



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη Σκοπιμότητας για την Αναβάθμιση του Δικτύου Εξωτερικού
Φωτισμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
ΜΙΧΑΛΗ ΛΕΦΑΝΤΖΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Επιβλέπων: Δρ. Κωνσταντίνος Μπουρούσης

Αθήνα, Μάρτιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη Σκοπιμότητας για την Αναβάθμιση του Δικτύου Εξωτερικού
Φωτισμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
ΜΙΧΑΛΗ ΛΕΦΑΝΤΖΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Επιβλέπων: Δρ. Κωνσταντίνος Μπουρούσης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Μαρτίου 2021.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Σ. Γεωργιάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
ΜΙΧΑΛΗΣ Δ. ΛΕΦΑΝΤΖΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μιχαήλ Λεφαντζής, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος – All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις το Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Φραγκίσκο Τοπαλή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας και για τον άπλετο χρόνο που μου διέθεσε για την διεκπεραίωσή της.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση για τη βοήθεια που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για τη συνεχή στήριξη τους καθόλη την πορεία της ζωής μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Χριστίνα, τον Αντώνη και όλο το BEST Athens, για την αντοχή και το κουράγιο που μου παρείχαν κατά τη συγγραφή της εργασίας και για τη δραστική επίδραση που είχαν στην ψυχική μου υγεία κατά τη διάρκεια της καραντίνας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αναβάθμισης του υπάρχοντος συστήματος εξωτερικού φωτισμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με έμφαση στην απομακρυσμένη ασύρματη διαχείριση. Για το σκοπό αυτό, παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων – Internet of Things (IoT) και αναλύονται εκτενώς τα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούνται ευρέως για την δημιουργία δικτύων IoT.

Γίνεται εκτίμηση της υπάρχουσας εγκατάστασης εξωτερικού φωτισμού, ως προς το ετήσιο κόστος λειτουργίας και από που αυτό προέρχεται. Έναντι της υπάρχουσας εγκατάστασης, μελετάται αρχικά η αντικατάσταση όλων των υπάρχόντων φωτιστικών διαφόρων τεχνολογιών με φωτιστικά LED, ως προς την ενεργειακή απόδοση και την εξοικονόμηση που επιφέρει.

Έχοντας ως βάση την αντικατάσταση αυτή διερευνώνται τρεις επιπρόσθετες δράσεις για περαιτέρω μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και του ετήσιου κόστους λειτουργίας. Οι δράσεις αυτές είναι: η χρήση στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού, η χρήση δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού και η ρύθμιση της έντασης των νέων προβολέων κατά την εγκατάστασή τους.

Ακολουθεί ο υπολογισμός της εξοικονόμησης που προκύπτουν από τις τρεις δράσεις, καθώς και τα απαραίτητα υλικά που χρειάζεται η υλοποίησή τους. Με αυτά ως δεδομένα γίνεται αξιολόγηση των δράσεων αυτών με χρήση διαφόρων οικονομικών κριτηρίων για βρεθεί η οικονομικά βέλτιστη δράση.

Τέλος, παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα ολόκληρης της εργασίας και παρουσιάζεται η δράση που θεωρείται η βέλτιστη, λαμβάνοντας υπόψιν την ενεργειακή απόδοση, την μείωση του κόστους λειτουργίας και τις δυνατότητες που η κάθε δράση παρέχει για μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος.

Λέξεις – Κλειδιά

Οδοφωτισμός, Διαδίκτυο των Πραγμάτων - Internet of Things (IoT), εξοικονόμηση ενέργειας, LED, dimming, ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας, αδειοδοτημένο και μη ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, διαλειτουργικότητα, προσαρμοστικός φωτισμός, ελεγκτής, απομακρυσμένη διαχείριση, σύστημα κεντρικής διαχείρισης, Zigbee, τεχνοοικονομική μελέτη.

ABSTRACT

This thesis aims to explore the upgrade of the current outdoor lighting system at the campus of the National Technical University of Athens, with emphasis on remote wireless management. To that end the core principles of an Internet of Things (IoT) network is presented as well as the available wireless networks that are used commonly in IoT networks.

What follows is an estimate of the current installment, especially the annual operating cost and its sources. Initially, the replacement of all lighting fixtures of various technologies by LED lighting fixtures is studied and its energy efficiency and reduction in cost are calculated.

Using this replacement as a starting point, three additional actions are analyzed for further reduction of the consumed energy and the annual operating cost. These actions are: the implementation of a static program of adaptive lighting, the implementation of a dynamic program of adaptive lighting and the adjustment of the luminous flux of the new floodlights during their installation.

Afterwards the savings are calculated for each of the three additional actions, as well as the materials needed for their implementation. Using the data from these calculations, an evaluation of the actions is done using various economic criteria in order to find the economically optimal action.

In the end the results from the entire thesis are presented in short, as well as the action that is considered to be optimal, taking into consideration the energy efficiency, the reduction of the operational cost and the capabilities that each action offers for future upgrades of the outdoor lighting system.

Keywords

Street lighting, Internet of Things (IoT), energy savings, LED, dimming, wireless communication protocols, licensed and unlicensed electromagnetic spectrum, interoperability, adaptive lighting, controller, remote control, central management system, Zigbee, economic study.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	15
1.1. Κατανάλωση ενέργειας	15
1.2. Τεχνολογίες λαμπτήρων	15
1.3. Internet of Things	17
2. Κατηγορίες ελέγχου φωτισμού	19
2.1. Συστήματα ON/OFF	19
2.2. Συστήματα στατικού ελέγχου	20
2.3. Συστήματα δυναμικού ελέγχου	21
2.3.1. Σύστημα 0-10 V και 1-10 V	21
2.3.2. DALI – Digital Addressable Lighting Interface	21
2.4. Ενσύρματη Απομακρυσμένη Επικοινωνία – Narrowband PLC (Power Line Communications).....	22
3. Πρωτόκολλα Ασύρματης Επικοινωνίας	23
3.1. Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα.....	23
3.2. Αδειοδοτημένο ή μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων	25
3.2.1. Αδειοδοτημένο – Licensed	25
3.2.2. Μη αδειοδοτημένο – Unlicensed	26
3.3. Σύγκριση συχνοτήτων.....	27
3.3.1. Ζώνη 900 MHz	27
3.3.2. Ζώνη 2,4 GHz.....	28
3.3.3. Ζώνη 5 GHz.....	28
3.4. Κατηγορίες πρωτόκολλων ασύρματης επικοινωνίας.....	28
3.4.1. Μικρής Εμβέλειας Ασύρματες Λύσεις (Short-Range Wireless Solutions) – Unlicensed	28
3.4.2. Μεγάλης Εμβέλειας Ασύρματες Λύσεις (Long-Range Wireless Solutions) – Cellular – Licensed ...	34
3.4.3. LPWAN (μη αδειοδοτημένο φάσμα) – Cellular – Unlicensed	38
3.5. Διαλειτουργικότητα στο χώρο του έξυπνου φωτισμού	42
3.5.1. Zhaga.....	43
3.5.2. NEMA (National Electrical Manufacturers Association).....	43
3.5.3. DiiA – Digital Illumination Interface Alliance	44
3.5.4. D4i.....	44
3.5.5. Zhaga-D4i Certification.....	45
3.5.6. NEMA ANSI C136.41 vs Zhaga – D4i.....	45
3.6. Επιλεγμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας για το σύστημα οδοφωτισμού του Ε.Μ.Π.	47
3.7. Αισθητήρες.....	47
4. Παρούσα κατάσταση στο κτιριακό συγκρότημα της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.....	50
4.1. Υπάρχον σύστημα εξωτερικού φωτισμού	50
4.2. Ετήσιο κόστος λειτουργίας	52
4.3. Ετήσιο κόστος συντήρησης.....	55

4.4. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας	56
5. Δράσεις εξοικονόμησης	57
5.1. Αντικατάσταση των υπαρχόντων φωτιστικών στο συγκρότημα του Ε.Μ.Π.	57
5.1.2. Ενεργειακή αξιολόγηση της αναβαθμισμένης εγκατάστασης	65
5.1.3. Ετήσιο κόστος λειτουργίας.....	69
5.1.4. Ετήσιο κόστος συντήρησης.....	72
5.1.5. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας	73
5.2. Χρήση στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού	73
5.2.1. Εφαρμογή προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού.....	74
5.2.2. Λειτουργία του στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού	74
5.2.3. Ετήσιο κόστος κατανάλωσης.....	79
5.2.4. Ετήσιο κόστος συντήρησης.....	81
5.2.5. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας	83
5.3. Χρήση δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού.....	83
5.3.1. Λειτουργία του δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού	83
5.3.2. Ετήσιο κόστος κατανάλωσης.....	90
5.3.3. Ετήσιο κόστος συντήρησης.....	91
5.3.4. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας	93
5.4. Ρύθμιση έντασης φωτισμού των προβολέων κατά την εγκατάστασή τους.....	93
5.5. Σύγκριση δράσεων εξοικονόμησης	97
6. Τεχνοοικονομική μελέτη προτεινομένων δράσεων.....	100
6.1. Χαρακτηριστικά στοιχεία της επένδυσης.....	100
6.2. Αξιολόγηση της επένδυσης	101
6.2.1. Κριτήριο της Απόδοσης Επένδυσης (Return of Investment – ROI)	101
6.2.2. Κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ).....	103
6.2.3. Κριτήριο του Δείκτη Αποδοτικότητας – ΔΑ (Cost Effectiveness Index – CEI).....	109
6.2.4. Κριτήριο του Σταθμισμένου Κόστους Εξοικονομούμενης Ενέργειας – ΣΚΕΕ (Levelized Energy Efficiency Cost – LEEC)	112
6.3. Σύγκριση δράσεων εξοικονόμησης	115
7. Προτεινόμενη λύση και συμπεράσματα	118
Πίνακας πινάκων.....	122
Πίνακας Εικόνων	125
Βιβλιογραφία	127
Παραπομπές.....	127
Επιπρόσθετη Βιβλιογραφία.....	130

1. Εισαγωγή

1.1. Κατανάλωση ενέργειας

Οι πόλεις είναι υπεύθυνες για το 80% των εκπομπών ρύπων και 65% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ^[1]. Με την αύξηση του πληθυσμού και του μεγέθους των πόλεων αυτά τα ποσοστά είναι απαραίτητο να μειωθούν, προκειμένου η αύξηση αυτή να είναι βιώσιμη. Ένα βήμα που μπορεί να γίνει σε συλλογικό επίπεδο, είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας φωτισμού των δημόσιων χώρων. Ο οδικός φωτισμός συνιστά το 40% του προϋπολογισμού ενέργειας των πόλεων. Μια μείωση αυτής της ενέργειας κατά 40% θα ήταν ισοδύναμη με την εξάλειψη των μισών εκπομπών ρύπων από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης της Αμερικής.

Ο εξωτερικός φωτισμός παγκοσμίως ευθύνεται για το 19% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, ενώ για το 14% της κατανάλωσης ενέργειας εντός της Ε.Ε ^[2]. Αυτή η διαφορά οφείλεται στη δέσμευση της Ε.Ε. για αντικατάσταση παλαιών, μη αποδοτικών τεχνολογιών με νέες, με σκοπό τη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος αλλά και του κόστους ηλεκτροδότησης του εξωτερικού φωτισμού.

Στην Ευρώπη δράσεις μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας του φωτισμού γίνονται όλο και πιο συχνές και επιτακτικές, καθώς μειώνουν σημαντικά το κόστος λειτουργίας των δήμων, απελευθερώνοντας σημαντικά κεφάλαια. Στα πλαίσια συμμόρφωσης της Ελλάδας με τους στόχους του 2050 που έχει θέσει η Ε.Ε. για το ενεργειακό μίγμα της και την ενίσχυση της διείσδυσης ΑΠΕ, η εφαρμογή έξυπνων συστημάτων φωτισμού έχει ακόμη ένα όφελος: την επίτευξη συμμετοχής των ΑΠΕ τουλάχιστον στο 35% της κατανάλωσης ενέργειας μέχρι το 2030. Αυτός είναι ένας από τους πιο σημαντικούς στόχους που έχει τεθεί για την Ελλάδα από την Ε.Ε. ^[3]. Η Ελλάδα, στην οποία οι βέλτιστες θέσεις εγκατάστασης υδροηλεκτρικών εργοστασίων έχουν ήδη καλυφθεί και με τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρα διαρκώς να αυξάνονται, έχει να αντιμετωπίσει μια δύσκολη κατάσταση. Αυτή είναι ότι η συντριπτική πλειοψηφία της ηλεκτρικής της ενέργειας παρέχεται από λιγνιτικές μονάδες και φυσικό αέριο. Όσο και να αυξάνονται οι μονάδες ΑΠΕ, αυτές διαρκώς θα δυσκολεύονται να λάβουν μεγαλύτερο κομμάτι της ενεργειακής πίτας, τουλάχιστον μέχρι να υπάρξει κάποια σημαντική τεχνολογική πρόοδος που να κάνει την αποθήκευση της ενέργειάς τους πιο συμφέρουσα και αποδοτική.

Όσο θα δυσκολεύει η αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα και όσο αυξάνεται το κόστος CO₂/tn, τόσο μια ακόμα προοπτική θα κερδίζει έδαφος, και αυτή θα είναι όχι η αύξηση της παρεχόμενης ενέργειας αλλά η μείωση της καταναλισκόμενης. Ο εξωτερικός φωτισμός των πόλεων και οδών είναι ένα ηλεκτρικό φορτίο που εξ ορισμού υπάρχει μόνο το βράδυ, τις ώρες δηλαδή όπου η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πάρα είναι μηδενική και στατιστικά η παραγωγή από τα αιολικά είναι μειωμένη. Επομένως, είναι ένα φορτίο που καλύπτεται σχεδόν εξολοκλήρου από συμβατικές μονάδες βάσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Μείωση της κατανάλωσης του φωτισμού των πόλεων κάνει συνεπώς πιο εύκολα εφικτούς τους στόχους της Ε.Ε. Αυτή η μείωση συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη νύχτα, του φορτίου δηλαδή που σχεδόν πλήρως καλύπτεται από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, και άρα αύξηση της ποσοστιαίας διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα.

1.2. Τεχνολογίες λαμπτήρων

Οι λαμπτήρες τεχνολογίας Solid-State Lighting (SSL), αλλιώς γνωστοί ως LED (Light-Emitting Diode) είναι στο δρόμο για να κυριαρχήσουν πλήρως στην αγορά λαμπτήρων. Βασικότερο κριτήριο αυτής της μετάβασης, για τους λαμπτήρες τόσο εσωτερικών όσο και εξωτερικών χώρων, είναι η αποδοτικότητα των LED, που μεταφράζεται σε εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Μια ποιοτική σύγκριση τεχνολογιών οικιακών λαμπτήρων φαίνεται στον «Πίνακα 1».

Πίνακας 1 – Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών λαμπτήρων

Λαμπτήρας	Πυρακτώσεως	Αλογόνου (Bi-Pin Base)	CFL	Φθορισμού (T-8)	LED
Lumens	850	1.200	800	2.800	800
Watts	60	50	13	32	9,5
Lumens/Watt	14	24	62	88	84
Χρόνος Ζωής (hrs)	1.000	2.000	8.000	20.000	25.000
\$/λαμπτήρα	0,50	2,50	5,00	2,50	10,00
Κόστος λειτουργίας για 25.000 ώρες (\$)	177,50	168,75	51,38	91,13	36,13

Οι τιμές του «Πίνακα 1» αν και δίνουν μόνο μια χονδρική εκτίμηση, λόγω της μεγάλης ποικιλίας προϊόντων στο χώρο του φωτισμού, κάνουν εμφανή την υπεροχή των λαμπτήρων LED όσον αφορά την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και τον χρόνο ζωής, που συνδυασμένα ελαχιστοποιούν το κόστος ηλεκτρικής λειτουργίας οποιασδήποτε εγκατάστασης φωτισμού. Οι λαμπτήρες που αναφέρθηκαν στον παραπάνω πίνακα για λόγους ποιοτικής σύγκρισης αφορούν λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται κυρίως σε οικιακές εφαρμογές. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των λαμπτήρων LED διογκώνονται στις εφαρμογές οδοφωτισμού. Η απόδοση και ο τρόπος λειτουργίας των λαμπτήρων LED επιβαρύνονται σημαντικά από τους λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά φωτιστικά για μείωση της λαμπρότητας και βελτίωση της κατανομής του φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους. Στις εφαρμογές οδοφωτισμού τα LED chips διαθέτουν σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο ζωής, ενώ παράλληλα η απόδοσή τους αυξάνεται, ειδικά εφόσον τα LED chips είναι γυμνά, εκπέμποντας τη φωτεινή τους ροή απευθείας στο περιβάλλον. Λόγω του μεγάλου ύψους στο οποίο εγκαθίστανται τα φωτιστικά οδοφωτισμού η λαμπρότητα των LED μειώνεται. Το βασικό μειονέκτημα των LED είναι η σχετικά αυξημένη τιμή τους σε σχέση με τις εναλλακτικές τεχνολογίες. Η τιμή τους όμως, λόγω των πλεονεκτημάτων τους, μειώνεται διαρκώς, κάνοντας όλο και πιο συμφέρουσα την αγορά τους.

Τα τελευταία χρόνια, η τιμή των LED έχει πέσει αρκετά ώστε να είναι η αδιαμφισβήτητα καλύτερη επιλογή από τις περισσότερες σκοπιές εξέτασης, εκτός από εξειδικευμένες εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλό δείκτη χρωματικής απόδοσης ή CRI, τον οποίο τα συμβατικά φωτιστικά LED δε διαθέτουν ακόμη ή εφαρμογές που απαιτούν τη λειτουργία φωτιστικών υπό υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, διαθέτουν κάποια λιγότερο εμφανή πλεονεκτήματα:

1. Λόγω της δομής τους, δεν περιέχουν τοξικές ουσίες, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού που περιέχουν υδράργυρο.
2. Η κατευθυντικότητα που παρέχουν λόγω της εκπομπής φωτός σε μια κατεύθυνση μειώνει σημαντικά τις απώλειες φωτισμού εντός του φωτιστικού, και την φωτορύπανση.
3. Σε απόμακρες εγκαταστάσεις στις οποίες το κόστος συντήρησης αυξάνεται σημαντικά ανά κατεστραμμένο λαμπτήρα, όπως οι λαμπτήρες θέσης που διαθέτουν οι ανεμογεννήτριες και τα ιδιαίτερα ψηλά κτήρια για τον εντοπισμό τους από τα αεροπλάνα, τα LED είναι η βέλτιστη επιλογή, λόγω του εξαιρετικά μεγάλου χρόνου ζωής τους.

Στα πλαίσια του έξυπνου φωτισμού αλλά και των εφαρμογών του IoT, τα φωτιστικά LED παρουσιάζουν ακόμη περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς ανταγωνιστές τους, από ότι σε εφαρμογές όπου τα φωτιστικά είναι στάσιμα και ο έλεγχος του φωτισμού μη μεταβλητός. Συγκεκριμένα, για εφαρμογές εξωτερικού φωτισμού και οδοφωτισμού, ο προκάτοχος της κυρίαρχης θέσης και ο κύριος ανταγωνιστής είναι οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης ή HPS (High Pressure Sodium) και σε μικρότερο βαθμό οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης ή LPS (Low Pressure Sodium). Βασικό χαρακτηριστικό των HPS που τους έκανε τόσο δημοφιλείς είναι η εξαιρετικά υψηλή απόδοσή τους (lumens/Watt), και το σχετικά χαμηλό κόστος τους, όταν πρόκειται για λαμπτήρες αρκετά μεγάλους ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες εξωτερικού φωτισμού. Αυτό, σε συνδυασμό με την αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής τους (20.000 ώρες), τους έκανε για πολλά χρόνια την καλύτερη επιλογή^[4].

Με την εξέλιξη των LED, η κυριαρχία των HPS φαίνεται να φθίνει. Τα LED χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή απόδοση και εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, ωστόσο τα χαρακτηριστικά τους αυτά από μόνα, δεν κάνουν απαραίτητα αυτονόητη την αντικατάσταση των λαμπτήρων HPS με LED chips πριν το τέλος του χρόνου ζωής τους^[5]. Για μια εγκατάσταση μικρού σχετικά μεγέθους λαμπτήρων HPS η οποία βρίσκεται σε λειτουργία μονάχα το μισό χρόνο ζωής τους (περίπου 3,5 χρόνια), στην οποία γίνεται αντικατάσταση με φωτιστικά LED, αν οι λαμπτήρες HPS δε βρουν «δεύτερη ζωή» σε αντικατάσταση καμένων λαμπτήρων HPS σε άλλη εγκατάσταση, εκτός από την εξοικονομούμενη ετήσια κατανάλωση ενέργειας που θα παρατηρηθεί θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και το γεγονός ότι το μισό από το αρχικό κόστος των HPS λαμπτήρων θα χαθεί. Είναι λογικό σε τέτοιο είδους εφαρμογές να γίνεται προσεκτική τεχνοοικονομική ανάλυση της αντικατάστασης, δίχως να θεωρείται πανάκεια η αντίληψη ότι η αντικατάσταση λαμπτήρων παλαιότερων τεχνολογιών από LED είναι επιθυμητή σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο λειτουργίας μια επένδυσης.

