή φωτιστικών σωμάτων

Φωτιστικά σώματα	Συνολικά lumen	Συνολικές ώρες λειτουργίας	Συνολικό κόστος ανά εκατομμύριο lumen-hour
Μοντέλο IKNX120SBWWD	14400	13000h	7,46€
Μοντέλο Space HUMANITAS	12600	13000h	1,83€
Μοντέλο IKNX120SBNW	1200	13000h	7,46€

5.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Για τον σχεδιασμό φωτισμού χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Η τελική επιλογή για τον φωτισμό του γραφείου της κουζίνας όπως επίσης της υποδοχής έγινε με βάση ενός συνόλου από κριτήρια. Η επιλογή κη σε συνδυασμό με το dali υπερίσχυσε διότι οι απαιτήσεις στους επαγγελματικούς χώρους είναι αυξημένες. Επιπλέον, μπορούμε να κάνουμε ξεχωριστή ομαδοποίηση των φωτιστικών της υποδοχής με αυτών του γραφείου που σημαίνει ότι ένα σύστημα κη-dali αρκεί για να ελέγξουμε τον φωτισμό όλων των χώρων.

Στον χώρο υποδοχής, ο φωτισμός καθορίζει την πρώτη εντύπωση. Επειδή απαιτεί σταθερό φωτισμό, δυνατότητα εναλλαγής σεναρίων και ομοιομορφία αποφύγαμε την χρήση αισθητήρων. Στον χώρο του γραφείου, ο φωτισμός υποστηρίζει την παραγωγή, κρατά σε εγρήγορση το προσωπικό και πλήρη ορατότητα (Σωτηροπούλου, 2014).



Η εφαρμογή του κηχ προσαρμόζει τον τεχνητό φωτισμό βάση την παρουσία του φυσικού φωτισμού και η εφαρμογή dali επιτρέπει την ρύθμιση της έντασης με αποτέλεσμα να έχουμε πλήρη εξοικονόμηση ενέργειας. Αντιθέτως, στην κουζίνα η εφαρμογή zigbee αποτέλεσε κατάλληλη επιλογή διότι ο συγκεκριμένος χώρος δεν αποτελεί ίδιας βαρύτητας έναντι των άλλων δυο.

Η εφαρμογή της πολυκριτήριας ανάλυσης βοήθησε ώστε ο κάθε χώρος να φωτιστεί με το κατάλληλο σύστημα. Βασικά κριτήρια όπως χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, οπτική άνεση, απόδοση, καλαισθησία και εξοικονόμηση χώρου εξετάστηκαν ταυτοχρόνως και ανάλογα την περιοχή δώσαμε την αντίστοιχη προτεραιότητα αφού για κάθε χώρο τα συγκεκριμένα κριτήρια δεν είχαν την ίδια βαρύτητα.



Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφέρουμε συμπεράσματα που προκύπτουν από όλη την έρευνα καθώς θα γίνουν προτάσεις με σκοπό την υλοποίηση μιας μελλοντικής έρευνας. Από την παρούσα διπλωματική εργασία συμπεραίνουμε ότι τα πρωτόκολλα επικοινωνίας knx, dali, z wave και zigbee ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες αφού εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς στον έλεγχο φωτισμού. Το πρωτόκολλο knx ελέγχει ταυτόχρονα φωτισμό, θέρμανση, κλιματισμό, σκίαση και ασφάλεια ενώ το πρωτόκολλο dali αποτελεί ψηφιακό πρωτόκολλο ελέγχου φωτισμού που ασχολείται αποκλειστικά με την έναυση, το dimming και χωρίζει τα φωτιστικά ανά ομάδες. Το zigbee αποτελεί ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας με χαμηλή κατανάλωση που σκοπό έχει την έξυπνη χρήση φωτισμού σε εφαρμογές για έξυπνα σπίτια. Κανένα πρωτόκολλο ή αισθητήρας δεν αποτελούν αποκλειστικές λύσεις.

Τα αναφερόμενα συστήματα λειτουργούν συνδυαστικά σε αρκετές περιπτώσεις, ανάλογα με τις υπάρχουσες ανάγκες ενός κτιρίου, αποδίδουν ενεργειακά, προσφέρουν άνεση, ασφάλεια και περιορίζονται τα μειονεκτήματα αφού το ένα σύστημα καλύπτει τις αδυναμίες του άλλου. Βασικός παράγοντας επίσης για την επιλογή ενός συστήματος ή αισθητήρα αποτελεί το κόστος εγκατάστασης, η ευκολία τοποθέτησης και φυσικά η αξιοπιστία. Η επιλογή ενός συστήματος dali προσφέρει μια άκρως αξιόπιστη λύση όσον αφορά τον έλεγχο φωτισμού μολονότι προσφέρει ακριβή ρύθμιση της έντασης φωτισμού, επιτρέπει την ομαδοποίηση των φωτιστικών σωμάτων και επιπρόσθετα συνεργάζεται με το πρωτόκολλο επικοινωνίας knx. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας knx είναι διεθνώς αναγνωρισμένο, παρέχει υψηλή αξιοπιστία και ελέγχει ταυτόχρονα όλη την εγκατάσταση του κτιρίου αφού η λειτουργία του δεν περιορίζεται μοναχά για την έναυση των φωτιστικών. Το μόνο αρνητικό της εφαρμογής του είναι ότι απαιτεί υψηλό κόστος εγκατάστασης και ο προγραμματισμός του υλοποιείται από τεχνικό με εξειδικευμένη γνώση. Αντιθέτως, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας z wave και zigbee προσφέρουν εύκολη εγκατάσταση με χαμηλό κόστος τα οποία είναι κατάλληλα για εφαρμογές έξυπνων σπιτιών. Ωστόσο, αν και υποστηρίζουν μεγάλο αριθμό συσκευών ενδέχεται να παρουσιάσουν παρεμβολές λόγω εκπομπής ίδιας συχνότητας με αυτή του Wi-fi. Τέλος, εξαρτάται από συγκεκριμένους κατασκευαστές.



Οι αισθητήρες PIR έχουν ευρεία χρήση όσον αφορά την ανίχνευση κίνησης εξαιτίας της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους εγκατάστασης. Ωστόσο, η εφαρμογή τους δεν ενδείκνυται για στατική παρουσία που σημαίνει ότι μπορεί να οδηγήσει σε ψευδείς απενεργοποιήσεις. Όσο για την εφαρμογή αισθητήρων μικροκυμάτων όπως επίσης και υπερήχων παρέχουν την δυνατότητα καλύτερης ανίχνευσης μιας φυσικής παρουσίας ακόμη με μικρές κινήσεις αλλά παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε θέματα που αφορούν την ενεργοποίηση τους. Οι φωτοαισθητήρες συμβάλουν τα μέγιστα στην εξοικονόμηση ενέργειας επειδή ρυθμίζουν τον φωτισμό με βάση την παρουσία του φυσικού φωτισμού στον επιθυμητό χώρο μπορεί όμως να επηρεαστούν από εξωτερικές συνθήκες όπως είναι για παράδειγμα η κάλυψη του αισθητήρα με μια μαύρη σακούλα. Σε αυτή την περίπτωση θα αντιληφθεί σκοτάδι και θα ενεργοποιήσει τον φωτισμό.

Για την επιλογή καλύτερης μεθόδου έναυσης των φωτιστικών και χειρισμού οι αποφάσεις οι οποίες καταλήγουν στην τελική απόφαση οφείλονται να λαμβάνονται από πολλαπλά κριτήρια. Τέτοιου είδους κριτήρια σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια, την καλαισθησία, το συνολικό κόστος, την λειτουργικότητα, την αξιοπιστία και την ευκολία χρήσης. Η μέθοδος της σταθμισμένης βαθμολόγησης αποτελεί μια από τις απλούστερες και πιο διαδεδομένες μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης. Στη προκειμένη μέθοδο κάθε κριτήριο λαμβάνει ένα συντελεστή βαρύτητας ενώ κάθε εναλλακτική λύση βαθμολογείται ως προς τα κριτήρια αυτά. Το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από το σύνολο της βαθμολογίας. Μια πιο δομημένη προσέγγιση αποτελεί η μέθοδος της αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας. Η παρούσα μέθοδο βασίζεται στη σύγκριση κριτηρίων και των αναλυτικών λύσεων ανά ζεύγη. Αποτελεί ορθή επιλογή όσον αφορά την μείωση της υποκειμενικότητας, μπορεί να είναι χρονοβόρα αλλά προσφέρει την μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην περίπτωση του τεχνητού φωτισμού επιτρέπει την ιεράρχηση παραμέτρων όπως είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η ποιότητα φωτισμού και ο έλεγχος.