Παρά τις διάφορες μικρές παραμέτρους που μπορεί να συνιστούν μια τέτοια αντικατάσταση να γίνει σε μεταγενέστερη περίοδο, είναι αναμφίβολη η υπεροχή των φωτιστικών LED απέναντι στα HPS, που είναι τα τρέχοντα πιο διαδεδομένα φωτιστικά εξωτερικών χώρων. Αρχικά, οι HPS, όπως και οι LPS σε μεγαλύτερο βαθμό, εκπέμπουν ένα χαρακτηριστικό μονοχρωματικό κίτρινο φως. Το χρώμα αυτό προκαλεί χρωματική αλλοίωση όλων των επιφανειών στις οποίες προσπίπτει, εξού και ο χαμηλός δείκτης χρωματικής απόδοσης 25, αλλοιώνοντας το αστικό τοπίο^[6]. Ακόμη, οι λαμπτήρες τους εκπέμπουν περιμετρικά το φως τους, απαιτώντας ανακλαστική επιφάνεια στο πίσω μέρος του λαμπτήρα για να εκμεταλλευθούν τμήμα μόνο του φωτός που θα χανόταν εντός του φωτιστικού. Τα φωτιστικά LED κυκλοφορούν σε μια γκάμα χρωμάτων φωτός, διαθέτουν ικανοποιητικό CRI (65-95), η εκπομπή του φωτός τους είναι μονής κατεύθυνσης και η απόδοσή τους είναι μετά από χρόνια εξέλιξης καλύτερη από αυτή των υπόλοιπων τεχνολογιών (πάνω από 40% πιο αποδοτικά)^[7]. Μια ακόμη σημαντική παράμετρος είναι το γεγονός ότι οι λαμπτήρες HPS απαιτούν περίπου 20 λεπτά λειτουργίας προκειμένου να φθάσουν την ονομαστική τους φωτεινότητα, ενώ οι LED την παρέχουν σχεδόν στιγμιαία. Αυτά τα 20 λεπτά προστίθενται επιπλέον των απαραίτητων 10 ωρών ημερήσιας λειτουργίας (κατά μέσο όρο) των φωτιστικών, και σε βάθος χρόνου συσσωρεύονται σε σημαντικό όγκο περιττά καταναλισκόμενης ενέργειας.

Λόγω των παραπάνω, τα φωτιστικά που αντικαθίστανται στις πόλεις πια, ιδιαίτερα στην Ευρώπη που εφαρμόζει το μοντέλο ανάπτυξης με την περισσότερη έμφαση στην προστασία του περιβάλλοντος, είναι τύπου LED. Παρακάτω, παρατίθενται επιγραμματικά τα βασικότερα πλεονεκτήματα της εφαρμογής φωτιστικών LED σε μια πόλη όπως η Αθήνα:

- Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (μικρότερο κόστος συντήρησης).
- Καλύτερη ποιότητα φωτός, ορατότητας και μείωση της φωτορύπανσης (λόγω της ταχύτερης μείωσης της έντασης φωτισμού παλαιότερων τεχνολογιών με την πάροδο του χρόνου, συχνά τα φωτιστικά υπερδιαστασιολογούνται, προκειμένου σε βάθος χρόνου να συνεχίσουν να πληρούν τις προδιαγραφές. Αυτό δεν εξίσου απαραίτητο με τα φωτιστικά LED).
- Σπανιότερες βλάβες (λόγω της απλότητας του σχεδιασμού και της αντοχής σε ακραίες θερμοκρασίες)
- Αυξημένη ασφάλεια (λόγω της αξιοπιστίας των φωτιστικών).
- Δυνατότητα για διασυνδεδεμένο σύστημα φωτισμού, που αποτελεί αναπόσπαστο θεμέλιο για μια μελλοντική Έξυπνη Πόλη^[8].

1.3. Internet of Things

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ή Internet of Things (IoT) αναφέρεται στις συσκευές που είναι συνδεδεμένες μέσω ενός δικτύου, οι οποίες επικοινωνούν ενσύρματα ή ασύρματα μεταξύ τους δίχως την ανάγκη διαμεσολάβησης ανθρώπων για την διεκπεραίωση κάποιας διαδικασίας. Το IoT υπάρχει ως ιδέα από τη δεκαετία του 1970, όμως ο όρος “Internet of Things” χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά το 1999 από τον Kevin Ashton, την περίοδο που ίδρυε το Auto-ID Center, ένα ερευνητικό πρόγραμμα με σκοπό την καθιέρωση και διαδεδομένη χρήση της αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID)^[9].

Από τότε που ο Kevin Ashton χρησιμοποίησε τον όρο “Internet of Things” για να περιγράψει ένα δίκτυο το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με τον φυσικό κόσμο μέσω αισθητήρων, το IoT βρίσκεται σε πολλές πτυχές της ζωής μας και κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος σε νέους τομείς. Στο χώρο της υγείας, υπάρχουν εφαρμογές

τηλεϊατρικής και απομακρυσμένης επιτήρησης της υγείας των ασθενών μέσω αισθητήρων, προκειμένου οι ασθενείς που δεν υποστηρίζονται άμεσα από κάποιο τεχνικό μέσο να μπορούν να επιστρέφουν σπίτι τους, ενώ παράλληλα να διασφαλίζεται η διαρκής επιτήρησή τους ^[10]. Στον γεωργικό τομέα μέσω αισθητήρων, συστήματα IoT υπολογίζουν ποιες μέρες δεν απαιτείται να ποτιστούν καλλιέργειες, ενώ στέλνοντας δεδομένα σε κεντρικούς υπολογιστές για την ανάπτυξη των φυτών συναρτήσει των μεταβλητών παραμέτρων, αναπτύσσονται αλγόριθμοι για την εύρεση του βέλτιστου τρόπου διαχείρισης του κάθε τύπου καλλιέργειας ^[11]. Στον οικιακό τομέα, τα έξυπνα σπίτια επιτρέπουν την απομακρυσμένη διαχείριση οικιακών συσκευών δίχως την ανάγκη φυσικής παρουσίας στο σπίτι, ενώ παράλληλα αυξάνουν την ασφάλεια, με τη δυνατότητα διασύνδεσης αισθητήρων, καμερών και συναγερμών με το κινητό τηλέφωνο του χρήστη. Οι έξυπνες πόλεις γίνονται όλο περισσότερο πραγματικότητα, με την ενσωμάτωση λειτουργιών όπως το “smart parking”, μέσω του οποίου οι οδηγοί μπορούν μέσω μιας εφαρμογής να ενημερώνονται για το ποιες θέσεις στάθμευσης είναι κενές, ή να ενημερώνουν πότε προβλέπεται να φύγουν, για τον καλύτερο προγραμματισμό της κάλυψης των θέσεων ^[12].

Οι εφαρμογές είναι υπερβολικά πολλές για να αναγραφούν εδώ καθιστούν το IoT μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες του μελλοντος. Με την πάροδο του χρόνου το IoT όχι μόνο θα εξαπλωθεί περαιτέρω στους τομείς της οικονομίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά και σε νέους, όπως τα οχήματα, των οποίων η διασύνδεση μεταξύ τους αλλά και με τους αισθητήρες που θα διαθέτουν θα τους επιτρέψει να κινούνται αυτόνομα, ταχύτερα και ασφαλέστερα από ότι με οδηγούς. Ενδεικτικά, μονάχα στην αγορά των αυτόνομων αυτοκινήτων έχουν επενδυθεί 100 δισεκατομμύρια δολάρια την τελευταία πενταετία ^[13], καθώς εκτιμάται ότι στα επόμενα χρόνια το 70% των αυτοκινήτων θα είναι συνδεδεμένα στο διαδίκτυο ^[14]. Τέτοιου μεγέθους επενδύσεις αναμένεται να παρατηρηθούν και σε άλλες οικονομίες, με αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός εγκατεστημένων συσκευών IoT να αναμένεται να εκτιναχθεί από τα 11 δισεκατομμύρια στα 40 δισεκατομμύρια μέχρι το 2027 σύμφωνα με το Business Insider, ενώ σύμφωνα με την Gartner μέχρι το 2021 αναμένεται να υπάρχουν 25 δισεκατομμύρια συσκευές ^[15].

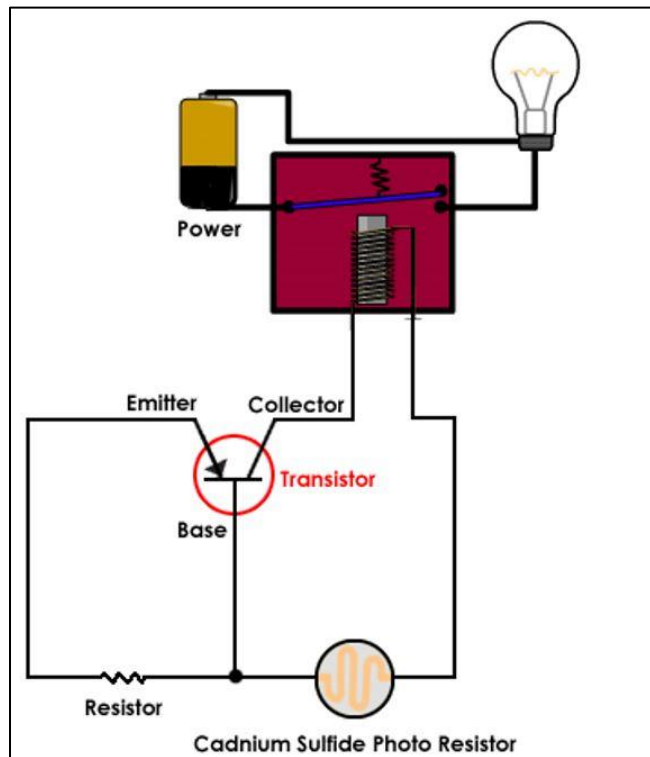
Μια τέτοια άνοδος θα οδηγήσει σε μια ετήσια αύξηση της IoT αγοράς κατά 2,4 τρισεκατομμύρια δολάρια ετησίως. Επισημαίνεται ότι αυτές οι προβλέψεις έγιναν προ της έξαρσης του Covid-19 και συνεπώς δεν έχουν προσαρμοστεί για την συρρίκνωση της οικονομίας που θα προκληθεί. Ακόμη όμως και σε δυσχερείς οικονομικές συνθήκες η άνοδος του IoT αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από αυτή των άλλων τεχνολογικών καινοτομιών (όπως η τεχνητή νοημοσύνη και το blockchain) και βασικός παράγοντας είναι η θεαματική μείωση κόστους που οδηγεί σε σχεδόν όλες τις εφαρμογές του ^[16]. Ένας από τους χώρους εφαρμογής όπου όχι μόνο μειώνει το κόστος, αλλά και χρησιμοποιείται ήδη ευρέως, είναι ο φωτισμός πόλεων, δηλαδή οδών, πεζοδρομίων και πλατειών. Στην Ελλάδα δεκάδες τέτοιου είδους συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία σε διάφορες περιοχές, όπως στο Ηράκλειο ^[17], την Ιόνια οδό και διάφορους δήμους της Αττικής ^[18].

2. Κατηγορίες ελέγχου φωτισμού

2.1. Συστήματα ON/OFF

Στην Ελλάδα, ο τρόπος ελέγχου της πλειοψηφίας των φωτιστικών δρόμου και πόλεων είναι ο ελάχιστος δυνατός. Ο μόνος έλεγχος που γίνεται στα φωτιστικά αυτά είναι οι εντολές on/off, οι οποίες πρέπει να αποστέλλονται βάσει του ελληνικού κανονισμού μισή ώρα πριν τη δύση του ηλίου και μισή ώρα μετά την ανατολή του, αντίστοιχα. Αυτός ο έλεγχος με το υπάρχον σύστημα μπορεί να γίνεται με δύο τρόπους:

1. Με κεντρικό χρονοδιακόπτη που ρυθμίζεται από τη ΔΕΗ και ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τμηματικά ομάδες φωτιστικών στις κατάλληλες ώρες μέσω του συστήματος τηλεχειρισμού ακουστικής συχνότητας (ΤΑΣ).
2. Με την εγκατάσταση ειδικών φωτοαντιστάσεων θειούχου καδμίου (Cadmium Sulfide – CdS photoresistor). Οι φωτοαντιστάσεις είναι στοιχεία των οποίων η αντίσταση βασίζεται στη ποσότητα φωτός που προσπίπτει πάνω τους. Συγκεκριμένα, όσο περισσότερο φως προσπίπτει πάνω τους, τόσο μικρότερη είναι η αντίστασή τους, μέχρι που φθάνει πρακτικά μηδενικές τιμές, ενώ όταν δεν εκτίθεται σε φως, έχουν πολύ υψηλή αντίσταση. Η ενεργοποίηση μιας φωτοαντίστασης CdS από έκθεση σε φως σημαίνει τη ροή ενός μικρού ρεύματος μέσω ενός τρανζίστορ, το οποίο ενεργοποιεί τον ηλεκτρομαγνήτη του διακόπτη. Ο ηλεκτρομαγνήτης έλκει τον οπλισμό, αποσυνδέοντας το φωτιστικό. Όταν η φωτεινότητα μειωθεί κατά το βράδυ, η αντίσταση αυξάνεται, το ρεύμα φθίνει, ο ηλεκτρομαγνήτης επιστρέφει στην αρχική του θέση και ο διακόπτης κλείνει, επιτρέποντας στο φωτιστικό να λειτουργήσει ^[18].



Εικόνα 1 – Αναπαράσταση συστήματος ελέγχου φωτισμού με φωτοαντίσταση CdS

Από τους παραπάνω δύο τρόπους, ο πρώτος είναι ο πιο διαδεδομένος, ενώ ο δεύτερος τρόπος εφαρμόζεται περιορισμένα και μονάχα από μεγάλες κοινοπραξίες κατασκευής μεγάλων οδικών αξόνων. Οι ενσύρματες μέθοδοι ελέγχου έχουν λιγιστά χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις αντίστοιχες ασύρματες όπως:

- Αξιοπιστία – δεν υπάρχουν παρεμβολές και απώλεια μηνυμάτων.

- Ασφάλεια – η ύπαρξη ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης μέσω χρονοδιακόπτη ή η απόλυτη απουσία ενός τέτοιου συστήματος δεν αφήνει περιθώρια υποκλοπής δεδομένων και παραβίασης του δικτύου φωτισμού με απώτερους σκοπούς στα πλαίσια μιας διασυνδεδεμένης έξυπνης πόλης.
- Ευκολία εγκατάστασης και μικρότερο αρχικό κεφάλαιο – η απουσία απομακρυσμένης διαχείρισης και ο έλεγχος των on/off κύκλων των φωτιστικών με τους παραπάνω τρόπους δεν απαιτεί ιδιαίτερη τεχνογνωσία, ενώ οι νέες τεχνολογίες, ενώ μειώνουν τα κόστη λειτουργίας, απαιτούν μεγαλύτερο αρχικό κεφάλαιο για την απόκτηση και εγκατάστασή τους, το οποίο δεν είναι πάντα διαθέσιμο.

2.2. Συστήματα στατικού ελέγχου

Οι τρόποι ελέγχου που περιγράφηκαν παραπάνω, αν και από πλευράς ασφάλειας είναι επαρκείς, οδηγούν σε απώλεια μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Τα συστήματα μεγαλύτερου ελέγχου των φωτιστικών, δηλαδή τα συστήματα στατικού ελέγχου, εστιάζουν στη μείωση της φωτεινής ροής σε συγκεκριμένες ώρες βάσει παλαιότερων δεδομένων και μελετών. Δεν είναι εφικτή η ανά πάσα στιγμή αλλαγή των προκαθορισμένων προγραμμάτων λειτουργίας και συνήθως λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο καθόλη τη διάρκεια ζωής τους. Εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με τις παρακάτω μεθόδους:

- **Step Dimming:** Dimming των φωτιστικών σε συγκεκριμένη τιμή κατά τη διάρκεια της νύχτας: Το επίπεδο φωτισμού που παρέχεται από τα φωτιστικά μειώνεται σε διάφορα ποσοστά της μέγιστης τιμής ανάλογα την ώρα, καθώς συγκεκριμένες ώρες της νύχτας η κυκλοφορία είναι αρκετά μικρή ώστε να μην είναι απαραίτητη η μέγιστη φωτεινότητα όλων των φωτιστικών. Για παράδειγμα, στην Brittany της Γαλλίας, τα φωτιστικά μειώνουν την ένταση φωτισμού κατά 60% από τις 23:00 μέχρι τις 05:00, δηλαδή στις μισές ώρες λειτουργίας κατά μέσο όρο, επιτυγχάνοντας 30% εξοικονόμηση ενέργειας ^[19].
- **Stand Alone Lite Dimming – Dimming των φωτιστικών βάσει στατιστικής μελέτης:** Πριν τη λειτουργία αυτού του συστήματος ελέγχου του φωτισμού είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μελέτης εξακρίβωσης της κυκλοφοριακής κίνησης των οδών στις οποίες θα εφαρμοσθεί. Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης είναι η απόκτηση της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας της κίνησης για συγκεκριμένα διακριτά χρονικά διαστήματα, των οποίων η συνήθης τιμή είναι τα 15 λεπτά. Έτσι, για κάθε 15λεπτο του 24ωρου, τα φωτιστικά προσαρμόζονται ώστε να καλύπτουν τη μέγιστη κίνηση που καταγράφηκε για το τρέχον 15λεπτο το περασμένο έτος. Εφόσον είναι εφικτό, τα φωτιστικά μειώνουν το επίπεδο φωτισμού τους, στην προβλεπόμενη κυκλοφοριακή κίνηση, όταν αυτή επιτρέπει τη χρήση μικρότερης κλάσης φωτισμού. Μια τέτοια μέθοδος εφαρμοζόμενη στην πόλη της Κρακοβίας στην Πολωνία, υπολογίζεται ότι μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας κατά 24% ^[20].
- **Constant Lumen Output (CLO):** Με την πάροδο του χρόνου τα φωτιστικά όλων των τεχνολογιών παρέχουν μειωμένη φωτεινή ροή. Για το λόγο αυτό, σε έργα φωτισμού οι λαμπτήρες υπερδιαστασιολογούνται κατά 20-25%. Για παράδειγμα, στα φωτιστικά LED συνήθως ως χρόνος ζωής ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η φωτεινή ροή να φθάσει το 70% της αρχικής. Επομένως, αν σε μια επένδυση τα φωτιστικά έχουν μόλις αρκετή φωτεινή ροή στην αρχή της λειτουργίας ώστε να πληρούν τις σχετικές προδιαγραφές, σε διάστημα 1-2 χρόνων αυτές δε θα πληρούνται. Μέσω της CLO τα φωτιστικά δε παύουν να υπερδιαστασιολογούνται, αλλά παύει ο υπερφωτισμός, δηλαδή η παροχή περιττά πολλής φωτεινής ροής στα πρώτα χρόνια της εγκατάστασης. Με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή με τη μείωση της παρεχόμενης φωτεινής ροής, αυτή μπορεί μέσω των ελεγκτών να αυξηθεί για να διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα. Αυτό οδηγεί σε μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 10% και αύξηση του χρόνου ζωής των φωτιστικών μέχρι και 20% ^[21].
- **Lumens On the Road (LOR):** Οι λαμπτήρες των φωτιστικών παράγονται σε διακριτές τιμές ισχύος. Είναι πολύ σπάνιο, για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού μιας επιφάνειας, ένα φωτιστικό να παρέχει φωτισμό ακριβώς ίσο με τον απαιτούμενο από την αντίστοιχη κλάση φωτισμού στην οποία η επιφάνεια υπάγεται. Συνεπώς, σχεδόν πάντα τα επιλεγμένα φωτιστικά είναι λίγο μεγαλύτερης ισχύος από αυτήν που απαιτείται, λαμβάνοντας υπόψιν και τον συντελεστή συντήρησης της εγκατάστασης. Το LOR, επιτρέπει τη ρύθμιση της φωτεινής ροής των φωτιστικών με μείωση της παρεχόμενης ισχύος, ώστε ο φωτισμός οριακά να πληροί της προδιαγραφές, αποτρέποντας τον υπερφωτισμό, και εξοικονομώντας ενέργεια ^[21].

2.3. Συστήματα δυναμικού ελέγχου

Τα συστήματα δυναμικού φωτισμού επιτρέπουν τη μέγιστη μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Ενώ τα on/off συστήματα δεν παρέχουν περαιτέρω εξοικονόμηση και τα συστήματα στατικού ελέγχου παρέχουν μέγιστη εξοικονόμηση περί τα 20-30%, τα συστήματα δυναμικού ελέγχου μπορούν να πετύχουν έως και 40% εξοικονόμηση ενέργειας, εφαρμοζόμενη στη μέχρι και 70% εξοικονόμηση ενέργειας που συνεπάγεται η αντικατάσταση παλαιών λαμπτήρων με LED. Βασική αρχή των συστημάτων αυτών είναι η επικοινωνία των φωτιστικών μεταξύ τους και με αισθητήρες, ώστε να υπολογίζουν τη βέλτιστη παρεχόμενη φωτεινή ροή σε πραγματικό χρόνο. Στα συστήματα στατικού και δυναμικού ελέγχου υπάρχουν συγκεκριμένα πρωτόκολλα που επιτρέπουν τον έλεγχο των φωτιστικών με διάφορες μεθόδους. Ακολουθεί περιγραφή των πιο διαδεδομένων πρωτόκολλων για έλεγχο φωτιστικών.