Οι μέθοδοι προμηθείας- electre και topsis χρησιμεύουν σε εφαρμογές πιο σύνθετων έργων. Η topsis επιλέγει λύση η οποία βρίσκεται κοντά στην ιδανική ενώ ο συνδυασμός του προμηθεία με την electre βασίζεται στην υπεροχή μεταξύ εναλλακτικών. Απαιτούν περισσότερα δεδομένα, εξειδικευμένη γνώση, είναι λιγότερο πρακτικές για απλές εφαρμογές πάνω στον φωτισμό.



6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας τα οποία προέκυψαν καθόλη την διάρκεια της έρευνας μπορούν να διατυπωθούν προτάσεις που έχουν να κάνουν με την βελτίωση χρήσης των συστημάτων έναυσης τεχνητού φωτισμού, καθώς και να προταθούν κατευθύνσεις για την αξιοποίηση νέων τεχνολογιών και μελλοντικών εφαρμογών που σχετίζονται άμεσα με τον τομέα των έξυπνων κτιρίων. Η διαρκής εξέλιξη των συστημάτων αυτοματισμού δημιουργεί νέες δυνατότητες για μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, αυξημένη άνεση των χρηστών και βελτιωμένη διαχείριση των κτιριακών εγκαταστάσεων. Μία βασική πρόταση βελτίωσης έχει να κάνει με το να γίνει συνδυασμός εφαρμογής διαφορετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας και αισθητήρων, ούτως ώστε να αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα του καθενός και να περιορίζονται οι αδυναμίες τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο συνδυασμός KNX- DALI. Κατόπιν, η ενσωμάτωση ασύρματων πρωτοκόλλων όπως το Zigbee ή το Z-Wave στον ήδη υπάρχων συνδυασμό μπορεί να μειώσει το κόστος των καλωδιώσεων.

Σημαντική βελτίωση μπορεί επίσης να επιτευχθεί μέσω της χρήσης συνδυαστικών αισθητήρων παρουσίας. Η ταυτόχρονη χρήση αισθητήρων PIR με αισθητήρες μικροκυμάτων ή υπερήχων αυξάνει την ανίχνευση. Επιπλέον, η σωστή τοποθέτηση και βαθμονόμηση φωτοαισθητήρων, αποφεύγει λανθασμένες ενεργοποιήσεις. Όσο για την εφαρμογή της πολυκριτήριας ανάλυσης, η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στα συστήματα φωτισμού προσφέρει μεγάλη διευκόλυνση στην επιλογή μιας μεθόδου, όπως είναι για παράδειγμα η AHP, αλλά δεν σημαίνει ότι μπορείς να βασιστείς αποκλειστικά και μόνο στα αποτελέσματα που μπορεί να σου προσφέρει. Η έρευνα γίνεται με βάση διασταύρωση πολλών πηγών και σύγκρισης πληροφοριών.

Βιβλιογραφία

◆ Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Anbari Moghadam, M., & Besiktepe, D. (2025). Synthesis of multi-criteria decision-making applications in facilities management and building maintenance: Trends, methods, and future research directions.

Anand, M. S., Kurian, G., Manu, G., & Narayanan, V. (2015). Real time implementation of digitally addressable lighting interface (DALI). *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 3(2), 128–133.

Ashwini, A. A., & Kulkarni, N. R. (2020). Passive infrared-occupancy sensor based lighting control. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*.

Bellido-Outeiriño, F. J., Quiles-Latorre, F. J., Moreno-Moreno, C. D., Flores-Arias, J. M., Moreno-García, I., & Ortiz-López, M. (2016). Streetlight control system based on wireless communication over DALI protocol.

Brown, G. (2022). PLC technician handbook: Practical guide to programmable logic controllers. George Brown College.

Bueno Unzeta, B., de Boer, J., Delvaeye, R., Deroisy, B., Fontoynt, M., Pimenta, D. N., Reinhold, P., Stoffer, S., & Weitlaner, R. (2021). Review of lighting and daylighting control systems. DOI:10.18777/ieashc-task61-2021-0002

Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organisation method: The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>

Brans, J.-P., & De Smet, Y. (2016). PROMETHEE methods. In *Multiple Criteria Decision Analysis* (pp. 187–219). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_6

Cash, D., Masood, R., & Baig, Z. (2022). On false data injection attack against building automation systems. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2208.02733>



Chen, S. J., & Hwang, C. L. (1992). Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications. *Springer*.

Cheng, Y., Fang, C., Yuan, J., & Zhu, L. (2020). Design and application of a smart lighting system based on distributed wireless sensor networks.

Corrente, S., & Tasiou, M. (2023). A robust TOPSIS method for decision-making problems with hierarchical and non-monotonic criteria.

Cristea, M., Tîrnovan, R. A., Cristea, C., Pică, C. S., & Făgărășan, C. (2018). A multi-criteria decision-making approach for public lighting system selection.

Dvoršak, B., Havelka, J., Mainardi, E., Pandžić, H., Selič, T., & Tretinjak, M. (2017). Smart home systems.

EnOcean Alliance. (2020). Comparison of wireless standards for smart buildings (Version 2.0).

Farahani, S. (2008). ZigBee wireless networks and transceivers. Elsevier.

Guo, X., Tiller, D., & Waters, C. E. (2010). Lighting research and technology. SAGE.

Jayant, A., & Sharma, J. (2018). Comprehensive literature review of MCDM techniques ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR and TOPSIS.

Johannes Itten (1998). Τέχνη του χρώματος. Αθήνα. Εκδόσεις Κείμενα Εικαστικών Καλλιτεχνών.

Lee, E. A., & Seshia, S. A. (2017). Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach (2nd ed.). MIT Press.

Masica, K. (2007). Recommended practices guide for securing ZigBee wireless networks in process control system environments.

Mareschal, B., & De Smet, Y. (2009) . Visual PROMETHEE: Developments of the PROMETHEE-GAIA multicriteria decision aid methods. Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 1646–1649.

Mareschal, B. (2013). Visual PROMETHEE user manual. PROMETHEE-GAIA software documentation.

Nawalkhede, A. A., & Kulkarni, N. R. (2020). Passive infrared-occupancy sensor-based lighting control.

Pérez-Gosende, P. (2019). AHP-based approach for lighting system selection in an underground parking.

Richard Dunham. (2019). Stage Lighting: Design Applications and More

Rijal Wagiman, K., Abdullah, M. N., Hassan, M. Y., & Radzi, N. H. (2019). A review on sensing-based strategies of interior lighting control systems. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science.

Sapundzhi, F. (2020). A survey of KNX implementation in building automation. TEM Journal, 9(1), 144–148.

Shete, V., Patil, S., & Bhosale, R. (2015). Intelligent building automation using DALI-WSN integration. International Journal of Current Engineering and Technology, 5(1), 405–408.

Shokrollahi, A., Persson, J. A., Malekian, R., Sarkheyli-Hägele, A., & Karlsson, F. (2024). Passive infrared sensor-based occupancy monitoring in smart buildings.

Simpson, R. S. (2003). Lighting control: Technology and applications. Focal Press.

Signify. (2019). The ABC's of DALI: A guide to digital addressable lighting interface.

Štilic, A., & Puška, A. (2023). Integrating multi-criteria decision-making methods with sustainable engineering.

Tillume. (2024). DALI or KNX: Which system is better suited to your smart home.

Unzeta, B. B., et al. (2021). Lighting and daylighting control systems review.

◆ Ελληνική βιβλιογραφία

Αντωνόπουλος, Σ., Δημητρόπουλος, Β., & Μάρης, Θ. (2009). Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. ΙΤΥΕ Διόφαντος.

Δούλος, Λ. (2013). Τεχνολογία φωτισμού και σύνδεση με την παραγωγή: Τόμος Γ. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Δούλος, Λ., & Μπουρούσης, Κ. (2013). Τεχνολογία φωτισμού και σύνδεση με την παραγωγή: Τόμος Β. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Δροσόπουλος, Α. (2005). Ηλεκτροτεχνία συνεχούς ρεύματος. Επιστημονικές Εκδόσεις.