2.3.1. Σύστημα 0-10 V και 1-10 V

Το 0-10V σύστημα είναι από τα πρώτα και απλά συστήματα ελέγχου φωτισμού. Η αρχή λειτουργίας του είναι μέσω ενός DC σήματος ελέγχου που αποστέλλεται στη συσκευή, ώστε αυτή να ρυθμίζει ανάλογα την ένταση φωτισμού της. Συγκεκριμένα, σήμα μηδενικής τάσης αντιστοιχεί σε σβηστό φωτιστικό, ενώ σήμα 10V αντιστοιχεί σε φωτισμό μέγιστης έντασης.

Η αρχική χρήση του 0-10 V ήταν η διαχείριση λαμπτήρων φθορισμού, αλλά με την καθιέρωση και άλλων τεχνολογιών επικράτησε και στις νεότερες, αν και σε πολλούς τομείς έχει αρχίσει να αντικαθίσταται από νεότερα και πιο αποτελεσματικά συστήματα διαχείρισης. Η νεότερη έκδοση, το 1-10 V λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο με το 0-10 V, με ειδικό διαφορά την αδυναμία απενεργοποίησης του φωτιστικού μέσω του controller. Αυτό, έγινε για λόγους ασφαλείας, καθώς δεν επιτρέπει να σβήσουν τα φωτιστικά μέσω του ελεγκτή και έτσι έχουν πάντα μια ελάχιστη εκπέμπουσα φωτεινότητα. Επιπλέον, η νέα εκδοχή αυτή αυξάνει την μακροζωία και αξιοπιστία του ελεγκτή, διότι δεν απαιτείται να κάνει dim το φωτιστικό μέχρι να σβήσει, και έτσι δεν υπόκειται αυτή τη φθορά, δεδομένου του ότι δεν έχει την αντοχή ενός συμβατικού διακόπτη. Αφαιρώντας αυτή την αρμοδιότητα από τον ελεγκτή και αναθέτοντάς την στον αρχικό της κάτοχο, το διακόπτη του φωτιστικού, το σύστημα είναι πιο αξιόπιστο και αποτελεσματικό ^[22].

Και τα δύο συστήματα είναι αναλογικά, έτσι η ακρίβειά τους στη διαχείριση της φωτεινότητας των φωτιστικών είναι μικρή. Η σύνδεση γίνεται μέσω καλωδίων, που κάνει την εγκατάσταση περίπλοκη και είναι μονής κατεύθυνσης, δηλαδή ο ελεγκτής ή dimming driver μπορεί μονάχα να αποστείλει σήματα ελέγχου για την αλλαγή της φωτεινότητας, αλλά δεν μπορεί να λάβει κάποιου είδους δεδομένα από το φωτιστικό. Λόγω των παραπάνω περιορισμών του, τα 0-10 V και 1-10 V αντικαθίστανται όλο και περισσότερο από το πρότυπο DALI ^[23].

2.3.2. DALI – Digital Addressable Lighting Interface

Το DALI είναι ένα ανοικτό πρότυπο, εναλλακτικό για αρκετά ιδιόκτητα πρωτόκολλα. Τα DALI, DALI-2 και D4i ανήκουν στην DiiA, μια παγκόσμια κοινοπραξία εταιρειών φωτισμού, και εξασφαλίζουν ότι εξοπλισμός από διαφορετικούς κατασκευαστές θα είναι διαλειτουργικός, δηλαδή θα μπορεί να συνεργαστεί με συσκευές που διαθέτουν διαφορετικό λογισμικό. Μέσω του DALI, κάθε συσκευή μπορεί να διευθετηθεί μοναδικά, επομένως το DALI χρησιμοποιεί λιγότερα καλώδια από τα προηγούμενα συστήματα. Το δίκτυο που δημιουργεί μπορεί να έχει τοπολογία ζυγού (bus) ή αστέρα (star). Τα επίπεδα έντασης φωτισμού προσδιορίζονται από έναν αριθμό 8-bit, όπου 0 σημαίνει σβηστό, 1 σημαίνει 0,1% και 254 σημαίνει πλήρης ένταση. Το 255 χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του τρέχοντος επιπέδου φωτεινότητας σε περίπτωση που δε χρειάζεται μετάβαση σε άλλη στάθμη φωτισμού. Το DALI-2 διαθέτει τη μέθοδο καθορισμού του χρώματος μέσω της μεθόδου Tc (tunable white) από τον Ιανουάριο του 2020 ^[24].

Συγκριτικά με τα 0-10 V και 1-10 V, το DALI είναι ψηφιακό, αμφίδρομης επικοινωνίας, επιτρέποντας την ανάλυση δεδομένων από τα φωτιστικά και την ανίχνευση προβλημάτων και βλαβών, και ανοικτό. Το ότι είναι ανοικτό, δηλαδή δεν αποτελεί ιδιωτική ιδιοκτησία, συνείφερε σημαντικά στην ταχύτερη διάδοσή του. Στα πλαίσια του IoT και του έξυπνου φωτισμού, το DALI επιτρέπει την επικοινωνία παραπάνω από ενός είδους

συσκευής με το φωτιστικό, παρέχοντας τη δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών αισθητήρων (αισθητήρας θερμοκρασίας, radar, φωτεινότητας) από ένα μόνο φωτιστικό.

Τα παραπάνω ενσύρματα πρότυπα προϋποθέτουν την εγκατάσταση μιας dimmable πηγής ισχύος σε κάθε φωτιστικό, η οποία ελέγχεται από έναν controller. Υπάρχουν δύο τρόποι να γίνει έλεγχος της πηγής ισχύος του φωτιστικού ώστε να τροποποιηθεί η παροχή φωτεινής ροής του: ενσύρματα και ασύρματα.

2.4. Ενσύρματη Απομακρυσμένη Επικοινωνία – Narrowband PLC (Power Line Communications)

Η PLC, δηλαδή η επικοινωνία μέσω γραμμών ισχύος μεταφέρει δεδομένα μέσω των αγωγών του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε συσκευές που είναι διασυνδεδεμένες σε αυτό. Διαδίδοντας εντός των γραμμών σήματα υψηλών συχνοτήτων, συγκριτικά με τα 50 Hz λειτουργίας, αυτά μπορούν να ανιχνευθούν από τις συσκευές στις οποίες απευθύνονται και να αποκωδικοποιηθούν για να εκτελεσθούν συγκεκριμένες λειτουργίες [25].

Οι βασικές κατηγορίες επικοινωνίας είναι οι στενής και ευρείας ζώνης, narrowband και broadband αντίστοιχα. Η Narrowband PLC λαμβάνει χώρα στις συχνότητες 3-500kHz ενώ η Broadband 1,8-250MHz [26]. Η μειωμένη συχνότητα της Narrowband PLC σημαίνει μικρότερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και αυξημένη εμβέλεια, το οποίο με τη σειρά του σημαίνει ότι είναι η κατάλληλη κατηγορία για τα συστήματα ελέγχου εξωτερικού φωτισμού για να πετύχει επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, χωρίς να υπερφορτώνει το δίκτυο, εφόσον τα συστήματα ελέγχου φωτισμού δεν απαιτούν μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων. Το τελευταίο δεδομένο πρέπει να δίνεται στα πλαίσια του ότι δεν είναι διαδομένη η ενσύρματη απομακρυσμένη διαχείριση συστημάτων δυναμικού φωτισμού και είναι πολύ πιθανό αν ήταν να υπήρχε υπερφόρτωση των γραμμών [27].

Η PLC στο σύνολό της έχει διάφορες προκλήσεις οι οποίες δεν έχουν βρει απάντηση. Αρχικά, οι γραμμές ισχύος δεν είναι σχεδιασμένες για να μεταφέρουν δεδομένα και λειτουργούν στην πράξη ως βαθυπερατά φίλτρα. Η διαδικασία διαμόρφωσης των σημάτων είναι μια επίπονη διαδικασία, καθώς οι γραμμές ισχύος είναι ένα περιβάλλον έντονα θορυβώδες. Για τον λόγο αυτόν η PLC απαιτεί πολύ αξιόπιστο εξοπλισμό προκειμένου να ανταπεξέλθει στη δυσκολία επικοινωνίας μέσω των γραμμών. Ακόμη, η δομή των δικτύων διανομής διαφέρουν τόσο από πόλη σε πόλη, αλλά πολλές φορές και σε περιοχές εντός της ίδια πόλης, δεδομένου ότι το δίκτυο διανομής μιας πόλης αναπτύσσεται παράλληλα με την πόλη στην οποία ανήκει, συνεπώς μπορεί να ενσωματώνει διαφορετικές καινούργιες τεχνολογίες, παράλληλα με τις παρωχημένες σε άλλες περιοχές της. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη απουσία καθολικού προτύπου επικοινωνίας για την PLC κάνει τη διαλειτουργικότητα ενός τέτοιου συστήματος αμφίβολη. Ακόμη, η PLC παρουσιάζει σημαντικό πρόβλημα χρονικής υστέρησης σε εφαρμογές δυναμικού φωτισμού σε επίπεδο πόλης όπου ο αριθμός εντολών που πρέπει να αποστέλλεται στο σύνολο των φωτιστικών είναι πολύ αυξημένος. Το γεγονός αυτό την αποκλείει για εφαρμογές συστημάτων δυναμικού φωτισμού, που ο αριθμός εντολών που πρέπει να αποσταλούν σε δεδομένο χρονικό διάστημα είναι μεταβαλλόμενος [28].

3. Πρωτόκολλα Ασύρματης Επικοινωνίας

Με τη ραγδαία ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών και ειδικότερα του IoT, έχουν δημιουργηθεί πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας ειδικά για την machine-to-machine επικοινωνία, καθώς και άλλα που μπορούν να κάνουν αυτήν και άλλες λειτουργίες μαζί, το καθένα με τις δικές τους ιδιαιτερότητες. Ωστόσο, πριν τη μεμονωμένη μελέτη πρωτοκόλλων, προέχει να διαλευκανθεί σε πιο εύρος συχνοτήτων είναι επιθυμητό να λειτουργεί το πρωτόκολλο που θα επιλεγεί.

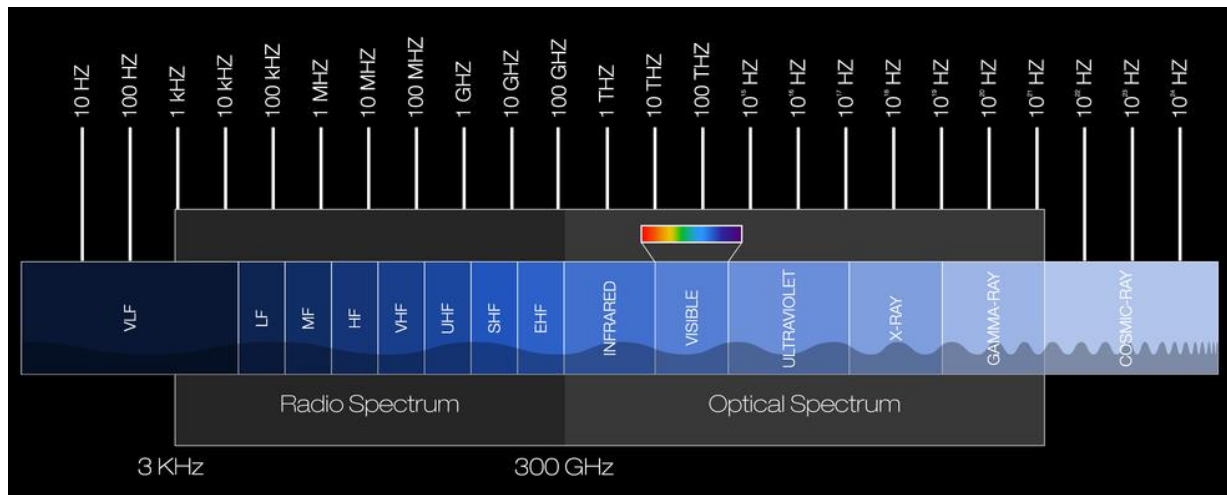
3.1. Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από κύματα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αυτά δημιουργούνται όταν υπάρχει διαταραχή στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- Τη συχνότητά του, δηλαδή το πλήθος των επαναλήψεων ενός στοιχειώδους μοτίβου της κυματομορφής που διαδίδεται σε περίοδο ενός δευτερολέπτου.
- Το μήκος κύματός του, δηλαδή την απόσταση στο χώρο η οποία καλύπτεται κατά τη διάρκεια ενός στοιχειώδους μοτίβου του κύματος, δηλαδή ενός κύκλου ^[29].

Η διαταραχή αυτή στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να γίνει ελεγχόμενα μέσω ενός πομπού. Ένας πομπός ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δημιουργεί ένα φέρον κύμα (carrier wave), με τη χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο στη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών είναι ένα ημιτονοειδές κύμα. Το κύμα αυτό στη συνέχεια διαμορφώνεται κατάλληλα, ενισχύεται, και μέσω της κεραίας του πομπού εκπέμπεται. Η κεραία καταφέρει τη μετάδοση του κύματος ταλαντώνοντας ηλεκτρόνια κατά μήκος της, των οποίων η μεταβολή στο χώρο προκαλεί την εκπομπή του κύματος.

Αυτό το κύμα εντοπίζεται από την κεραία του αναγκάζοντας τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μέσα της να δημιουργήσουν εναλλασσόμενο ρεύμα, δηλαδή μια μεταβαλλόμενη κίνηση ηλεκτρονίων, αντίστοιχη με αυτή τη κεραία του πομπού. Στη συνέχεια, ακολουθείται περίπου η ανάστροφη διαδικασία από αυτήν την παραγωγής του. Το κύμα ενισχύεται ώστε να μπορεί να το επεξεργασθεί αποτελεσματικά ο πομπός, και μέσω του συντονιστή εξάγονται μονάχα οι συχνότητες οι οποίες έχουν προβλεφθεί ότι θα περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το δέκτη. Τέλος, μέσω του ανιχνευτή εντοπίζονται οι χρήσιμες πληροφορίες από την είσοδο του δέκτη και διαχωρίζονται από το φέρον κύμα για να οδηγηθούν στη συνέχεια στην κατάλληλη συσκευή αξιοποίησής τους, για παράδειγμα στον ενισχυτή ήχου και το ηχείο, εφόσον πρόκειται για ένα ραδιόφωνο. Η παραπάνω αρχή δημιουργίας και ανάλυσης σημάτων χρησιμοποιείται σε όλες τις εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας ^{[30][31]}. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε πολλές υποκατηγορίες, όπου η κάθε μια χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.



Εικόνα 2 – Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Όπως φαίνεται στην «Εικόνα 2» οι συχνότητες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων και στο οπτικό φάσμα. Το οπτικό φάσμα παλαιότερα χρησιμοποιείτο για να περιγράψει το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που είναι ανιχνεύσιμο από το ανθρώπινο μάτι, όμως πια ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει όλες τις συχνότητες που έχουν ίσο ή μικρότερο μήκος κύματος από την υπέρυθρη ακτινοβολία, δηλαδή από το 1 mm και κάτω (εναλλακτικά, από συχνότητες 300 GHz και άνω)^[32]. Οι συχνότητες αυτές χαρακτηρίζονται γενικά από τη μεγάλη ενέργεια που φέρουν, καθώς όσο περισσότερο μικραίνει το μήκος κύματος, τόσο περισσότερη ενέργεια μπορεί να φέρει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Για το λόγο αυτό και οι ιονίζουσες ακτινοβολίες, δηλαδή οι ακτινοβολίες που μεταφέρουν επαρκή ενέργεια για την απόσπαση ηλεκτρονίων από άτομα ή μόρια, είναι και οι πιο βλαβερές ακτινοβολίες για τους οργανισμούς. Οι ιονίζουσες ακτινοβολίες δεν έχουν σαφώς ορισμένα όρια συχνοτήτων, καθώς διαφορετικά άτομα και μόρια ιονίζονται για διαφορετικά ποσά ενέργειας, ωστόσο εμπεριέχουν τις συχνότητες που βρίσκονται από το υπεριώδες φάσμα, δηλαδή το τμήμα του ορατού φάσματος με τις μεγαλύτερη συχνότητα, και άνω^[33].

Στη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων, ανήκουν οι ακτινοβολίες συχνοτήτων από 3 kHz μέχρι 300 GHz. Η ζώνη αυτή είναι το τμήμα του φάσματος που κατά κόρον χρησιμοποιείται για τις ασύρματες επικοινωνίες. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι συχνότητες διαφορετικών τάξεων μεγέθους είναι κατάλληλες για διαφορετικού τύπου εφαρμογές, τα προβλήματα που θα προέκυπταν από τον κορεσμό τμημάτων του φάσματος από διαφορετικά συστήματα τηλεπικοινωνιών και από τις παρεμβολές που η συνύπαρξή τους θα προκαλούσε, έκαναν απαραίτητη την επίβλεψη της ανάθεσης και χρήσης των ραδιοσυχνοτήτων σε ένα θεσμικό όργανο.

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU - International Telecommunication Union) ιδρύθηκε το 1865 και είναι η ειδικευμένη οργάνωση του ΟΗΕ μέσω της οποίας οι κυβερνήσεις και οι εταιρείες συντονίζουν τη δράση τους για την ίδρυση και λειτουργία των δικτύων τηλεπικοινωνιών. Μια από τις βασικές αρμοδιότητες της ITU ήταν η τμηματοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων, ώστε κάθε είδος σύστημα ασύρματης επικοινωνίας να έχει σαφώς ορισμένα όρια συχνοτήτων που μπορεί να χρησιμοποιήσει. Με τον τρόπο αυτό, κάθε επικοινωνία σε μια δεδομένη συχνότητα δεν επηρεάζεται από απρόβλεπτη ύπαρξη άλλων συστημάτων επικοινωνιών και έτσι τα υπάρχοντα συστήματα σε κάθε υπομήμημα του φάσματος μπορούν να επικεντρωθούν στη θωράκιση των επικοινωνιών τους και στην μείωση των παρεμβολών που προκαλούν σε γειτονικά συστήματα παρόμοιας τεχνολογίας μόνο^[34]. Η τμηματοποίηση της ζώνης ραδιοσυχνοτήτων οδήγησε στις κύριες ζώνες συχνοτήτων και τις αντίστοιχες συμβατικές χρήσεις τους που φαίνονται στον «Πίνακα 2»^[35].

Στον πίνακα αυτό, οι ενδεικτικές εφαρμογές περιέχουν τις ασύρματες τοπικές επικοινωνίες και τις δυνατότητες που αυτές επιτρέπουν. Ωστόσο, κατά τη τμηματοποίηση του φάσματος, η ITU δεν είχε καθορίσει τις συχνότητες στις οποίες αυτές οι επικοινωνίες θα γίνονταν. Συγκεκριμένα, το 1947, η ITU ίδρυσε τις ISM ζώνες συχνοτήτων, των οποίων η χρήση υπαγορεύεται από το όνομα τους, βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές χρήσεις (Industrial Scientific Medical – ISM), εφαρμογές δηλαδή πέρα των τηλεπικοινωνιών όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων και η επαγωγική θέρμανση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αν και η ονομασία τους τότε ήταν ακριβής, κοντά 70 χρόνια μετά, οι ζώνες ISM δεν περιορίζονται στις εφαρμογές και τις χρήσεις που ήταν τότε γνωστές. Τα χρόνια μετά την ίδρυσή τους, η συνήθης χρήση των ζωνών αυτών ήταν για εκπομπή σημάτων από μεμονωμένες συσκευές, ώστε να μην δημιουργούν παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες των άλλων συχνοτήτων. Όμως, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας η ελκυστικότητα των μη αδειοδοτημένων ISM ζωνών αυξήθηκε και υπήρξε πίεση για να επιτραπεί η χρήση αυτών των ζωνών και για διάφορες μορφές ασύρματης επικοινωνίας^[36].

Πίνακας 2 – Κατηγοριοποίηση των ζωνών συχνοτήτων

Ζώνη Συχνοτήτων	Εύρος Συχνοτήτων	Εύρος μήκους κύματος	Ενδεικτικές εφαρμογές
VLF Very Low Frequency	3 – 30 kHz	10 – 100 km	Υποβρύχιες επικοινωνίες, Πλοήγηση, Γεωφυσική
LF Low Frequency	30 – 300 kHz	1 – 10 km	Πλοήγηση, RFID, Ερασιτεχνικό ράδιο
MF Medium Frequency	300 kHz – 3MHz	100 – 1.000 m	AM ράδιο, επικοινωνίες στεριάς – θάλασσας
IF Intermediate Frequency	300 Hz – 10 MHz	30 – 1.000 m	Near Field Communication (NFC), Στρατιωτικές και βιομηχανικές επικοινωνίες, διαγνωστικά και θεραπευτικά εργαλεία (κοχλιακά εμφυτεύματα)
HF High Frequency	3 – 30 MHz	10 – 100 m	Επικοινωνίες πέραν του ορίζοντα (αεροπορίας και ραντάρ), RFID, φορητή τηλεπικοινωνία
VHF Very High Frequency	30 – 300 MHz	1 – 10 m	FM ράδιο, μετάδοση τηλεοράσεων, επικοινωνία εντός του ορίζοντα (έδαφος με αεροπλάνα)
UHF Ultra High Frequency	300 MHz – 3 GHz	100 mm – 1 m	Ασύρματα τοπικά δίκτυα (Bluetooth, Zigbee), GPS, συστήματα απομακρυσμένου ελέγχου, φούρνοι μικροκυμάτων
SHF Super High Frequency	3 – 30 GHz	10 – 100 mm	Αστρονομία, μετάδοση μέσω δορυφόρων, Wi-Fi, επικοινωνίες μικροκυμάτων
EHF Extremely High Frequency	30 – 300 GHz	1 – 10 mm	Ανιχνευτής κυμάτων χιλιοστών, όπλο στοχευμένης ενέργειας (ADS), απομακρυσμένη ανίχνευση

3.2. Αδειοδοτημένο ή μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων

Όπως αναφέρθηκε στο παραπάνω κεφάλαιο, για τη μεταφορά δεδομένων ασύρματα στα πλαίσια μιας τεχνικής εφαρμογής, υπάρχει πληθώρα ζωνών συχνοτήτων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, έναντι των σαφώς ορισμένων ζωνών που βρίσκονται εντός του αδειοδοτημένου φάσματος συχνοτήτων, υπάρχει το μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων ή ISM band, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές συγκεκριμένων προδιαγραφών και απαιτήσεων. Πριν την επιλογή συγκεκριμένου πρωτοκόλλου απαιτείται να επιλεγθεί σε ποιο από τα δύο τμήματα του φάσματος είναι προτιμότερο να γίνει η ασύρματη επικοινωνία.