Ζερεφός, Σ. (2013). Ψηφιακή απόδοση φωτισμού: Θεωρία και εφαρμογές. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ζερεφός, Σ. (2014). Εφαρμοσμένος σχεδιασμός φωτισμού. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ζούλης, Ν., Καφετζάκης, Π., & Σούλης, Γ. (2000a). Συστήματα αυτοματισμών (Τόμος Α). Διόφαντος.

Ζούλης, Ν., Καφετζάκης, Π., & Σούλης, Γ. (2000b). Συστήματα αυτοματισμών (Τόμος Β). Διόφαντος.

Θανάσουλα, Χ. (2021). Σχεδιασμός φωτισμών. Creative Lighting.

Καμπεζίδης, Χ. (2014). Γενικές αρχές φωτισμού: Τόμος Α. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Μπουρούσης, Κ. (2014). Εργαλεία γνώσης για τη σχεδίαση και προσομοίωση έργων φωτισμού. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Σίσκος, Ι. (2008). Μοντέλα αποφάσεων. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών

Σωτηροπούλου, Σ. (2014). Γενικές αρχές φωτισμού: Τόμος Β. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2010). Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης κτηρίων.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2017). Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές ενεργειακής απόδοσης κτηρίων.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2018). Σχεδιασμός και έλεγχος εγκατάστασης οδοφωτισμών.

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2021). Τεχνητός και φυσικός φωτισμός κτιρίων.

Τοπαλής, Φ., Οικονόμου, Λ., & Κουρτέση, Σ. (2021). Φωτοτεχνία (2η έκδ.). Τζιόλα.

Χαριτάνης, Ι. (2006). Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά. Αράκυνθος.

Ιστοσελίδες

Advance by Signify. (2019). The ABC's of DALI: A guide to digital addressable lighting interface. Ανακτήθηκε στις 21 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.sweetwater.com/sweetcare/articles/understanding-dmx/>



Andrianos. (n.d.). Δίκτυο ZigBee – Τι ακριβώς είναι και πού χρησιμοποιείται.

Ανακτήθηκε στις 23 Οκτωβρίου 2025, από

<https://www.andrianos.gr/gr/nea/arhra/diktyo-zigbee-%E2%80%93-ti-akribos-einai-kai-pou-xrisimopoeitai>

B&J Ultrasonic. (n.d.). How do ultrasonic sensors work. Ανακτήθηκε στις 22

Οκτωβρίου 2025, από <https://www.bjultrasonic.com/el/how-do-ultrasonic-sensors-work/>

Buildings.com. (n.d.). DALI platform delivers DALI lighting control with wireless and IP-based networking. Ανακτήθηκε στις 5 Απριλίου 2026, από

<https://www.buildings.com/smart-buildings/article/33017724/dali-platform-delivers-dali-lighting-control-with-wireless-and-ip-based-networking>

CSC LED. (n.d.). PIR vs microwave motion sensors: Which is right for your lighting project. Ανακτήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025, από <https://csc-led.com/media-hub/pir-vs-microwave-motion-sensors-which-is-right-for-your-lighting-project>

DALI Alliance. (n.d.-a). DALI. Ανακτήθηκε στις 5 Απριλίου 2026, από

<https://www.dali-alliance.org/dali/>

DALI Alliance. (n.d.-b). D4i. Ανακτήθηκε στις 9 Δεκεμβρίου 2025, από

<https://www.dali-alliance.org/d4i/>

Dreamland Houses. (n.d.). Ηλεκτρολογικά τιμές. Ανακτήθηκε στις 23 Δεκεμβρίου 2025, από <https://www.dreamland-houses.com/ilektrologika-times/>

Electrodomi. (n.d.). Τεχνολογία DALI. Ανακτήθηκε στις 23 Οκτωβρίου 2025, από

<https://www.electrodomi.gr/el/upiresies/tehnologia-dali>



Ekinex. (n.d.). The DALI protocol. Ανακτήθηκε στις 5 Απριλίου 2026, από <https://www.ekinex.com/en/ekinex-solutions-for-smart-lighting-control/the-dali-protocol>

Grobotronics. (n.d.). PIR sensor module. Ανακτήθηκε στις 22 Οκτωβρίου 2025, από <https://grobotronics.com/pir-sensor-module.html>

HeyKangaroo. (n.d.). Motion sensor showdown: PIR vs microwave vs ultrasonic. Ανακτήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.blog.heykangaroo.com/blog/motion-sensor-showdown-pir-vs-microwave-vs-ultrasonic-which-is-best-for-your-home>

Hitaltech. (n.d.). What is DALI. Ανακτήθηκε στις 5 Απριλίου 2026, από <https://www.hitaltech.com/en/articles/what-is-dali/>

iStock. (n.d.-a). Light sensor images. Ανακτήθηκε στις 22 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.istockphoto.com/fi/valokuvat/light-sensor>

iStock. (n.d.-b). Motion sensor detector image. Ανακτήθηκε στις 26 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.istockphoto.com/photo/motion-sensor-or-detector-for-security-system-mounted-on-wall-gm541851046-96902479>

KNX Hub. (n.d.-a). KNX RF vs ZigBee comparison. Ανακτήθηκε στις 24 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.knxhub.com/knx-rf-vs-zigbee-comparison/>

KNX Hub. (n.d.-b). KNX vs other building automation protocols. Ανακτήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.knxhub.com/knx-vs-other-building-automation-protocols-a-comparison-guide/>

LEDYI Lighting. (n.d.). Zigbee vs Z-Wave vs WiFi. Ανακτήθηκε στις 21 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.ledyilighting.com/el/zigbee-vs-z-wave-vs-wifi/>

Logos Lighting. (n.d.). How does DALI lighting work: A comprehensive guide. Ανακτήθηκε στις 26 Οκτωβρίου 2025, από <https://logoslighting.com/blog/how-does-dali-lighting-work-a-comprehensive-guide/>



Mean Well Power Supplies. (n.d.). Better than DALI? KNX lighting. Ανακτήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025, από <https://meanwellpowersupplies.com/technical-articles/building-automation/better-than-dali-knx-lighting/>

Palazzoli. (n.d.). DALI protocol: What it means and what it is for. Ανακτήθηκε στις 5 Απριλίου 2026, από <https://www.palazzoli.com/en/news/lighting/technical-advice/dali-protocol-what-it-means-and-what-is-it-for>

ResearchGate. (n.d.). Lighting control including daylight and energy efficiency improvements analysis. Ανακτήθηκε στις 24 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.researchgate.net/publication/327132460>

Security Report. (2019). Η ασύρματη τεχνολογία ZigBee. Ανακτήθηκε στις 21 Οκτωβρίου 2025, από <https://securityreport.gr/archeio-periodikoy/2019/teychos-94/i-asyrmati-technologia-zigbee/>

Signify. (2019). The ABC's of DALI. Ανακτήθηκε στις 21 Οκτωβρίου 2025

Sweetwater. (n.d.). Understanding DMX. Ανακτήθηκε στις 21 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.sweetwater.com/sweetcare/articles/understanding-dmx/>

SZHaiwang. (n.d.). Understanding PIR motion sensor detectors. Ανακτήθηκε στις 23 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.szhaiwang.com/el/Understanding-PIR-Motion-Sensor-Detectors>

◆ Βίντεο

YouTube. (n.d.). Video about DMX lighting. Ανακτήθηκε στις 21 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.youtube.com/watch?v=dJQAZsNwcv4>

YouTube. (n.d.). Lighting control video. Ανακτήθηκε στις 21 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.youtube.com/watch?v=Y8hmjMPM-vg>

YouTube. (n.d.). Short video (lighting). Ανακτήθηκε στις 24 Οκτωβρίου 2025, από https://www.youtube.com/shorts/HCdMb1DJ_ZY



YouTube. (n.d.). Short video (automation). Ανακτήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.youtube.com/shorts/WmFco3CNyJU>

YouTube. (n.d.). Short video (lighting system). Ανακτήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.youtube.com/shorts/wf9fy42cGtg>

YouTube. (n.d.). Lighting playlist. Ανακτήθηκε στις 24 Οκτωβρίου 2025, από <https://www.youtube.com/playlist?list=PLzNoc6bXDBj-HksDWteWYSAXj8uG1E70F>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.