3.2.1. Αδειοδοτημένο – Licensed

- Το αδειοδοτημένο τμήμα του φάσματος απαιτεί από τον χρήστη της συχνότητας να αποκτήσει και να διατηρεί την απαραίτητη άδεια. Επειδή ο κάτοχος μιας τέτοιας άδειας διαθέτει τα αποκλειστικά δικαιώματα για το τμήμα αυτό του φάσματος σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, είναι κοινώς αποδεκτό ότι οι επικοινωνίες θα είναι ανεμπόδιστες από παρεμβολές ή συνωστισμό.
- Ο εξοπλισμός που είναι σχεδιασμένος για αδειοδοτημένα τμήματα του φάσματος είναι παραδοσιακά εξοπλισμός υψηλής τεχνολογίας με υψηλές τιμές, που σε αντάλλαγμα, είναι συνδεδεμένα με υψηλή αξιοπιστία.
- Πέραν του ακριβού επιμέρους εξοπλισμού, η ίδια η απόκτηση της συχνότητας είναι ένας πόρος δύσκολος και ακριβός για να αποκτηθεί, και το εύρος του φάσματος που θα αγορασθεί τελικά μπορεί να αποτελεί εμπόδιο.

- Οι πάροχοι του παραπάνω εξοπλισμού τυπικά πωλούν κατευθείαν στους τελικούς χρήστες και ως αποτέλεσμα, θεωρείται πως παρέχουν καλύτερη εξυπηρέτηση και τεχνική υποστήριξη.
- Η λειτουργία σε συγκεκριμένη συχνότητα, παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα για τη διατήρηση του λόγου έντασης σήματος προς θόρυβο. Τα μεταδιδόμενα σήματα είναι τυπικά πιο ισχυρά (μέχρι και 100 φορές) από τα αντίστοιχα σε μη αδειοδοτημένο φάσμα. Αυτό, σε συνδυασμό με τα χαμηλά επιπέδου θορύβου λόγω της προστασίας του φάσματος από υπηρεσίες όπως ο FCC στην Αμερική, αυξάνουν σημαντικά την εμβέλεια, το μέγεθος των μεταφερόμενων δεδομένων και τη συνολική επίδοση ^[37].
- Λόγω της μεγάλης εμβέλειας, ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να μεταδίδει μέχρι και 30 μίλια μεταξύ σταθμού και τελικής συσκευής, πάνω από 100 φορές από το αντίστοιχο ενός μη αδειοδοτημένου δικτύου, όπου η απόσταση τυπικά είναι κλάσμα του ενός χιλιομέτρου ^[38].

3.2.2. Μη αδειοδοτημένο – Unlicensed

- Η ευθύνη για να διευθετείται οποιαδήποτε σύγκυση ή πρόβλημα σχετικά με τη λειτουργία σε αδειοδοτημένο φάσμα ανήκει στον ιδιοκτήτη της συχνότητας, ο οποίος πρέπει να εντοπίσει το συγκεκριμένο πρόβλημα και το συνεργάτη που πλήττεται. Η ιδιοκτησία μιας άδειας σημαίνει ότι ο ιδιοκτήτης έχει δικλείδα ασφαλείας στο δικαστήριο, στην περίπτωση προβλημάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο ιδιοκτήτης δεν έχει καμία εγγύηση ότι τα παράπονα θα επιλυθούν γρήγορα και πρέπει να υπομένει το κόστος της διευθέτησης διαφωνιών. Τέτοιου είδους ζητήματα δεν υπάρχουν εξαρχής στο μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων, όπου οι χρήστες του γνωρίζουν ότι είναι δική τους ευθύνη να διαθέτουν εξοπλισμό που είναι ανθεκτικός σε παρεμβολές.
- Ο εξοπλισμός για δίκτυα αδειοδοτημένου φάσματος είναι πολύ πιο ακριβός από τον αντίστοιχο για το μη αδειοδοτημένο φάσμα (σε μερικές περιπτώσεις έως και 10 φορές). Αν και αυτή η διαφορά τιμής σε παλαιότερα χρόνια αντισταθμιζόταν από τη μεγαλύτερη αξιοπιστία, σύμφωνα με τη Motorola, οι τεχνολογίες στο μη αδειοδοτημένο φάσμα τα τελευταία χρόνια σημείωσαν σημαντική πρόοδο, η οποία πια δε δικαιολογεί τη διαφορά αυτή στην τιμή.
- Αν και η απευθείας στήριξη από τους παρόχους εξοπλισμού είναι πάντα διαθέσιμη, η ποιότητα της στήριξης από VARs (Value-AddedR) και SPs (Solution Providers) έχει βελτιωθεί σημαντικά στα τελευταία 20 χρόνια. Ως αποτέλεσμα, μερικές επιχειρήσεις, αναγκάστηκαν να μειώσουν τα κόστη στελέχωσης της απευθείας στήριξης, και η ποιότητα της υπηρεσίας έχει μειωθεί επίσης. Σε αντίθεση με αυτή την τάση, οι VARs και οι SPs έχουν εκπαιδευτεί και πιστοποιηθεί από παρόχους για να παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες στήριξης. Μάλιστα, πολλοί μεγάλοι πάροχοι τεχνολογιών πια στηρίζονται σε συνεργάτες που προσφέρουν τέτοιους είδους υπηρεσίες για να γεφυρώσουν το κενό της τεχνικής υποστήριξης ^[39].

Πίνακας 3 – Σύγκριση αδειοδοτημένου και μη αδειοδοτημένου φάσματος

	Μη αδειοδοτημένο φάσμα	Αδειοδοτημένο φάσμα
Διαθεσιμότητα	Ευρέως διαθέσιμο χωρίς κόστος	Περιορισμένο στους κατόχους άδειας
Λόγος σήματος/θορύβου	Μεταβλητός, επηρεάζεται αρνητικά από τη μικρή ισχύ μετάδοσης και την υψηλή πιθανότητα παρεμβολών	Εξαιρετικός, λόγω της αποκλειστικής χρήσης της ζώνης και της υψηλότερης ισχύος μετάδοσης
Εμβέλεια	Περιορισμένη, συνήθως μέχρι 200 μέτρα για επικοινωνία μεταξύ κόμβων δικτύου και συσκευών	Εκτενής, συνεπής και προβλέψιμη στα μέχρι και 30 km μεταξύ κόμβων δικτύου και συσκευών
Υποδομή	Ανάγκη υψηλού αριθμού αναμεταδοτών, λόγω της μικρής εμβέλειας	Μικρή λόγω της μεγάλης εμβέλειας και την απευθείας επικοινωνία συσκευών με τον πύργο
Εύρος ζώνης	1-8 kbps ανά κανάλι, όπου τα κανάλια είναι ελεύθερα για χρήση	Μέχρι 172 kbps ανά κανάλι, αλλά περιορισμένα στα κανάλια της άδειας
Καθυστέρηση	Ενδεχομένως υψηλή και αναλογική με τον αριθμό των μεταβιβάσεων μηνυμάτων που απαιτούνται, συμπεριλαμβάνοντας και τις παρεμβολές	Χαμηλή και προβλέψιμη λόγω της απευθείας επικοινωνία με τους πύργους και την αμελητέα παρουσία παρεμβολών
Αξιοπιστία	Μπορεί να υπονομευθεί από περιβάλλοντα αυξημένων παρεμβολών και την πολυπλοκότητα του δικτύου	Υψηλή, λόγω της αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα και την απλή δομή του δικτύου
Ασφάλεια	Εξαρτάται από το δίκτυο: την κρυπτογράφηση, τους ελέγχους και τις πολιτικές ασφαλείας που ακολουθούνται	
Κόστος	Ελάχιστο, λόγω της απουσίας επένδυσης για απόκτηση άδειας και το τυπικά μικρό κόστος των συσκευών που αναπτύσσονται για αυτό το φάσμα	Αυξημένο, λόγω του ακριβού εξοπλισμού και της αγοράς της άδειας, η οποία απαιτεί και ανανέωση ανά τακτά χρονικά διαστήματα

3.3. Σύγκριση συχνοτήτων

Όσο πιο μικρή η συχνότητα ενός σήματος, τόσο πιο μικρή κεραία απαιτείται για να το περισυλλέξει. Αντίστοιχα, όσο πιο μεγάλη η συχνότητα τόσο πιο μικρό το μήκος κύματος και αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη διείσδυση σε εμπόδια όπως οι τοίχοι (χωρίς να σημαίνει ότι μόνο αυτές οι συχνότητες μπορούν να διεισδύσουν). Παρακάτω, επισημαίνονται οι πιο σημαντικές ISM ζώνες συχνοτήτων καθώς και μερικά χαρακτηριστικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

3.3.1. Ζώνη 900 MHz

Η ISM ζώνη των 900MHz είναι πολύ στενή και αυτό περιορίζει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων. Τυπικές εφαρμογές όπως το SCADA και το RFID χρησιμοποιούν αυτή τη ζώνη, καθώς οι απαιτήσεις για ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στα 2,4 GHz. Πολλές φορές ο τύπος των πακέτων δεδομένων που αποστέλλεται σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι απλές on/off εντολές. Η συχνότητα των 900 MHz είναι καλύτερη από αυτή των 2,4 GHz σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν εμπόδια όπως δέντρα στο οπτικό πεδίο. Η συχνότητα των 2,4 GHz απορροφάται από το νερό που υπάρχει στα δέντρα και τα φύλλα τους, που προκαλεί απώλεια πακέτων δεδομένων. Τα 900 MHz συνήθως χρησιμοποιούνται για NLOS (Non-Line-Of-Sight) εφαρμογές.

Η μετάδοση σε αυτή τη συχνότητα δεν παρενοχλείται από εμπόδια όπως ανθρώπινα σώματα, όπως συμβαίνει στα 2,4 GHz. Επίσης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εμβέλεια, λόγω της έλλειψης παρεμβολών από τα Wi-Fi και Bluetooth δίκτυα, που υπάρχουν σε αφθονία στα αστικά δίκτυα ^{[40] [41]}.

3.3.2. Ζώνη 2,4 GHz

Για τους οικιακούς χρήστες και τις επιχειρήσεις, η 2,4 GHz ζώνη είναι κυρίαρχη για εφαρμογές όπως το Wi-Fi και το Bluetooth. Επικοινωνία φωνής, βίντεο και δεδομένων τυπικά χρησιμοποιούν συστήματα 2,4GHz, καθώς απαιτούν μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης (300Mbps+). Η συχνότητα αυτή είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι υπερφορτωμένη. Όταν αυτή η υπερφόρτωση συμβαίνει, ένα δίκτυο Wi-Fi μπορεί να αποδυναμωθεί ή να μη λειτουργεί ^[42].

3.3.3. Ζώνη 5 GHz

Η συχνότητα αυτή συνήθως χρησιμοποιείται για εμπορικές εφαρμογές του Wi-Fi. Πολλές φορές χρησιμοποιείται ως οπισθόζευξη που συνδέει δύο συστήματα 2,4GHz που απέχουν σχετικά μεταξύ τους. Η σύνδεση αυτή παρέχει ταχύτητα μετάδοσης μέχρι και 1,3Gbps. Η ζώνη των 5 GHz είναι η λιγότερο χρησιμοποιούμενη από τις τρεις μεγάλες ζώνες ISM. Το γεγονός αυτό τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργήσει ενδιαφέρον στην αξιοποίησή της, ακριβώς λόγω της υποχρησιμοποίησής της, που καθιστά τα ζητήματα θωράκισης και μορφοποίησης των μηνυμάτων πολύ απλούστερα ^[43].

3.4. Κατηγορίες πρωτόκολλων ασύρματης επικοινωνίας

3.4.1. Μικρής Εμβέλειας Ασύρματες Λύσεις (Short-Range Wireless Solutions) – Unlicensed

3.4.1.1. Wi-Fi



Εικόνα 3 – Το λογότυπο του Wi-Fi

Wi-Fi

- Συχνότητες: Ζώνη των 2,4 GHz και 5 GHz
- Εμβέλεια: Περίπου 50 μέτρα
- Ταχύτητα μετάδοσης: 600 Mbps μέγιστη. 150-200 Mbps είναι πιο τυπική, ανάλογα με τη συχνότητα καναλιού και τον αριθμό των κεραιών

Wi-Fi HaLow

- Συχνότητες: 902-928 MHz US, 863-868 MHz στην Ευρώπη, 917,5-923,5 MHz στην Κορέα, 755-787 MHz στην Κίνα, 916,5-927,5 MHz στην Ιαπωνία
- Εμβέλεια: 1 χιλιόμετρο
- Ταχύτητα μετάδοσης: 100 Kbps – 40 Mbps

Το Wi-Fi είναι τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης υπολογιστών τοπικής εμβέλειας, που επιτρέπει στις ηλεκτρονικές συσκευές να δικτυωθούν, χρησιμοποιώντας κυρίως 2,4 GHz ζώνης UHF (Ultra High Frequency) ή 5 GHz ζώνης SHF (Super High Frequency) ISM bands. Το Wi-Fi παρέχει μεγαλύτερη απόσταση κάλυψης και υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με πρωτόκολλα, όπως το Bluetooth και το ZigBee, σε

βάρος της υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας. Οι κόμβοι αισθητήρων που είναι εξοπλισμένοι με Wi-Fi, πρέπει να επαναφορτίζονται πολύ συχνά και συνεπώς δεν είναι κατάλληλο για πολύ χαμηλής ισχύος και αυτόνομες εφαρμογές. Εκτός της σαφώς ευρείας υφιστάμενης υποδομής του, προσφέρει γρήγορη μεταφορά δεδομένων και την ικανότητα χειρισμού μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων ^[44].

Η τεχνολογία Wi-Fi HaLow είναι κατάλληλη για μικρής εμβέλειας και χαμηλής ισχύος συσκευές IoT, βασίζεται στο IEEE 802.11ah και λειτουργεί σε ζώνη συχνοτήτων μικρότερη από 1 GHz (900 MHz). Σε σύγκριση με το πρότυπο IEEE 802.11ac, εισήχθησαν πολλά νέα χαρακτηριστικά για την επίτευξη εμβέλειας 1 Km σε υπαίθρια περιβάλλοντα και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων άνω των 100 Kbps. Το φυσικό επίπεδο υιοθετεί OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) τεχνική που μεταδίδει με ρυθμό 10 φορές πιο αργό από το πρότυπο IEEE 802.11ac, έτσι ώστε να επεκτείνει το εύρος επικοινωνίας. Οι τελικές συσκευές λειτουργούν με μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας κατά τη διάρκεια των αδρανών περιόδων, διατηρώντας όμως τη σύνδεση και το συγχρονισμό τους με τα σημεία πρόσβασης. Αντίθετα με άλλες εκδόσεις του Wi-Fi, το HaLow σκοπεύει στην ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας με μείωση της ταχύτητας δεδομένων, όντας ειδικά σχεδιασμένο για εφαρμογές IoT. Είναι ένα πολλά υποσχόμενο πρωτόκολλο, ειδικά εφόσον βασίζεται σε ένα τόσο κυρίαρχο ασύρματης επικοινωνίας όπως το Wi-Fi, όμως δεν υπάρχουν ακόμα επαρκή δείγματα χρήσης του καθώς και πληροφορίες για το είδος των εφαρμογών για τις οποίες είναι πιο κατάλληλο καθώς είναι ακόμα υπό ανάπτυξη ^[45].

3.4.1.2. Bluetooth



Εικόνα 4 – Το λογότυπο του Bluetooth

- Συχνότητες: 2,4 GHz
- Εμβέλεια: > 100 m (Smart/BLE)
- Ταχύτητα μετάδοσης: 1-2 Mbps (Smart/BLE)

Το Bluetooth είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας που παρουσιάζει μέτριο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων για εφαρμογές μικρής εμβέλειας με κύριο χαρακτηριστικό τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το Bluetooth Low Energy και το Bluetooth είναι δύο τύποι πρωτοκόλλου, τα οποία παρέχουν συνδεσιμότητα IP, για να υποστηρίξουν εφαρμογές IoT. Το νέο Bluetooth Low-Energy (BLE) ή Bluetooth Smart είναι ένα σημαντικό πρωτόκολλο για εφαρμογές IoT, γιατί παρόλο που προσφέρει παρόμοια εμβέλεια με το Bluetooth, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχει σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Δεν είναι πραγματικά σχεδιασμένο για μεταφορά αρχείων, αλλά για μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων. Έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με πολλές ανταγωνιστικές τεχνολογίες: την εκτεταμένη ενσωμάτωσή του στα smartphones και σε πολλές άλλες κινητές συσκευές. Σύμφωνα με το Bluetooth SIG (Special Interest Group), περισσότερο από το 90% των smartphone, με δυνατότητα Bluetooth, συμπεριλαμβανομένων των iOS, των Android και των Windows, αναμενόταν να είναι Smart Ready μέχρι το 2018 ^[46].

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν λειτουργίες Bluetooth Smart, ενσωματώνουν την προδιαγραφή Bluetooth Core Specification Version 4.0, που συνδυάζει βασικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και κατανάλωση χαμηλής ενέργειας για έναν πομποδέκτη RF. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η έκδοση, μέσω του προφίλ υποστήριξης πρωτοκόλλων Internet θα επιτρέψει στους αισθητήρες Bluetooth Smart να έχουν πρόσβαση στο Internet, μέσω σύνδεσης 6LoWPAN ^[47].

3.4.1.3. Z-Wave



Εικόνα 5 – Το λογότυπο του Z-Wave

- Συχνότητες: > 1 GHz
- Εμβέλεια: 30 m
- Ταχύτητα μετάδοσης: >100 Kbps

Το Z-Wave είναι μια τεχνολογία επικοινωνιών RF χαμηλής ισχύος, που έχει σχεδιαστεί κυρίως για οικιακό αυτοματισμό, για προϊόντα όπως ελεγκτές φωτιστικών και αισθητήρες επειδή ενσωματώνεται εύκολα σε ηλεκτρονικές καταναλωτικές συσκευές και ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ισχύος (προσαρμόζεται καλύτερα για λειτουργία σε συσκευές με μπαταρία). Υποστηρίζεται από περισσότερους από 250 κατασκευαστές στη Z-Wave Alliance, τρέχει στη ζώνη sub-1 GHz ISM, 868 MHz (στην Ευρώπη) και 908 MHz (στην Αμερική) με εμβέλεια 30 μέτρων και έχει σχεδιαστεί για να παρέχει αξιόπιστες, με μικρή καθυστέρηση, μεταδόσεις μικρών πακέτων δεδομένων, με ταχύτητες μετάδοσης έως και 100 Kbps. Η χαμηλή συχνότητα λειτουργίας του Z-Wave το κάνει ιδανικό για smart home εφαρμογές, καθώς αυξάνει σημαντικά την εμβέλειά του ^[48].

Λειτουργεί στη sub-1 GHz υποζώνη και είναι αδιαπέραστη από παρεμβολές Wi-Fi και άλλων ασυρμάτων τεχνολογιών στην περιοχή των 2,4 GHz (όπως το Bluetooth ή το ZigBee) και αυτό αποτελεί ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά του. Υποστηρίζει δίκτυα πλέγματος, χωρίς την ανάγκη για έναν κόμβο συντονιστή και είναι εύκολα επεκτάσιμη, επιτρέποντας τον έλεγχο έως και 232 συσκευών. Το Z-Wave επιτρέπει μόνο 4 hops μεταξύ του controller και της επιθυμητής συσκευής, περιορίζοντας πέραν του μέγιστου αριθμού συσκευών που υποστηρίζει, το μέγεθος του δικτύου του, αν και γενικά κάθε κόμβος του έχει μεγαλύτερη εμβέλεια από τους αντίστοιχους του Zigbee ^[49]

Το Z-Wave χρησιμοποιεί ένα απλούστερο πρωτόκολλο, που επιτρέπει ταχύτερη και απλούστερη ανάπτυξη, αλλά καθώς μοναδικός κατασκευαστής chip είναι η μια μόνο εταιρεία, η Sigma Designs, ενυπάρχει ο ρεαλιστικός κίνδυνος για vendor lock-in και αμφιβολίες για τη διαλειτουργικότητά του σε σύγκριση με άλλες ασύρματες τεχνολογίες (όπως το ZigBee) με πολλές πηγές διάθεσης των προϊόντων τους.

3.4.1.4. IEEE 802.15.4

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 χρησιμοποιείται σε συσκευές με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και διάρκεια ζωής της μπαταρίας από μερικούς μήνες έως μερικά χρόνια. Λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων για κόμβους αισθητήρων (δεκαέξι κανάλια στη ζώνη ISM 2,4 GHz, δέκα κανάλια στα 915 MHz και ένα κανάλι στα 868 MHz). Το IEEE 802.15.4 ορίζει τις απαιτήσεις του φυσικού (physical) και του MAC επιπέδου για τυποποιημένες συμβατές συσκευές. Αυτό το πρότυπο αποτελεί τη βάση για το ZigBee, το Thread και άλλα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Ο κύριος στόχος εφαρμογής για αυτό το πρότυπο είναι για ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Area Networks, WPAN) χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Πολλοί κόμβοι αισθητήρων IEEE 802.15.4 βασίζονται κυρίως στο ZigBee ^[50].

3.4.1.5. Zigbee



Εικόνα 6 – Το λογότυπο του Zigbee

- Συχνότητες: ISM 2,4 GHz, 915 MHz 868 MHz και 784 MHz
- Εμβέλεια: 10-100m
- Ταχύτητα μετάδοσης: 20 Kbps (868 MHz), 250 Kbps (2,4 GHz)

Το ZigBee είναι μια προδιαγραφή, που βασίζεται στο IEEE 802.15.4, τρέχει κυρίως στα 2,4 GHz και επιπλέον στα 868 MHz στην Ευρώπη και 915 MHz στην Αμερική και Αυστραλία και 784 MHz στην Κίνα, έχοντας ένα καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης 250 Kbps στα 2,4 GHz (κατάλληλο για διακοπτόμενες μεταδόσεις δεδομένων από αισθητήρα ή συσκευή εισόδου). Η τεχνολογία που ορίζεται από την προδιαγραφή ZigBee είναι απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή από άλλα WPAN. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του ZigBee περιορίζει τις αποστάσεις μετάδοσης από 10 έως 100 μέτρα (οπτική επαφή – line of sight), ανάλογα με την ισχύ εξόδου και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και ασφάλεια δικτύου (τα δίκτυα ZigBee είναι ασφαλισμένα με συμμετρικά κλειδιά κρυπτογράφησης μήκους 128 bit). Το Zigbee IP είναι βασισμένο στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4, αλλά σε αντίθεση με τον κύριο ανταγωνιστή του, το 6LoWPAN, το Zigbee δε μπορεί να επικοινωνήσει με ευκολία με άλλα πρωτόκολλα. Η ενεργειακή του αποδοτικότητα έχει ξεπεραστεί από πρωτόκολλα όπως του BLE και πολλά πρωτόκολλα πια διαθέτουν την τοπολογία mesh, η οποία το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές όπως αυτή του οδο φωτισμού. Η διαθεσιμότητα των φθηνών και αξιόπιστων συσκευών Zigbee έχουν διατηρήσει υψηλή τη δημοτικότητά του, αλλά η φτωχή του διαλειτουργικότητα κάνει δύσκολη την εξέλιξή του σε τομείς όπου η συνεργία πολλών πρωτόκολλων είναι επιθυμητή ^{[51] [52]}.

Ένα ζήτημα του Zigbee είναι αυτό της διαλειτουργικότητας. Η αιτία αυτού του ζητήματος είναι η σύγχυση που προκαλεί το πρόγραμμα πιστοποίησής του. Υπάρχουν δύο επίπεδα πιστοποίησης, ένα για λογισμικό και ένα για υλικό εξοπλισμό. Είναι πιθανό ένα προϊόν να πιστοποιηθεί ως hardware άλλα όχι και το λογισμικό του. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι προϊόντα που μεταδίδουν το σήμα του Zigbee, που δεν χρησιμοποιούν το κατάλληλο Zigbee λογισμικό, τα οποία όμως μπορεί να έχουν σημειωθεί ως “Zigbee-ready”. Δεν έχουν εντοπιστεί πολλά προβλήματα τέτοιου είδους και τα προϊόντα Zigbee δίνουν γενικά έμφαση στη διαλειτουργικότητα. Η διαδικασία πιστοποίησης όμως παραμένει περίπλοκη.

Συσκευές εντός ενός Zigbee δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τερματικές συσκευές (end devices), δρομολογητές (router) ή συντονιστές (coordinators). Η mesh τοπολογία χρησιμοποιείται όταν η απόσταση μεταξύ δύο σημείων είναι μεγαλύτερη από την εμβέλεια των δύο ραδιοπομπών/ραδιοδεκτών που βρίσκονται στα σημεία αυτά. Με την ύπαρξη ενδιάμεσων πομπών/δεκτών ανάμεσα στα δύο σημεία, τα μηνύματα μπορούν να διαβιβαστούν μέσω αυτών στα επιθυμητά σημεία. Το Zigbee δημιουργεί αυτόματα δίκτυο μέσω των συσκευών του χωρίς την παρέμβαση των χρηστών. Το πρωτόκολλο θα λάβει υπόψιν του τις προηγούμενες προσπάθειες διασύνδεσης δύο σημείων του δικτύου, τις αναγνωρίσεις και data message routing. Το Zigbee έχει την ικανότητα να αυτοθεραπεύει το δίκτυο δημιουργώντας - εφόσον είναι αναγκαίο - νέες διαδρομές ^[53].

Σε σύγκριση με το παρόμοιο Z-Wave, το Zigbee μπορεί να υποστηρίξει πάνω από 650.00 συσκευές στο mesh δίκτυό του, έναντι των 232 συσκευών του Z-Wave, που αν και υπεραρκετές για εφαρμογές smart-home, αποτελεί τροχοπέδη για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπως ο εξωτερικός έξυπνος φωτισμός σε μεγάλη κλίμακα. Το ZigBee έχει μια μεγάλη εγκαταστημένη βάση λειτουργίας, παραδοσιακά περισσότερο σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Ακόμη, έχει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα σε πολύπλοκα συστήματα: Προσφέρει λειτουργία

χαμηλής ισχύος, υψηλή ασφάλεια, ευστάθεια, υψηλή επεκτασιμότητα με υψηλό αριθμό κόμβων και είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί ασύρματα δίκτυα ελέγχου και αισθητήρων σε εφαρμογές M2M και IoT. Η τελευταία έκδοση, το ZigBee 3.0, είναι ουσιαστικά η ενοποίηση των διάφορων ασυρμάτων προτύπων ZigBee σε ένα ενιαίο πρότυπο [49].

3.4.1.6. 6LoWPAN



Εικόνα 7 – Το λογότυπο του LoWPAN

- Συχνότητες: υιοθετημένο και χρησιμοποιήσιμο σε ποικιλία άλλων δικτύων διασύνδεσης όπως το Bluetooth Smart (2,4 GHz), το ZigBee και δίκτυα ραδιοσυχνότητας χαμηλής ισχύος (sub-1 GHz)
- Εμβέλεια: άγνωστη
- Ταχύτητα μετάδοσης: άγνωστη

Μια βασική τεχνολογία, που στηρίζεται στο πρωτόκολλο IP (Internet Protocol), είναι το 6LoWPAN (IPv6 Low-power Wireless Personal Area Network - ασύρματο δίκτυο προσωπικής περιοχής IPv6 χαμηλής ισχύος). Το πρότυπο, έχοντας την ελευθερία της ζώνης συχνοτήτων και του φυσικού επιπέδου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλαπλές πλατφόρμες επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των Ethernet, Wi-Fi, 802.15.4 και ISM sub-1GHz. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του είναι η χρήση του IPv6 (πρωτόκολλο Internet έκδοση 6), μιας πολύ σημαντικής τομής για να εδραιωθεί η χρήση του IoT. Το IPv6 είναι ο διάδοχος του IPv4 και προσφέρει 2^{128} διευθύνσεις, επιτρέποντας σε οποιοδήποτε ενσωματωμένο αντικείμενο ή συσκευή στον κόσμο να έχει τη δική του μοναδική διεύθυνση IP και να συνδεθεί στο Internet. Το IPv6 παρέχει ένα βασικό μηχανισμό μεταφοράς, για την παραγωγή πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου και την επικοινωνία συσκευών με οικονομικό τρόπο, μέσω ασυρμάτου δικτύου χαμηλής ισχύος (low-power wireless network) [49].

Είναι σχεδιασμένο για να στέλνει IPv6 πακέτα, μέσω δικτύων, που βασίζονται σε IEEE 802.15.4, προσφέρει end-to-end διευθυνσιοδοτούμενους κόμβους, επιτρέποντας σε ένα δρομολογητή να συνδέει το δίκτυο με IP. Το 6LoWPAN είναι ένα δίκτυο πλέγματος ισχυρό, κλιμακωτό και αυτοθεραπεύσιμο (self-healing). Οι συσκευές δρομολογητή πλέγματος (mesh) μπορούν να δρομολογήσουν δεδομένα προοριζόμενα για άλλες συσκευές, ενώ οι εξυπηρετητές (hosts) μπορούν να παραμένουν ανενεργοί για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Το 6LoWPAN προτείνει μια προσαρμογή επιπέδου (layer) μεταξύ του MAC και του επιπέδου δικτύου (IPv6), προκειμένου να χειριστεί τη διαλειτουργικότητα μεταξύ IEEE 802.15.4 και IPv6. Η πιο ανταγωνιστική εναλλακτική λύση για το 6LoWPAN είναι το ZigBee. Και οι δύο χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 στο φυσικό επίπεδο, αν και το Zigbee αποτελεί πιο ώριμη τεχνολογία και είναι πιο διαδεδομένο. Δεδομένης της εξάρτησης του 6LoWPAN από την εξέλιξη του IPv6, αν και είναι εν δυνάμει το δίκτυο του μέλλοντος, λόγω της ευκολίας χρήσης του IPv6 από τις συσκευές που συνδέονται σε αυτό, δεν είναι όμως το δίκτυο του παρόντος, κυρίως λόγω της εξαιρετικά μικρής δημοφιλίας του [54].

3.4.1.7. Thread



Εικόνα 8 – Το λογότυπο του Thread

- Συχνότητες: 2,4 GHz (ISM)
- Εμβέλεια: άγνωστη
- Ταχύτητα μετάδοσης: άγνωστη

Το Thread είναι ένα νέο πρωτόκολλο δικτύωσης IPv6 βασισμένο σε IP, που στοχεύει στο περιβάλλον αυτοματισμού στο σπίτι βασισμένο στο 6LoWPAN στο network layers για να δίνει σε κάθε συσκευή του ξεχωριστή διεύθυνση IPv6. Αυτό κάνει πολύ εύκολη τη γεφύρωση δικτύων Thread με το διαδίκτυο και απλοποιεί πολύ τις υπηρεσίες cloud. Ωστόσο, από την άποψη εφαρμογής, σχεδιάζεται πρωτίστως ως συμπλήρωμα του Wi-Fi, καθώς αναγνωρίζει ότι, ενώ το Wi-Fi είναι καλό για πολλές καταναλωτικές συσκευές, έχει περιορισμούς για χρήση σε μια εγκατάσταση αυτοματισμού στο σπίτι.

Ξεκίνησε στα μέσα του 2014 από την ομάδα Thread, και είναι ανοικτό πρωτόκολλο και βασίζεται σε διάφορα πρότυπα, όπως το IEEE 802.15.4 (ως πρωτόκολλο ασύρματης διασύνδεσης), το IPv6 και το 6LoWPAN. Εξαιτίας αυτού, διάφορα προϊόντα που είναι ήδη διαθέσιμα στην αγορά και πολλές ραδιοσυσκευές Zigbee μπορούν να αναβαθμιστούν για να υποστηρίξουν το Thread. Το Zigbee Cluster Library (ZLC) έχει ανακοινώσει τη συμβατότητά του με το νέο πρωτόκολλο, που σημαίνει ότι συσκευές σχεδιασμένες για το ZLC υποστηρίζουν δίκτυα Thread. Το Thread υποστηρίζει ένα δίκτυο πλέγματος χρησιμοποιώντας πομποδέκτες IEEE 802.15.4 και είναι σε θέση να διαχειριστεί μέχρι 250 κόμβους, με υψηλά επίπεδα ελέγχου ταυτότητας (authentication) και κρυπτογράφησης (encryption). Μια σχετικά απλή αναβάθμιση λογισμικού θα πρέπει να επιτρέπει στους χρήστες να τρέχουν thread σε υπάρχουσες συσκευές με δυνατότητα IEEE 802.15.4 ^[55].

3.4.1.8. Near Field Communications (NFC)

- Συχνότητα: 13,56 MHz (ISM)
- Εμβέλεια: 10 cm
- Ταχύτητα μετάδοσης: 100–424 Kbps

Το NFC (Near Field Communication) είναι μια τεχνολογία, που επιτρέπει απλές και ασφαλείς αμίδρομες αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών (ιδιαίτερα για smartphones), επιτρέποντας στους καταναλωτές να πραγματοποιούν συναλλαγές, χωρίς επαφή, να έχουν πρόσβαση σε ψηφιακό περιεχόμενο και να συνδέουν ηλεκτρονικές συσκευές. Το πρωτόκολλο NFC λειτουργεί σε ζώνη συχνοτήτων 13,56 MHz, βασίζεται σε RFID (βλ. 3.4.1.9.) τεχνολογία και υποστηρίζει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέχρι και 424 Kbps. Η εμβέλεια για την επικοινωνία NFC είναι περίπου 10 εκατοστά. Αυτή η τεχνολογία είναι βασισμένη στο πρωτόκολλο διασύνδεσης ISO 18000-3 και παρέχει μόνο ένα δίκτυο point-to-point. Αναφέρεται για λόγους ιστορικής αναδρομής και είναι προφανές ότι μια τέτοια τεχνολογία δε μπορεί να έχει εφαρμογή στο IoT λόγω της εξαιρετικά μικρής εμβέλειάς της ^[56].

3.4.1.9. Radio Frequency Identification (RFID)



Εικόνα 9 – Το λογότυπο του RFID

Η πρωτοποριακή τεχνολογία, που έχει εφαρμοστεί για την αναγνώριση αντικειμένων στο IoT, χρησιμοποιεί την τεχνολογία αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Identification, RFID). Στην τεχνολογία RFID EPC-GEN2, μια σύνδεση τύπου μηχανή προς μηχανή (M2M), υλοποιείται μεταξύ μιας ετικέτας και ενός αναγνώστη, όπου ο αναγνώστης RFID στέλνει ένα σήμα στην ετικέτα και λαμβάνει ανακλώμενο σήμα από αυτήν (τυπικά μια παθητική ετικέτα), το οποίο με τη σειρά του διαβιβάζεται στη βάση δεδομένων. Η βάση δεδομένων συνδέεται με κέντρο επεξεργασίας και εντοπίζει αντικείμενα, με βάση τα ανακλώμενα σήματα. Οι RFID ετικέτες μπορούν να εξοπλιστούν με μπαταρία (ενεργές ετικέτες) ή εφαρμόζονται με βάση παθητικά κυκλώματα (παθητικές ετικέτες) ή με ένα συνδυασμό των δύο (ημι-ενεργές / παθητικές). Γενικά, οι ενεργές ετικέτες RFID πρέπει να καταναλώνουν πολύ χαμηλές τιμές ενέργειας, ώστε να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία από έναν υποδοχέα (scavenger), ο οποίος μετατρέπει έναν τύπο περιβαλλοντικής ενέργειας, π.χ. σήμα RF σε συνεχές ρεύμα DC. Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό στο σχεδιασμό ετικετών RFID είναι το κόστος εφαρμογής. Για τις περισσότερες από τις εφαρμογές αναγνώρισης σε IoT, για παράδειγμα για την αναγνώριση αντικειμένων σε μια αποθήκη, η ετικέτα πρέπει να είναι πολύ οικονομική και εύκολη στην τοποθέτηση. Ευτυχώς, η χρήση τεχνολογίας CMOS¹ επέτρεψε την εφαρμογή ετικετών RFID χαμηλού κόστους, ωστόσο η τιμή είναι πολύ υψηλότερη σε σύγκριση με τις τεχνικές ταυτοποίησης, που βασίζονται στο γραμμωτό κώδικα. Ένα σύστημα RFID μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Για τη ζώνη χαμηλών συχνοτήτων (LF) λειτουργεί στα 125 – 134,2 kHz, για τη ζώνη υψηλών συχνοτήτων (HF) λειτουργεί στα 13,56 MHz. Για τις ζώνες Ultra High Frequency (UHF), όπου ορίζεται το πρωτόκολλο EPC-GEN2, λειτουργεί σε 850 – 960 MHz. Εγκυκλοπαιδική γνώση πιο πολύ, δεν έχει άμεση εφαρμογή από μόνη της ως τεχνολογία στο χώρο του φωτισμού, αν και κάποιες από αυτές την ενσωματώνουν σε διάφορα σημεία ^{[57] [58]}.

3.4.2. Μεγάλης Εμβέλειας Ασύρματες Λύσεις (Long-Range Wireless Solutions) – Cellular – Licensed

LPWAN

Ο όρος LPWAN αποτελείται από δύο μέρη: τη χαμηλή ισχύ (Low Power, LP) που σημαίνει ότι το δίκτυο αυτό μπορεί να εξυπηρετήσει συσκευές που λειτουργούν με μικρές, φθηνές μπαταρίες για αρκετά χρόνια και το δίκτυο ευρείας περιοχής (Wide Area Network, WAN) υποδεικνύει ότι η λύση συνδεσιμότητας μπορεί να παρέχει μεγάλη εμβέλεια λειτουργίας. Το LPWAN δεν είναι πρότυπο συνδεσιμότητας, αλλά ένας όρος «ομπρέλα», που περιλαμβάνει διάφορες υλοποιήσεις και πρωτόκολλα, που μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας.

3.4.2.1. Κυψελοειδή LPWAN – Cellular LPWAN (αδειοδοτημένο φάσμα)

Η κυψελοειδής τεχνολογία παρέχει λύσεις IoT (C-IoT), που απαιτούν μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις, σε συνδυασμό με χαμηλή καθυστέρηση. Η κυψελοειδής τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να αποστέλλει μεγάλες ποσότητες δεδομένων, ειδικά για πρότυπα όπως το 4G, όμως το κόστος εξοπλισμού, τα έξοδα συντήρησης, το μηνιαίο κόστος για φόρους και η κατανάλωση ισχύος των παλαιότερων εκδόσεων LTE είναι υπερβολικά υψηλά για πολλές εφαρμογές IoT. Τα κυψελοειδή πρότυπα στις πιο πρόσφατες κυκλοφορίες, ειδικά

οι LTE Cat-0, M1 (LTE-M), NB1 (NB-IoT), μπορούν να προσφέρουν την ασύρματη τεχνολογία χαμηλής ισχύος, χαμηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, που απαιτείται από πολλές σύγχρονες εφαρμογές IoT. Επιπλέον, οι χαμηλότερες τιμές χρέωσης των φορέων εκμετάλλευσης αποτελούν πλεονέκτημα έναντι των κανονικών κυψελοειδών προτύπων.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι το κόστος συνδεσιμότητας μερικές φορές αξιολογείται, σε σχέση με το συνολικό κόστος μιας εγκατάστασης, γεγονός που εξηγεί γιατί ορισμένες εταιρείες επιλέγουν να συνδέσουν ένα ακριβό μηχάνημα μέσω κυψελοειδούς προτύπου, καθώς η πιθανή εξοικονόμηση κόστους από τη μετάβαση σε ένα φθηνότερο πρότυπο συνδεσιμότητας είναι ελάχιστη, σε σχέση με το συνολικό κόστος του μηχανήματος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι για την εφαρμογή του νέου προτύπου, οι φορείς κυψελοειδούς τηλεφωνίας πρέπει να αναβαθμίσουν μόνο το λογισμικό δικτύου τους, χωρίς να εγκαταστήσουν νέες κεραίες, μια εξοικονόμηση κόστους που μπορεί να μεταφερθεί στους πελάτες τους. Τυπικά πεδία εφαρμογών IoT για λύσεις κυψελοειδούς σύνδεσης είναι οι έξυπνοι μετρητές και τα τερματικά σημεία λιανικής πώλησης, καθώς οι εφαρμογές αυτές βασίζονται στη χαμηλή καθυστέρηση και βρίσκονται σε περιοχές, που καλύπτονται από τις περισσότερες κυψελοειδείς εταιρείες. Ένα παράδειγμα είναι η Trilliant, μια εταιρεία που εστιάζει στην έξυπνη ενέργεια και παρέχει πολλά συστήματα έξυπνης μέτρησης, που χρησιμοποιούν πρότυπα κυψελοειδούς σύνδεσης. Στην «καθαρόαιμη» μορφή τους, τα κυψελοειδή LPWAN δε χρησιμοποιούνται στο φωτισμό, αλλά και άλλες εφαρμογές IoT, λόγω του μεγάλου κόστους και της κατανάλωσης ισχύος, που είναι ακατάλληλη σε εφαρμογές εξαρτώμενες από μικρές μπαταρίες ^{[59] [60]}.

3.4.2.2. EC-GSM-IoT



Εικόνα 10 – Το λογότυπο του GSM

Το EC-GSM-IoT (Extended Coverage Global System for Mobile communication IoT) είναι μια από τις τρεις λύσεις, μαζί με τα NB-IoT και eMTC, που διαμορφώνουν το Cellular-IoT (C-IoT) του 3GPP και επεκτείνει το πρότυπο GSM σε EC-GSM. Αποσκοπεί στην επέκταση της κάλυψης GSM κατά + 20 dB χρησιμοποιώντας τις ζώνες sub-GHz για καλύτερη διείσδυση του σήματος σε εσωτερικούς χώρους και στην υποστήριξη μέχρι και 50 χιλιάδων συσκευών ανά σταθμό βάσης. Το EC-GSM εκμεταλλεύεται τεχνικές επαναληπτικής μετάδοσης και επεξεργασίας σήματος για τη βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας του παλαιού GPRS δικτύου. Δύο τεχνικές διαμόρφωσης, η Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) και η 8-Phase Shift Keying (8PSK), παρέχουν μεταβαλλόμενες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων με ρυθμό αιχμής (peak rate) τα 240 Kbps (με την 8PSK τεχνική).

Έχει σχεδιαστεί ως κυψελοειδές σύστημα μεγάλης χωρητικότητας, μεγάλης εμβέλειας, χαμηλής ενεργειακής απαίτησης και χαμηλής πολυπλοκότητας για την υποστήριξη του IoT. Το EC-GSM-IoT μπορεί να αναπτυχθεί, μέσω αναβάθμισης λογισμικού, σε υπάρχοντα δίκτυα GSM, εξασφαλίζοντας έτσι ευρεία κάλυψη. Οι συσκευές, που είναι συνδεδεμένες με το EC-GSM-IoT, μπορούν να έχουν διάρκεια ζωής μπαταρίας έως και 10 χρόνια, σε περιπτώσεις ευρείας χρήσης.

Επιπλέον, οι ήδη εγκατεστημένες μονάδες GSM δε θα επηρεαστούν δυσμενώς με την εγκατάσταση συσκευών EC-GSM, καθώς η κυκλοφορία από παλαιότερες συσκευές GSM και συσκευές EC-GSM-IoT μπορεί να συνυπάρξει (μέσω πολυπλεξίας) στα ίδια φυσικά κανάλια. Το EC-GSM-IoT χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 200 kHz ανά κανάλι, για συνολικό εύρος ζώνης 2,4 MHz.

Οι δοκιμές δικτύου EC-GSM-IoT βρίσκονται σε εξέλιξη και οι πρώτες εμπορικές εκκινήσεις είχαν προγραμματιστεί για το 2018. Η Orange, για παράδειγμα, ετοιμάζει το EC-GSM-IoT για να συνδέσει αισθητήρες μέτρησης περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία (η οποία μπορεί να επικαλυφθεί πάνω από δίκτυα 2G), για να υποστηρίξει λύσεις έξυπνης γεωργίας στις αναδυόμενες αγορές.

Τα δίκτυα EC-GSM-IoT, υποστηριζόμενα από τους περισσότερους κατασκευαστές κινητών εξοπλισμών, chipsets και modules, θα συνυπάρχουν με τα συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα. Επίσης, θα επωφεληθούν από όλα τα χαρακτηριστικά ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπως η υποστήριξη της εμπιστευτικότητας της ταυτότητας των χρηστών (user identity confidentiality), η πιστοποίηση της ταυτότητας του αποστολέα (entity authentication), η ακεραιότητα των δεδομένων (data integrity) και η αναγνώριση του κινητού εξοπλισμού (mobile equipment identification). Το δίκτυα EC-GSM-IoT αποτελούν μια ελκυστική μελλοντική προοπτική, ωστόσο στο τρέχον περιβάλλον είναι δυσεύρετα και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί με αποτελεσματικότητα σε εφαρμογές φωτισμού ^{[61][62]}.

3.4.2.3. NB-IoT

- Εύρος ζώνης: 180kHz
- Χρονική υστέρηση: <10 seconds
- Ταχύτητα λήψης: 50kbps / Ταχύτητα αποστολής: 70kbps

Τυποποιημένο από το 3GPP, το Narrowband IoT (NB-IoT) είναι μια τεχνολογία LPWA (Low Power Wide Area) που μπορεί να επιτρέψει τη λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα νέων συσκευών και υπηρεσιών IoT. Το NB IoT λειτουργεί σε μια υποκατηγορία των περιπτώσεων όπου το LTE-M εφαρμόζεται. Το NB-IoT ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ισχύος των συνδεδεμένων συσκευών, ενώ παράλληλα αυξάνει την ικανότητα του συστήματος και τη φασματική απόδοση, ειδικά σε χώρους που δεν μπορούν εύκολα να καλυφθούν από συμβατικές κυψελοειδείς τεχνολογίες. Σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης, οι συνδεδεμένες συσκευές NB-IoT μπορούν να έχουν διάρκεια μπαταρίας μεγαλύτερη των 10 ετών (μέχρι 10 χρόνια ζωή μπαταρίας με το ισοδύναμο 2 AA μπαταριών) (Mostly on Power Save Mode ~10uA). Σαρώνει το δίκτυο, η συσκευή και το δίκτυο σώζουν τα δεδομένα αυτά και δεν το ξανακάνει, εκτός αν αναγκαστεί να σαρώσει το δίκτυο ξανά. Συνεπώς είναι κυρίως σχεδιασμένο για στάσιμες εφαρμογές. Η μετάβαση από την κατάσταση εκπομπής δεδομένων στην κατάσταση αναμονής, που είναι η κατάσταση όπου σχεδόν δεν καταναλώνεται ενέργεια γίνεται πολύ γρήγορα, που βοηθάει στη συνολική χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Το NB-IoT χρησιμοποιεί ένα νέο φυσικό επίπεδο, για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις εκτεταμένης κάλυψης σε αγροτικές περιοχές και σε βαθιά εσωτερικούς χώρους, επιτρέποντας παράλληλα τη χρήση συσκευών μικρής πολυπλοκότητας. Η υποκείμενη τεχνολογία είναι πολύ απλούστερη από αυτήν των μονάδων GSM / GPRS και το κόστος των μονάδων NB-IoT είναι πιθανό να μειωθεί ραγδαία, όσο αυξάνεται η ζήτηση. Το NB-IoT μπορεί να συνυπάρχει με δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G, 3G και 4G. Επίσης, επωφελείται από όλες τις λειτουργίες ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Πολλοί διαφορετικοί φορείς θα παρέχουν υπηρεσίες NB-IoT στην Ασία, τη Μέση Ανατολή, τη Λατινική Αμερική και την Ευρώπη, με τις εμπορικές εκκινήσεις να βρίσκονται σε εξέλιξη. Η China Mobile, η China Telecom, η China Unicom, η Deutsche Telekom, η Etisalat, η KT, η NOS, η TDC, η Telefónica, η Telia και η Vodafone συγκαταλέγονται μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης NB-IoT, έχοντας δοκιμάσει την τεχνολογία σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης, όπως η έξυπνη μέτρηση, ο έξυπνος χώρος στάθμευσης και η έξυπνη γεωργία, τα οποία απαιτούν μεγάλο αριθμό συσκευών χαμηλού κόστους και οικονομικής συντήρησης.

Η Deutsche Telekom έγινε ο πρώτος φορέας εκμετάλλευσης δικτύου, που εισήγαγε το NB-IoT στη Γερμανία, όπου επί του παρόντος διατίθενται υπηρεσίες σε υπαρκτά δίκτυα. Στις Κάτω Χώρες, το πρώτο παγκόσμιο δίκτυο NB-IoT, με κάλυψη σε όλη τη χώρα, έχει ήδη επιτευχθεί το Μάιο του 2017. Η έναρξη λειτουργίας του NB-IoT ξεκίνησε επίσης σε αρκετές άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Στις ΗΠΑ, η T-Mobile ανακοίνωσε ότι θα ξεκινήσει το

πρώτο εμπορικό δίκτυο NB-IoT της ηπείρου στο Λας Βέγκας και ότι σχεδιάζει να καθιερώσει κάλυψη σε όλη τη χώρα μέσα στο 2018.

Ουσιαστικά, το NB-IoT προέρχεται από το LTE, με πρόσθετες απλουστεύσεις, όπως μια τροποποιημένη διαδικασία αναζήτησης κυψελών, σε σχέση με το LTE, μειωμένες απαιτήσεις εύρους ζώνης (χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης 180 – 200 KHz, σε σύγκριση με το αντίστοιχο των 1,4 – 20 MHz που χρησιμοποιείται από το LTE) και ένα τροποποιημένο σύστημα τυχαίας πρόσβασης, με αποτέλεσμα τον πιο γρήγορο χρόνο υλοποίησης. Η ενισχυμένη όμως κάλυψη και η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας επιφέρουν καθυστερήσεις, χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και χαμηλότερη αποδοτικότητα φάσματος. Λόγω του μικρού του εύρους ζώνης, η πυκνότητα ισχύος του φάσματος μπορεί να ενισχυθεί κατά 6dB σε σχέση με το LTE. Με το NB-IoT, βασικά τμήματα ενός προϋπάρχοντος δικτύου LTE, μπορεί να αναβαθμιστούν για να το υποστηρίξουν με μια απλή ενημέρωση λογισμικού, η οποία γίνεται με μεγάλη ταχύτητα. Μια βάση NB-IoT μπορεί να υποστηρίξει πάνω από 100.000 συσκευές.

Με αύξηση της απόστασης από το κέντρο του δικτύου, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί μέχρι και να δεκαπλασιαστεί για συσκευές στην άκρη του δικτύου. (50K/Cell), 5\$ Modules

Το NB-IoT μπορεί να καταστρωθεί βάσει τριών τρόπων λειτουργίας:

- Standalone operation: τοποθετείται εντός ενός υπάρχοντος GSM φορέα. Έτσι, όλη η ισχύς μετάδοσης των σταθμών βάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το NB-IoT.
- In-band operation: τοποθετείται εντός κανονικού φορέα LTE. Η ισχύς μετάδοσης τότε μοιράζεται μεταξύ του LTE και του NB-IoT και κάποιοι πόροι είναι δεσμευμένοι για τη χρήση του LTE.
- Guard band operation: αχρησιμοποιήτα τμήματα εντός του φάσματος του LTE αξιοποιούνται και η κυψέλη του NB-IoT εξυπηρετείται από τους ίδιους σταθμούς βάσης, μοιραζόμενη με το LTE τη μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης. Τυπικά, με αυτή τη διαμόρφωση αναμένονται λιγότερες παρεμβολές μεταξύ του LTE και του NB-IoT.

Η ανάπτυξη του NB-IoT παρέχεται, μέσω μιας ενημέρωσης λογισμικού στις συσκευές που έχουν τη δυνατότητα αλλαγής λογισμικού. Αν και το NB-IoT είναι μια πολύ υποσχόμενη λύση στο χώρο του φωτισμού, δεν υπάρχουν αρκετά cast studies εφαρμογών του και συνεπώς, ιδιαίτερα για εφαρμογές φωτισμού, δεν είναι ακόμα πολύ διαθέσιμο. Στο μέλλον, εφόσον διασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα των διαφόρων ειδών ελεγκτών με το λογισμικό του NB-IoT, θα αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στην ανάπτυξη του χώρου των έξυπνων δικτύων φωτισμού ^{[63] [64] [59] [65]}.

3.4.2.4. LTE-M

- Ταχύτητα λήψης: 300kbps / Ταχύτητας αποστολής: 375kbps

Οι συμβατικές τελικές συσκευές του LTE προσφέρουν υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων με κόστος και κατανάλωση ισχύος, κάτι που είναι μη αποδεκτό για πολλές περιπτώσεις χρήσης σε επικοινωνίες τύπου μηχανής (Machine Type Communication, MTC). Για να μειωθεί το κόστος, το 3GPP αρχικά μειώνει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από LTE cat-1 σε LTE cat-0 και στη συνέχεια σε LTE cat-M (LTE-M), που αποτελούν τα διαφορετικά στάδια της διαδικασίας εξέλιξης LTE. Περαιτέρω μείωση του κόστους επιτυγχάνεται υποστηρίζοντας την προαιρετική ημιαμφίδρομη (half duplex) λειτουργία στο LTE cat-0. Αυτή η επιλογή μειώνει την πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό του μόντεμ και της κεραίας.

Από το LTE cat-0 έως το LTE cat-M1 (γνωστό και ως eMTC), επιτυγχάνεται μείωση του εύρους ζώνης λήψης από 20 MHz σε 1.4 MHz, που σε συνδυασμό με μειωμένη ισχύ μετάδοσης, έχει ως αποτέλεσμα τον αποδοτικό και χαμηλής ισχύος σχεδιασμό. Για την επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας για το eMTC, υιοθετούνται δύο δυνατότητες, η λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (Power Saving Mode, PSM) και η εκτεταμένη ασυνεχής λήψη (extended Discontinuous Reception, eDRx), που ενεργοποιούν τις τελικές συσκευές να εισέρχονται σε κατάσταση ύπνου για ώρες ή και ημέρες χωρίς να χάσουν την καταχώρισή τους στο δίκτυο. Οι τελικές συσκευές αποφεύγουν την παρακολούθηση του καναλιού ελέγχου κατερχόμενης ζεύξης για εξοικονόμηση ενέργειας, για παρατεταμένες χρονικές περιόδους.

Το LTE cat-M1 λειτουργεί με τα υπάρχοντα δίκτυα LTE, αντίθετα με το NB-IoT, το οποίο χρησιμοποιεί το μη χρησιμοποιούμενο φάσμα ή τις ζώνες προστασίας. Το LTE cat-M1 λειτουργεί εντός της ίδιας ζώνης LTE που χρησιμοποιείται για κυψελοειδείς εφαρμογές, γεγονός που του δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης μεταπομπής (handover), πράγμα που καθιστά δυνατή τη χρήση αυτής της τεχνολογίας σε κινητές εφαρμογές. Όμοια με τα υπόλοιπα δίκτυα της C-IoT, τα δίκτυα LTE-M θα συνυπάρχουν με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G, 3G και 4G και θα επωφεληθούν από όλες τις λειτουργίες ασφάλειας. Η διαθεσιμότητα του LTE-M είναι μεγάλη, καθώς πολλές εταιρείες και πάροχοι υπηρεσιών το εφαρμόζουν ήδη. Το LTE-M είναι από τη σκοπιά του εξωτερικού φωτισμού πολύ παρόμοιο με το NB-IoT, με την έννοια ότι δεν έχουν γίνει επαρκείς εφαρμογές για να μπορεί να εδραιωθεί στο χώρο. Ωστόσο η μεγάλη διαθεσιμότητα του LTE-M του δίνει το προβάδισμα για να επεκταθεί στο χώρο του φωτισμού, εφόσον υπάρξουν τα αντίστοιχα οικονομικά κίνητρα για να επεκταθεί στο χώρο του φωτισμού ^{[59] [66]}.

3.4.3. LPWAN (μη αδειοδοτημένο φάσμα) – Cellular – Unlicensed

Δύο παραδείγματα υλοποιήσεων LPWAN, σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, είναι οι LoRa και Sigfox. Ενώ οι δύο λύσεις βασίζονται σε φορείς κινητής τηλεφωνίας, για να υιοθετήσουν την τεχνολογία και να την εφαρμόσουν σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, έχουν πολύ διαφορετικά μοντέλα επιχειρηματικής δραστηριότητας.

Το μη αδειοδοτημένο φάσμα έχει περιορισμούς όσον αφορά την πρόσβαση των καναλιών, καθώς το φάσμα συχνά μοιράζεται με άλλες τεχνολογίες. Τυπικά, ο χρόνος μετάδοσης (transmission time) περιορίζεται μέσω του duty cycle, και απαιτείται είτε η μέθοδος listen-before-talk, είτε η μέθοδος frequency hopping για να αποφευχθούν παρεμβολές από τα προϋπάρχοντα συστήματα. Δίχως LBT, όταν μια συσκευή θέλει να μεταδώσει δεδομένα κάπου, την ίδια στιγμή που μια άλλη θέλει το ίδιο, είναι πιθανό ο ταυτοχρονισμός τους να προκαλέσει απώλεια δεδομένων. Με το LBT, τα πρωτόκολλα δεν αποστέλλονται ταυτόχρονα. Μέσω αυτής της μεθόδου, η LBT τεχνολογία ελέγχει το περιβάλλον για να δει αν η διεπαφή είναι ελεύθερη και μόνο τότε αποστέλλει τα δεδομένα της. Το LBT οριοθετεί χρονικά τη μετάδοση του κάθε πρωτοκόλλου και αυξάνει την πιθανότητα να μην υπάρξει κάποια απώλεια δεδομένων. Το frequency hopping χρησιμοποιεί spread spectrum τεχνικές, με τις οποίες ένα σήμα που παράγεται με συγκεκριμένο εύρος φάσματος, κατανέμεται σκοπίμως εντός του φάσματος συχνοτήτων. Έτσι μειώνει την παρεμβολή και την συσσώρευση πληροφοριών και – κάτι που είναι εξαιρετικά σημαντικό - αποτρέπει την ανίχνευση και την υποκλοπή. Το μοτίβο του hopping είναι γνωστό μόνο στον αποστολέα και στον παραλήπτη και διαφορετικοί αποστολείς χρησιμοποιούν διαφορετικά μοτίβα. Χρησιμοποιήθηκε από το στρατό, το GPS και το IEEE 802.11. Σε επικοινωνίες M2M (Machine to Machine) η ισχύς περιορίζεται από την πλευρά των συσκευών, όμως το ίδιο το δίκτυο μπορεί να επωφεληθεί από το αυξημένο downlink link budget λόγω της μεγαλύτερης ισχύος μετάδοσης των σταθμών βάσης.

Το πρότυπο LoRa αναπτύχθηκε αρχικά από τη νεοφυή επιχείρηση Cycleo το 2009 (στη Γκρενόμπλ της Γαλλίας) και αγοράστηκε τρία χρόνια αργότερα από την Semtech (ΗΠΑ). Το 2015, τυποποιήθηκε από τη LoRa-Alliance και αναπτύσσεται σε 42 χώρες και εξακολουθεί να αναπτύσσεται και σε άλλες χώρες. Σύμφωνα με τη προσέγγιση της LoRa είναι δυνατή η υλοποίηση δικτύων με ύλες χαμηλότερου κόστους και απόσταση λίγων χιλιομέτρων. Διατηρεί ένα ανοικτό πρότυπο, το LoRaWAN, που παρέχεται από τη μη κερδοσκοπική συμμαχία LoRa (LoRa Alliance). Κάθε μία από τις εταιρείες της συμμαχίας επωφελείται από την ύπαρξη ενός ανοικτού προτύπου για εφαρμογές IoT και η LoRa Alliance προωθεί αυτό το πρότυπο για να προσελκύσει πολλούς προγραμματιστές και εταιρείες. Παραδείγματα συνεργασιών είναι η KPN στις Κάτω Χώρες, Bouygues και η Orange στη Γαλλία, η Digimondo στη Γερμανία και η Fastnet στη Νότια Αφρική.

Η IBM και η Semtech δημιούργησαν τη συμμαχία για την προώθηση της χρήσης του ασύρματου πρωτοκόλλου LoRaWAN. Άδεια για την κατασκευή των chipsets είχε αρχικά η Semtech, ενώ η συμμαχία έχει ανακοινώσει συμφωνίες με την STMicroelectronics και την Microchip. Σύμφωνα με τη συμμαχία LoRa, το LoRaWAN είναι δίκτυο ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN), που προορίζεται για ασύρματα δίκτυα, που λειτουργούν με μπαταρίες σε περιφερειακό, εθνικό ή παγκόσμια επίπεδο. Το LoRaWAN στοχεύει σε βασικές απαιτήσεις για συστήματα IoT, όπως ασφαλή αμφίδρομη επικοινωνία, κινητικότητα και υπηρεσίες εντοπισμού.

Η Sigfox, από την άλλη πλευρά, διατηρεί μια πατενταρισμένη, ιδιόκτητη τεχνολογία. Αναπτύσσει και διατηρεί το δικό της δίκτυο (μερικές φορές, μέσω συνεργασιών με φορείς εκμετάλλευσης δικτύων - Mobile Network

Operators MNO) και κερδίζει απευθείας από την εγγραφή στο δίκτυό της. Επιπλέον, ελέγχει την backhaul επικοινωνιακή υποδομή και την cloud backend πλατφόρμα διαχείρισης, τα οποία και παρέχει στους πελάτες της. Η τεχνολογία Sigfox, που αναπτύχθηκε το 2010 από τη νεοσύστατη Sigfox (στην Τουλούζη της Γαλλίας), λειτουργεί και εμπορεύεται τη δική της λύση IoT σε 31 χώρες και εξακολουθεί να βρίσκεται σε εξέλιξη παγκοσμίως. Τα chips και τα modules για τα τελικά σημεία διατίθενται ευρέως από κατασκευαστές, όπως τους Texas Instruments, Atmel και Telit. Παραδείγματα συνεργασιών αποτελούν η AEREA στις Κάτω Χώρες, η WND στη Νότια Αμερική και στη Βρετανία και η Engie M2M στο Βέλγιο ^[59]^[67].

3.4.3.1. LoRaWAN



Εικόνα 11 – Το λογότυπο του LoRaWAN

- Συχνότητα: sub-1 GHz
- Εμβέλεια: 2-5 Km (αστικό περιβάλλον), 15 Km (εκτός αστικού περιβάλλοντος)
- Data Rates: 0,3-50 Kbps

Το LoRaWAN στοχεύει σε εφαρμογές ευρείας περιοχής και έχει σχεδιαστεί για να παρέχει χαμηλής ισχύος WAN δίκτυα με χαρακτηριστικά απαραίτητα για την υποστήριξη κινητής αμφίδρομης επικοινωνίας χαμηλού κόστους, σε εφαρμογές IoT βιομηχανίας και έξυπνων πόλεων. Στόχος είναι η δημιουργία μεγάλων δικτύων εκατομμυρίων συσκευών, των οποίων οι ταχύτητες δεδομένων κυμαίνονται από 0,3 Kbps έως 50 Kbps. Το LoRaWAN διαθέτει 8 κανάλια και οι κόμβοι του δικτύου επιλέγουν τυχαία ένα κανάλι για τη μετάδοση του κάθε μηνύματος. Το LoRa χρησιμοποιεί Spread Spectrum, το οποίο είναι λιγότερο ανθεκτικό απέναντι στην χωρητικότητα, επομένως χωράνε λιγότερα ευδιάκριτα μηνύματα στο φάσμα, όμως υπάρχει μικρότερη επιρροή από το multipath fading, δηλαδή σε περιβάλλον πόλης, είναι πιο ανθεκτικό από τις αντανακλάσεις των κτιρίων.

Η LoRa είναι μια τεχνολογία chirp-based διασποράς φάσματος (spread-spectrum) με ευρύτερο εύρος ζώνης από αυτό των ανταγωνιστών της. Λόγω της τεχνικής διαμόρφωσης και της ενσωματωμένης δυνατότητας διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correcting, FEC), το σήμα LoRa μπορεί να μεταδώσει δεδομένα με ισχύ σήματος αρκετά κάτω από το επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος, επιτρέποντας έτσι πολύ μεγάλες αποστάσεις επικοινωνίας. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι ότι προσφέρει αποτελεσματική αμφίδρομη λειτουργικότητα. Έτσι ως λύση είναι αποτελεσματική για τη λήψη μηνυμάτων από τελικά σημεία (endpoints), αλλά και για την αποστολή μηνυμάτων από σταθμούς βάσης σε τελικά σημεία (όπως για εφαρμογές εντολών και ελέγχου).

Το LoRaWAN είναι ιδιωτικό στο επίπεδο του chip, οπότε η Semtech είναι ο μόνος κατασκευαστής, όμως στο επίπεδο της συνδεσιμότητας είναι ανοικτό, οπότε υπάρχουν πολλοί πάροχοι του δικτύου. Στο LoRaWAN γίνεται ένα συμβόλαιο ανά operator. Δεν υπάρχει παγκόσμιο service layer, καθώς το LoRa είναι μόνο ένα πρωτόκολλο. Στο LoRa & LoRaWAN, όσο πιο μακριά βρίσκεται μια συσκευή από την κεραία, τόσο αυξάνεται η ενέργεια που καταναλώνεται και τόσο μειώνεται η ταχύτητα λήψης/αποστολής δεδομένων. Το χαρακτηριστικό του αυτό σημαίνει πως ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές απομακρυσμένης διαχείρισης μεγάλης κλίμακας, μόνο εφόσον είναι εγγυημένη η επαρκής κάλυψη ολόκληρης της εγκατάστασης. Διαφορετικά, η κατανάλωση απόμακρων συσκευών θα διαφέρει τόσο μεταξύ τους που θα κάνει το κόστος συντήρησης ασύμφορο, καθώς δεν είναι ίδιος ο αναμενόμενος χρόνος ζωής των μπαταριών όλων των συσκευών του δικτύου ^[54]^[64].

3.4.3.2. Sigfox



Εικόνα 12 – Το λογότυπο της Sigfox

Standard: Sigfox

- Συχνότητα: 868/902 MHz
- Εμβέλεια: 30-50 Km (αστικό περιβάλλον), 3-10 Km (εκτός αστικού περιβάλλοντος)
- Ταχύτητα δεδομένων: 300 bps

Μια εναλλακτική τεχνολογία μεγάλης εμβέλειας είναι η Sigfox, που από την άποψη της εμβέλειας κυμαίνεται μεταξύ του Wi-Fi και της κυψελοειδούς τεχνολογίας. Χρησιμοποιεί τις μη αδειοδοτημένες ζώνες ISM για τη μετάδοση δεδομένων σε πολύ στενό φάσμα από και προς τα συνδεδεμένα αντικείμενα. Η ιδέα για την τεχνολογία Sigfox είναι ότι για πολλές εφαρμογές M2M, που τροφοδοτούνται από μια μικρή μπαταρία και παρέχουν μόνο μεταφορά μικρής ποσότητας δεδομένων, η εμβέλεια του Wi-Fi είναι πολύ μικρή, ενώ η κυψελοειδής είναι υπερβολικά δαπανηρή και καταναλώνει επίσης υπερβολική ισχύ. Χορηγεί μόνο 50 microwatts, σε σύγκριση με 5.000 microwatts της κυψελοειδούς επικοινωνίας και μπορεί να επιτύχει ένα τυπικό χρόνο αναμονής (stand-by) 20 χρόνια με μια μπαταρία 2,5 Ah, που στην περίπτωση της κυψελοειδούς τεχνολογίας η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας είναι μόνο 0,2 έτη.

Το εύρος ζώνης είναι 100 Hz στην Ευρώπη (Ultra Narrow Modulation), δηλαδή συμπυκνώνει ενέργεια σε μικρό κανάλι που το κάνει ανθεκτικό στις παρεμβολές. Το SigFox αναπτύχθηκε αρχικά ως καθαρά δίκτυο αισθητήρων, συνεπώς η επικοινωνία ήταν μονομερής, αλλά στη συνέχεια επεκτάθηκε. Οι τελικές συσκευές αποστέλλουν τα δεδομένα τους τρεις φορές (ανά 2,08s) σε διαφορετικά κανάλια (συχνότητες), το οποίο κάνει το δίκτυο ακόμα πιο ασφαλές, και το gateway επιλέγει το δεδομένο (πακέτο) που ήταν καλύτερο. Αν η εφαρμογή θέλει να στείλει κάποια αναγνώριση ή κάτι παρόμοιο, αυτό είναι εφικτό μόνο αφού η συσκευή έχει στείλει κάτι. Αφού στείλει 3 φορές κάτι η συσκευή, τότε, μετά από μια καθυστέρηση 20s, για 25s η συσκευή είναι ενεργή, στο παράθυρο πρόσληψης μηνυμάτων από το gateway.

Η τεχνολογία του βασίζεται σε δυαδική κωδικοποίηση μετατόπισης φάσης BPSK (Binary Phase-Shift Keying) εξαιρετικά στενής ζώνης UNB (Ultra-Narrow Band), που μεταδίδεται στις ζώνες 868 ή 902 MHz, ανάλογα με την περιοχή και τους κανονισμούς. Η φύση του UNB είναι ότι η ενεργειακή πυκνότητα του θορύβου τείνει να είναι διασκορπισμένη σε όλο το φάσμα, έτσι το σήμα Sigfox σε οποιοδήποτε στενό τμήμα του φάσματος είναι πιθανότερο να είναι πάνω από το επίπεδο θορύβου περιβάλλοντος. Το σήμα Sigfox είναι καλά προσαρμοσμένο για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας μετάδοσης (λιγότερο από 300 bps και έως 12 συνολικά bytes μήκος ωφέλιμου φορτίου - payload) και μικρής συχνότητας ημερήσιας μετάδοσης μηνυμάτων (μέχρι 140 μηνύματα ανά ημέρα). Η τεχνολογία Sigfox είναι αποτελεσματική για επικοινωνίες από τελικά σημεία (endpoints) προς σταθμούς βάσης (uploads), αλλά δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική από σταθμούς βάσης προς τελικά σημεία (downloads).

Προσφέρει ένα ισχυρό, οικονομικά αποδοτικό και επεκτάσιμο δίκτυο, που μπορεί να επικοινωνήσει με εκατομμύρια συσκευές, που λειτουργούν με μπαταρία σε αρκετά χιλιόμετρα, καθιστώντας το κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές M2M, που αναμένεται να περιλαμβάνουν έξυπνες συσκευές μέτρησης, συσκευές παρακολούθησης ασθενών, συσκευές ασφαλείας, φωτισμό δρόμων και περιβαλλοντικούς αισθητήρες.

Είναι ιδιωτικό στην πλευρά της συνδεσιμότητας, δηλαδή είναι η μόνη connectivity provider base stations. Οι βιβλιοθήκες στα chips είναι ελεύθερες, οπότε υπάρχουν πολλές εταιρείες/κατασκευαστές που τις χρησιμοποιούν. Το SigFox ελέγχει διαρκώς όλο το φάσμα του. Το αποτέλεσμα χρήσης Ultra Narrow Band είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα αντικειμένων στο ίδιο φάσμα και η ανθεκτικότητα στο θόρυβο (όπως λείζερ στο αέρα ή σφύριγμα εν μέσω φασαρίας).

Το SigFox αποτελεί μια πολύ καλή λύση για εφαρμογές IoT και το γεγονός ότι αναπτύχθηκε από ένα κατεξοχήν δίκτυο αισθητήρων σημαίνει ότι είναι στον πυρήνα του ένα δίκτυο IoT και όχι ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών, του οποίου η εξυπηρέτηση εφαρμογών IoT επήλθε στη συνέχεια της ανάπτυξής του. Το γεγονός ότι έχει δυσκολίες στη διαχείριση εντολών από τους σταθμούς βάσης στα τελικά σημεία και όχι το αντίθετο δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για εφαρμογές όπου οι αισθητήρες έχουν ως κύριο στόχο τη συλλογή δεδομένων για την καλύτερη ανάλυση ενός φαινομένου, παρά για την άμεση λήψη μιας απόφασης. Ενδεικτικά, ένα τέτοιο πρόβλημα δεν είναι σημαντικό σε ένα δίκτυο αισθητήρων στο χώρο της γεωργίας, εφόσον οι αισθητήρες βρίσκονται εκεί για την επίβλεψη της ανάπτυξης των σοδειών και την καταγραφή δεδομένων για την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου καλλιέργειάς τους. Θα ήταν όμως αρκετά σημαντικό σε ένα έξυπνο σύστημα φωτισμού, όπου η ανίχνευση κίνησης από αισθητήρες σημαίνει την άμεση ενεργοποίηση συγκεκριμένων φωτιστικών σωμάτων. Η πλήρης έκταση του προβλήματος αυτού δεν είναι γνωστή, οπότε είναι πιθανό αυτό το πρόβλημα να έχει ξεπεραστεί. Τέλος, το γεγονός ότι ένα δίκτυο SigFox είναι πλήρως ιδιωτικό είναι ανασταλτικό για την εφαρμογή του σε ένα δημόσιο έργο έξυπνου δικτύου φωτισμού λόγω των επιπλοκών που μπορούν να προκύψουν με μελλοντικές αλλαγές στη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, τις χρεώσεις ή τις διαθέσιμες υπηρεσίες ^{[64] [68]}.

3.4.3.3. Weightless



Εικόνα 13 – Το λογότυπο του Weightless

Το Weightless είναι ένα σύνολο τεχνολογιών LPWAN, που είναι διαχειριζόμενα από την ομάδα Weightless-SIG (Special Interest Group). Τρία διαφορετικά πρότυπα έχουν προταθεί Weightless-N που οποίο επικεντρώνεται στο εξαιρετικά χαμηλό κόστος, το Weightless-W το οποίο καταλαμβάνει μέρος του φάσματος που παλιότερα καταλάμβανε η τηλεόραση (TV whitespace spectrum), και το Weightless-P το οποίο επικεντρώνεται στην υψηλή απόδοση.

Όπως και το Sigfox, το Weightless-P είναι μια προσέγγιση στενής ζώνης στις ζώνες ISM sub-1GHz. Το Weightless-P χωρίζει το φάσμα σε κανάλια των 12,5 KHz. Η ευέλικτη αντιστοίχιση καναλιών, οι προσαρμοστικές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων (από 200 bps έως 100 Kbps) και οι συγχρονισμένοι σταθμοί βάσης επιτρέπουν την αποδοτική χρήση του φάσματος, την ελάχιστη χρήση ισχύος (κατά τη μετάδοση και τον προγραμματισμό των πόρων), τη βελτίωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών των επιμέρους συσκευών, καθώς και των πόρων του δικτύου.

Η υποστήριξη, τόσο της πλήρους όσο και της ευέλικτης αναγνώρισης όλων των μεταδόσεων (full and flexible acknowledgement), της τεχνικής Forward Error Correction (FEC) και της τεχνικής Automatic Retransmission Request (ARQ) συμβάλλουν στη διατήρηση της αξιοπιστίας και της ποιότητας QoS. Το Weightless-P μπορεί να υποστηρίξει ένα τυπικό εύρος 2 Km σε αστικά περιβάλλοντα και όλη η κυκλοφορία είναι κρυπτογραφημένη με AES-128/256 bit. Το Weightless υποστηρίζεται από τα μέλη της ομάδας Weightless-SIG: Accenture, ARM, M2COMM, Sony-Europe και Telensa, το οποίο αν και αποτελεί ένα αξιόλογο σύνολο αξιόπιστων εταιρειών, δεν υπόσχεται την ταχεία ανάπτυξή του, και αν το κάνει, αυτό θα γίνει επεκτείνοντας το υπάρχον δίκτυο εταιρειών για χρήση του δικτύου για εξυπηρέτηση δικών τους αναγκών ^{[69] [70]}.

3.4.3.4. Ingenu



Εικόνα 14 – Το λογότυπο του Ingenu

Η ιδιόκτητη λύση Ingenu βασίζεται στην τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης τυχαίας φάσης (Random Phase Multiple Access - RPMA), η οποία επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, σε σχέση με τους ανταγωνιστές της. Κύριο χαρακτηριστικό που τη διακρίνει έναντι των υπολοίπων είναι ότι παρέχει ακρίβεια εντοπισμού. Όπως και το LoRa, το Ingenu παρέχει αποτελεσματική αμφίδρομη μετάδοση.

Το πρωτόκολλο Ingenu RPMA είναι μια λύση διασποράς φάσματος (spread spectrum) που λειτουργεί στη ζώνη ISM 2,4 GHz. Η κάλυψη που επιτυγχάνει το RPMA οφείλεται ως επί το πλείστον στον αυξημένο ρυθμό μετάδοσης που διατίθεται σε αυτή τη ζώνη, επιτυγχάνοντας υλοποιήσεις σε απόσταση 10 Km. Επιπλέον, δεν υπάρχουν κανονισμοί για τον κύκλο λειτουργίας, που πρέπει να ακολουθούνται στην Ευρώπη στη ζώνη 2,4 GHz. Το RPMA χρησιμοποιεί μια προσαρμοστική τεχνική ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, όπου οι συσκευές επιλέγουν το βέλτιστο συντελεστή διασποράς (spread factor) με βάση την ισχύ του σήματος κατερχόμενης ζεύξης (downlink). Ο σταθμός βάσης είναι σε θέση να λαμβάνει σήματα όλων των συντελεστών διασποράς. Επιπλέον, τα κανάλια αναμετάδοσης των συσκευών στα μηνύματα ανερχόμενης ζεύξης (uplink) επιτρέπουν στον σταθμό βάσης να βελτιώνει το ρυθμό μετάδοσης downlink με αποτέλεσμα τη βέλτιστη χωρητικότητα (capacity) και χρήση ενέργειας. Όλα τα μηνύματα είναι κρυπτογραφημένα σε μια μορφή του αλγορίθμου Viterbi, που επιτρέπει στο σταθμό βάσης να εγγυηθεί την άφιξη του μηνύματος ακόμη και με ρυθμό σφάλματος πακέτων έως και 50% (Packet Error Rate - PER).

Το Ingenu αποτελεί μη διαδεδομένο δίκτυο IoT, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί σε περιορισμένο αριθμό έργων IoT, όπως από τη Shell για την παρακολούθηση της ποιότητας των σωλήνων μεταφοράς καυσίμων, όχι όμως σε έργα οδο φωτισμού. Συνεπώς, η χρήση του για τέτοια εφαρμογή, θα πρέπει να περιμένει κάποια πρότερη πετυχημένη εφαρμογή του Ingenu σε έργο έξυπνου φωτισμού ^{[71] [72] [59]}.

3.5. Διαλειτουργικότητα στο χώρο του έξυπνου φωτισμού

Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη των εφαρμογών του IoT έχει προκαλέσει μεγάλη αύξηση των ήδη πολυάριθμων κατασκευαστών εξαρτημάτων και φωτιστικών, αλλά και λογισμικού για την κάλυψη των αναγκών της αγοράς. Σύντομα έγινε ξεκάθαρος ο κίνδυνος του vendor lock-in. Αυτός είναι ο κίνδυνος ένας αγοραστής μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας ή εγκατάστασης από μια εταιρεία (φωτιστικά, αισθητήρες, αναμεταδότες, πρωτόκολλα επικοινωνίας) να μην μπορεί κάποια στιγμή να αλλάξει πάροχο. Ενδεικτικά το Sigfox διαθέτει αυτόν κίνδυνο, καθώς η εφαρμογή του δικτύου του και των συσκευών σε αυτό γίνονται από το ίδιο, χωρίς συνεργασία με άλλες εταιρείες. Αυτό υπάρχει ακριβώς λόγω της έλλειψης διαλειτουργικότητας μεταξύ προϊόντων διαφορετικών κατασκευαστών.

Διαλειτουργικότητα είναι η ικανότητα συσκευών και λογισμικών διαφορετικών κατασκευαστών να μπορούν να συνεργαστούν δίχως κάποιο επιπρόσθετο μεσολαβητή. Ο τομέας εξασφάλισης της διαλειτουργικότητας στο χώρο της αγοράς είναι ακόμη πιο νέος από το IoT, εφόσον είναι συνέπεια της ανάπτυξής του, οπότε υπάρχουν πολλές ανταγωνιστικές συμπράξεις εταιρειών, οι οποίες εγγυώνται ότι οποιοδήποτε από τα προϊόντα ίδιου τύπου εταιρειών που ανήκουν στην ίδια σύμπραξη είναι πλήρως εναλλάξιμα τόσο σε επίπεδο εξοπλισμού όσο και σε επίπεδο λογισμικού. Υπάρχουν πολλοί τύποι διαλειτουργικότητας (μεταξύ ελεγκτή και φωτιστικού, αισθητήρων και φωτιστικών, κεντρικού συστήματος διαχείρισης και δικτύου επικοινωνίας και κεντρικού συστήματος

διαχείρισης και μιας συσκευής) και δεν υπάρχει ένα πρωτόκολλο που να καλύπτει όλους τους διαφορετικούς τύπους. Έτσι, και στο επίπεδο των φωτιστικών και των αισθητήρων υπάρχουν εξειδικευμένα πρωτόκολλα διαλειτουργικότητας που διασφαλίζουν την αρμονική συνύπαρξη των διαφόρων ειδών εξαρτημάτων^{[73][74]}. Εκεί υπάρχουν οι εξής κυρίαρχες κοινοπραξίες:

3.5.1. Zhaga



Εικόνα 15 – Το λογότυπο της Zhaga

Η Zhaga ιδρύθηκε το 2010 και είναι μια ανοικτή, παγκόσμια κοινοπραξία εταιρειών φωτισμού με αποστολή να δημιουργήσει πρότυπα για τις διεπαφές των εξαρτημάτων φωτιστικών LED (light engines, modules, arrays, holders, electronic control gear, drivers and connectivity fit systems). Βοηθά στην απλοποίηση του σχεδιασμού και της παραγωγής των φωτιστικών LED και στη βελτιστοποίηση της αλυσίδα παραγωγής/παροχής τους. Για να το πετύχει αυτό στοχεύει να εξαλείψει τις περιττές παραλλαγές των διεπαφών, να κάνει σωστό διαχωρισμό των καθηκόντων των επιμέρους εταιρειών και να επιτρέψει την δια-βιομηχανική συνεργασία. Τον Ιούλιο του 2019, η κοινοπραξία διέθετε πάνω από 120 μέλη. Η Zhaga είναι μέλος του προγράμματος της IEEE: Industry Standards and Technology Organization (ISTO).

Το αρχικό σημείο ενδιαφέροντος της Zhaga ήταν η εναλλαξιμότητα των τμημάτων των LED. Ωστόσο, από το 2018 μετατόπισε το ενδιαφέρον της στην διαλειτουργικότητα, συμπεριλαμβάνοντας έτσι όλες τις πτυχές της διεπαφής, από τα μηχανικά μέρη, στην αναβάθμιση και την επισκευή των φωτιστικών LED. Αποτέλεσμα των προδιαγραφών της Zhaga είναι ότι ένα φωτιστικό LED μπορεί να είναι διαλειτουργικό, δηλαδή να λειτουργεί αρμονικά με άλλα τμήματα φωτιστικών και συσκευές από κατασκευαστές που ανήκουν στην κοινοπραξία, να μπορεί να αντικατασταθεί από άλλο, αλλά και να μπορεί να αναβαθμιστεί μετά την εγκατάσταση, εφόσον υπάρχει νέο λογισμικό διαθέσιμο^{[75][76][77][78]}.

3.5.2. NEMA (National Electrical Manufacturers Association)



Εικόνα 16 – Το λογότυπο του NEMA

Ο NEMA είναι ο μεγαλύτερος συνεταιρισμός ηλεκτρικού εξοπλισμού στην Αμερική. Ιδρύθηκε το 1926 και διαθέτει 350 μέλη-εταιρείες σε διάφορους κλάδους παραγωγής. Πέραν της κατασκευής προϊόντων διαφόρων τεχνολογιών, ο NEMA έχει δημοσιεύσει πάνω από 700 πρότυπα και πρωτόκολλα. Το πιο σημαντικό από αυτά είναι το πρωτόκολλο για τις πρίζες εναλλασσόμενου ρεύματος και τους υποδοχείς τους, όπου οι υποδοχείς τύπου NEMA έχουν επικρατήσει στην Αμερική και σε μερικές ακόμη χώρες^[79].

Στο χώρο του φωτισμού και ειδικά του οδοφωτισμού, το πρότυπο ANSI C136 περιγράφει αναλυτικά έναν προτεινόμενο τρόπο λειτουργίας για τα φωτιστικά και όλα τα εξαρτήματά τους. Στο ANSI C136.41 (Dimming Control) αναγράφονται μέθοδοι για έλεγχο του επιπέδου φωτισμού μέσω ενός εξωτερικά συνδεδεμένης συσκευής φωτοελέγχου και του ballast ή driver του φωτιστικού. Μέσω αυτού του πρότυπου του NEMA, οι υποδοχείς τύπου

NEMA (NEMA socket) παρέχουν ηλεκτρική και μηχανική σύνδεση μεταξύ του κυττάρου ελέγχου και του φωτιστικού, και περιγράφει συγκεκριμένα παραμέτρους όπως το μέγεθος του υποδοχέα, ο τύπος διασύνδεσης και άλλα ^[80].

Η σύνδεση και αποσύνδεση ενός NEMA socket από ένα φωτιστικό γίνεται με το χέρι, δίχως την ανάγκη για εργαλεία, διευκολύνοντας διαδικασίες όπως η εγκατάσταση, η συντήρηση και η επισκευή. Διαθέτει είτε 5 είτε 7 ακροδέκτες. Οι 3 χρησιμοποιούνται για την παροχή ενέργειας (max 15A), ενώ οι εναπομείναντες 2 ή 4 αποδέκτες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά σημάτων dimming και εντολών (max 100mA). Οι ακροδέκτες σήματος υποστηρίζουν το 1-10VDC είτε το DALI πρωτόκολλο ^[81].

3.5.3. DiiA – Digital Illumination Interface Alliance



Εικόνα 17 – Το λογότυπο της DiiA

Η **DiiA** αποτελεί μια παγκόσμια κοινοπραξία, μέλος του ISTO (Industry Standards and Industry Organization), που έχει στόχο να αυξήσει την αγορά για λύσεις ελέγχου φωτισμού βασισμένες στην τεχνολογία DALI. Η DiiA καθοδηγεί την υιοθεσία του DALI-2, της τελευταίας έκδοσης του διεθνώς τυποποιημένου πρωτοκόλλου DALI, που είναι ο διάδοχος των συστημάτων 1-10V και 0-10V ^[82].

3.5.4. D4i



Εικόνα 18 – Το λογότυπο του D4i

Το **D4i** είναι το τελευταίο είδος πιστοποίησης της DiiA, επεκτείνοντας τη λειτουργικότητα του DALI-2 σε ισχύ και δεδομένα. Οι προδιαγραφές του D4i πιστοποιούν ότι επαρκής ισχύς είναι διαθέσιμη για τη λειτουργία συσκευών ελέγχου, όπως αισθητήρες και ασύρματες συσκευές επικοινωνίας, που είναι συνδεδεμένες στο φωτιστικό. Παράλληλα, οι D4i drivers εντός του φωτιστικού μπορούν να αποθηκεύουν και να μεταδίδουν ένα μεγάλο εύρος δεδομένων με τυποποιημένο τρόπο. Η D4i επιτρέπει στα έξυπνα φωτιστικά με τρόπο τυποποιημένο να αποθηκεύουν και να μεταδίδουν τα δεδομένα που έχουν σχέση με τον driver, την πηγή φωτός και το φωτιστικό. Η αμφίδρομη φύση του πρωτοκόλλου DALI επιτρέπει τέτοια δεδομένα να μεταφέρονται μέσω του lighting-control δικτύου. Δεδομένα εντός του driver μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτιωμένη παρακολούθηση των φωτιστικών, καθώς και επίβλεψη της απόδοσης, διαγνωστικά και μέτρηση ενέργειας ^[83].

3.5.5. Zhaga-D4i Certification

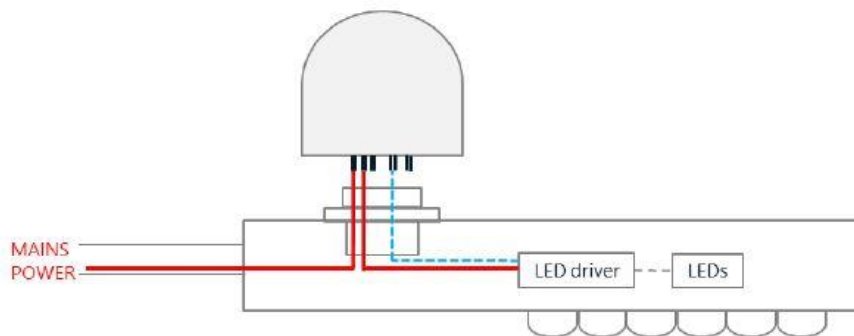


Εικόνα 19 – Το λογότυπο της Zhaga-D4i

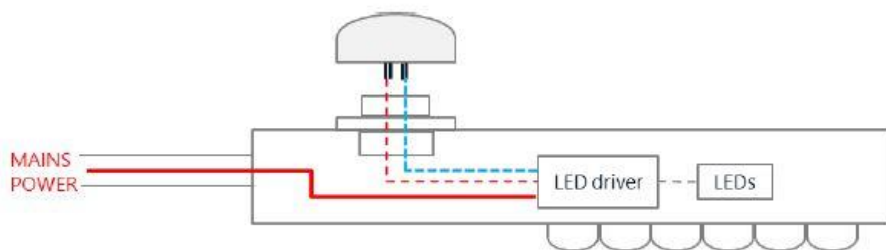
Το 2019, η κοινοπραξία Zhaga και η συμμαχία DiiA ανακοίνωσαν το πρόγραμμα πιστοποίησης D4i για την παροχή plug-and-play διαλειτουργικότητας φωτιστικών, αισθητήρων και κόμβων επικοινωνίας. Ο αρχικός στόχος της συνεργασίας είναι ο εξωτερικός φωτισμός, με σχέδια για να επεκταθεί και στον φωτισμό εσωτερικών χώρων. Προϊόντα που εγκρίνονται θα φέρουν τα logos της Zhaga και της D4i, που ανήκουν στην Zhaga και την DiiA αντίστοιχα, και θα αποτελούν ισχυρή ένδειξη αυξημένης διαλειτουργικότητας. Η Zhaga-D4i συνδυάζει το βιβλίο 18 της Zhaga (Smart interface between outdoor luminaires and sensing/communication modules) και τις προδιαγραφές της DiiA με την πιστοποίηση D4i για intra-luminaire DALI. Οι προδιαγραφές του D4i πιστοποιούν ότι η ισχύς θα είναι διαθέσιμη στον Zhaga υποδοχέα του φωτιστικού. Επιπρόσθετα με την ενσωματωμένη DALI bus παροχή ισχύος, κάθε Zhaga-D4i πιστοποιημένο φωτιστικό διαθέτει επίσης μια βοηθητική παροχή ισχύος 24V [84].

3.5.6. NEMA ANSI C136.41 vs Zhaga – D4i

Στο χώρο του εξωτερικού φωτισμού, ο NEMA και η συνεργασία Zhaga-D4i έχουν καταλήξει στη δημιουργία δύο τύπων controller, οι οποίοι συνδέονται μέσω διαφορετικών υποδοχών στο επάνω μέρος του φωτιστικού. Αυτοί οι controller είναι plug and play, δηλαδή δεν απαιτούν περαιτέρω εξαρτήματα ή λογισμικό για να λειτουργήσουν, εφόσον το φωτιστικό είναι πιστοποιημένο από τον αντίστοιχο φορέα. Παρακάτω αναλύονται οι διαφορές των δύο προτύπων, καθώς και οι επιπτώσεις του γεγονότος ότι ο controller Zhaga-D4i λαμβάνει μειωμένη τάση μέσω του driver του φωτιστικού, ενώ ο NEMA παρεμβάλλεται μεταξύ του driver και της παροχής ισχύος.



Εικόνα 20 – Παροχή ισχύος σε controller NEMA ANSI C136.41



Εικόνα 21 – Παροχή ισχύος σε controller Zhaga-D4i

Αρχιτεκτονική

Όπως αναφέρθηκε, η υποδοχή τύπου NEMA λαμβάνει ρεύμα από την κύρια παροχή, η οποία στη συνέχεια καταλήγει στο driver. Λόγω αυτού ένας controller τύπου NEMA παρέχει προστασία από υπερτάσεις, παρέχει δυνατότητα αποκοπής του driver από την παροχή ισχύος, μέτρησης και ανάλυσης της καταναλισκόμενης ισχύος καθώς και ελέγχου του φωτιστικού μέσω 1-10V ή DALI. Η απευθείας σύνδεση του controller στην παροχή το κάνει ιδανική επιλογή για υποδομές φωτισμού οι οποίες ενδέχεται μελλοντικά να χρειαστεί να υποστηρίξουν γενικότερες smart city λειτουργίες, καθώς η απεριόριστη ενέργεια που έχει στη διάθεσή του εγγυάται ότι πάντα θα έχει επάρκεια για την υποστήριξη νέων ειδών αισθητήρων ή εξαρτημάτων.

Αντίθετα, στον controller τύπου Zhaga-D4i η ισχύς καταλήγει σε αυτόν μέσω του driver, οπότε ο driver είναι αυτός που θα παρέχει προστασία υπερτάσεων, τα απαραίτητα διαγνωστικά και την ενέργεια για την υποστήριξη της βοηθητικής ισχύος 24 V που απαιτούνται. Η δυνατότητες ελέγχου και συνδεσιμότητας ενός controller σε αυτήν την περίπτωση είναι περιορισμένες λόγω της μειωμένης διαθέσιμης ισχύος. Αυτό έχει μερικές θεμελιώδεις επιπτώσεις:

- Οποιαδήποτε συσκευή συνδεθεί στην υποδοχή Zhaga-D4i πρέπει να λειτουργεί εντός των περιορισμών στην παροχή ενέργειας και στην ανάγκη χρήσης ενσύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Συνεπώς, αν και το Zhaga-D4i είναι επαρκές για τις διάφορες εφαρμογές έξυπνου ελέγχου φωτισμού, η εφαρμογή του θα αποτελέσει εμπόδιο στην αναβάθμιση του υπάρχοντος συστήματος φωτισμού για να επιδέχεται ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών.
- Στην προσπάθεια μείωσης του κόστους των πιστοποιημένων φωτιστικών από τη Zhaga-D4i, διάφορες λειτουργίες όπως η ανάλυση καταναλισκόμενης ισχύος έχουν μεταφερθεί από τον controller στον driver των LED. Αυτό έχει οδηγήσει σε controllers απλούστερου σχεδιασμού και άρα μειωμένες τιμές, όμως έχει εναποθέσει την ευθύνη για μέτρηση ενέργειας στον driver. Οι drivers στα πιστοποιημένα από Zhaga-D4i φωτιστικά είναι ενσωματωμένοι σε αυτά και επομένως υπάρχει το ρίσκο ένα φωτιστικό κατάλληλο για μια εφαρμογή να μη διαθέτει τις απαραίτητες ικανότητες ανάλυσης της ενέργειας που καταναλώνεται.

Εδραίωση στο χώρο

Η υποδοχή τύπου NEMA, όπως και ο ίδιος ο NEMA, είναι πολύ παλαιότερος της Zhaga-D4i. Αυτό την έχει κάνει ευρέως διαδομένη και ένας μεγάλος αριθμός κατασκευαστών παρέχουν εξαρτήματα και φωτιστικά κατάλληλα για την αρμονική λειτουργία με τον controller τύπου NEMA, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί λόγω της παλαιότητάς του στη συντριπτική πλειοψηφία έργων έξυπνου φωτισμού.

Αν και η υποδοχή Zhaga είναι διαθέσιμη λίγα μόνο χρόνια, οι προδιαγραφές της που περιγράφει εγγυώνται ότι το πρότυπο είναι πραγματικά ανοικτό και διαλειτουργικό, με δυνατότητα δημιουργίας plug and play συστημάτων τα οποία μόλις τον τελευταίο καιρό ξεκινούν την εφαρμογή τους. Συνεπώς, ο αριθμός των φωτιστικών πιστοποιημένων με Zhaga-D4i είναι περιορισμένος, όπως και οι επιλογές σε συσκευές ελέγχου.

Οι νέες προδιαγραφές του D4i προέκυψαν συλλέγοντας τα καλύτερα τμήματα του πρωτοκόλλου DALI 2 και προσαρμόζοντάς τα για το περιβάλλον εντός ενός φωτιστικού σώματος. Διευρύνοντας το πρόγραμμα πιστοποίησης για εξαρτήματα όπως οι drivers, τα φωτιστικά και τα εξαρτήματα ελέγχου, η διαλειτουργικότητα είναι ένας από τους κύριους στόχους της Zhaga-D4i. Ωστόσο, αυτό ισχύει στα πλαίσια λειτουργίας μέσω του DALI, που είναι ένα σχετικά αργό ψηφιακό πρωτόκολλο, σχεδιασμένο ειδικά για εντολές ελέγχου του φωτισμού. Είναι πιθανό, σε περίπτωση που οι ανάγκες μιας εγκατάστασης φωτισμού στο μέλλον αλλάξουν και είναι επιθυμητή η εγκατάσταση νέων τύπων αισθητήρων για την εξυπηρέτηση των αναγκών αυτών, να μην είναι εφικτή η αμφίδρομη επικοινωνία λόγω του εξειδικευμένου σχεδιασμού του DALI, επιβαρύνοντας σημαντικά τη διαλειτουργικότητα.

Ηλεκτρική ενέργεια και ασφάλεια

Όπως αναφέρθηκε, η υποδοχή NEMA έχει απευθείας σύνδεση με την παροχή και είναι σημαντικό να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας κατά την εγκατάσταση και αντικατάσταση των controllers, καθώς βρίσκονται υπό την τάση του δικτύου.

Όπως αναφέρθηκε, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Zhaga-D4i οι συσκευές ελέγχου περιορίζονται σε μέση κατανάλωση ενέργειας 1-2 W. Ο περιορισμός αυτός, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί εμπόδιο όταν πρόκειται να εξυπηρετηθούν εφαρμογές που απαιτούν cloud computing και άρα μεγαλύτερο εύρος ζώνης, δηλαδή μεγαλύτερη κατανάλωση. Όσον αφορά όμως την ενέργεια, οι προδιαγραφές αυτές εγγυώνται πως η διαδικασία τοποθέτησης και αφαίρεσης ενός controller μπορεί να γίνει άφοβα δίχως ιδιαίτερα μέτρα προστασίας, με το χέρι. ^{[85] [86] [87]}.

3.6. Επιλεγμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας για το σύστημα οδοφωτισμού του Ε.Μ.Π.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας που επιλέχθηκε για ένα έξυπνο σύστημα οδοφωτισμού στο Ε.Μ.Π. είναι το Zigbee. Αρχικός λόγος για την επιλογή αυτή είναι πως το Zigbee λειτουργεί στο μη αδειοδοτημένο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 3.2, η ελευθερία που παρέχει η λειτουργία εντός των ISM ζωνών για μια τέτοιου είδους εφαρμογών το κάνει πολύ προτιμότερο από το αυστηρά ελεγχόμενο χώρο του αδειοδοτημένου φάσματος, εντός του οποίου η δημιουργία και συντήρηση ενός ασύρματου δικτύου οδοφωτισμού θα γινόταν σε διαρκή συνεργασία με κάποιο πάροχο τηλεπικοινωνιών, μέσω του οποίου θα έπρεπε να γίνεται οποιαδήποτε επέκταση ή βελτιστοποίηση του υπάρχοντος δικτύου.

Επιπλέον, το μείζον μειονέκτημα του μη αδειοδοτημένου φάσματος, που είναι οι παρεμβολές και οι απώλειες μηνυμάτων, δεν αποτελεί σημαντικό ζήτημα σε ένα χώρο όπως το Ε.Μ.Π., όπου η πλειοψηφία των εκπεμπόμενων σημάτων προέρχονται εντός των εγκαταστάσεων των σχολών και επομένως μπορούν να επιλυθούν εφόσον υπάρξουν χωρίς την εμπλοκή τρίτων. Ωστόσο, τέτοιου είδους παρεμβολές δεν αναμένεται να είναι αξιοσημείωτες, καθώς όπως αναφέρθηκε, οι συσκευές και τα δίκτυα που λειτουργούν στις ζώνες ISM έχουν προσαρμοστεί θωρακίζοντας τα μηνύματα από παρεμβολές.

Από τις διαθέσιμες επιλογές πρωτοκόλλων επικοινωνίας εντός του μη αδειοδοτημένου τμήματος του φάσματος, το Zigbee αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Σημαντικοί ανταγωνιστές όπως το Wi-Fi και το Smart Bluetooth, αν και είναι ευρέως διαδομένοι σε άλλες εφαρμογές, στον χώρο του οδοφωτισμού δεν αποτελούν κυρίαρχους παίκτες. Ενδεικτικά, το Wi-Fi δεν είναι γνωστό να έχει εφαρμοστεί σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές οδοφωτισμού, ενώ το Bluetooth Smart και το Z-Wave εξειδικεύονται περισσότερο σε εφαρμογές έξυπνου σπιτιού. Άλλοι ανταγωνιστές όπως Thread και το 6LoWPAN, αν και έχουν μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης στον χώρο του οδοφωτισμού, είναι αμφίβολο ότι κάτι τέτοιο θα γίνει στο άμεσο μέλλον, και αφού γίνει θα χρειαστεί αρκετός χρόνος μέχρι οι τεχνολογίες αυτές να βελτιστοποιηθούν και να γίνουν διαθέσιμες από αρκετούς παρόχους αντίστοιχων υπηρεσιών.

Ακόμη, το Zigbee, λόγω του ότι λειτουργεί με προκαθορισμένες βιβλιοθήκες εντολών εφαρμογών υπόσχεται υψηλό βαθμό διαλειτουργικότητας. Όπως αναφέρθηκε, η διαλειτουργικότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα σε ένα έργο τέτοιου είδους για αποφυγή δέσμευσης σε συγκεκριμένο πάροχο ανταλλακτικών και υπηρεσιών. Το Zigbee μπορεί να συνεργασθεί με συσκευές από πολύ μεγάλο εύρος κατασκευαστών, δίνοντας την απαραίτητη ευελιξία για αλλαγή προμηθευτών, αν αυτό είναι οικονομικά συμφέρον.

Το Zigbee αποτελεί ένα δίκτυο το οποίο έχει ήδη εφαρμοσθεί με μεγάλη επιτυχία σε υψηλό αριθμό έργων παγκοσμίως, στο χώρο του φωτισμού οδών, πλατειών και λεωφόρων, και θεωρείται πως αποτελεί την καλύτερη επιλογή για έναν χώρο όπως αυτόν της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.

3.7. Αισθητήρες

Όπως έχει αναφερθεί, ο λόγος ύπαρξης των διαφόρων ειδών δικτύων IoT είναι για τη σύνδεση διαφόρων ειδών συσκευών μεταξύ τους για να είναι εφικτή η συνεργασία τους. Με τρόπο παρόμοιο με τον οποίο οι οργανισμοί

διαθέτουν διαφόρων ειδών αισθητήρια όργανα για να λαμβάνουν πληροφορίες για το περιβάλλον τους, έτσι και σε ένα δίκτυο IoT, διαφόρων ειδών αισθητήρες μπορούν να διασυνδεθούν μεταξύ τους. Αντίστοιχα με τον ανθρώπινο εγκέφαλο οι πληροφορίες αυτές μπορούν να υποστούν επεξεργασία από το κεντρικό υπολογιστικό σύστημα για να ληφθούν αποφάσεις που αφορούν τις άλλες συσκευές στο δίκτυο που επιτελούν άλλο σκοπό. Η ένταξη των αισθητήρων στο δίκτυο είναι που μετατρέπει οποιοδήποτε δίκτυο σε «έξυπνο» δίκτυο, καθώς του δίνεται η δυνατότητα ζωντανής απόκτησης δεδομένων, χωρίς την ανάγκη για χειροκίνητης εισαγωγής τους από κάποιο άνθρωπο. Συνεπώς ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να προσαρμόζει τη λειτουργία των συσκευών που είναι συνδεδεμένες σε αυτό διαρκώς, βάσει των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες του. Υπάρχουν αισθητήρες που αναλύουν δεδομένα αναρίθμητων ειδών, από επιτάχυνση και περιστροφή, μέχρι τη στάθμη υγρών και τη χημική σύστασή τους. Οι αισθητήρες που συνηθίζεται να εντάσσονται σε ασύρματα δίκτυα έξυπνου φωτισμού χωρίζονται σε ασφαλείας, που χρησιμεύουν για να εγγυώνται την ασφάλεια των χρηστών ή της παρουσίας ενός χώρου, αισθητήρες περιβάλλοντος, που αναλύουν διάφορες πτυχές του περιβάλλοντος, και δευτερεύοντες αισθητήρες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναβάθμιση της εμπειρίας των χρηστών ενός χώρου υποστηρίζοντας δευτερεύουσες υπηρεσίες άσχετες με τον φωτισμό.

Αισθητήρες ασφαλείας

1. Υπερύθρων
2. Κίνησης
3. Εικόνας
4. Ήχου

Αισθητήρες περιβάλλοντος

1. Θερμοκρασίας
2. Υγρασίας
3. Αέριων χημικών

Η λειτουργία του κάθε αισθητήρα υποδηλώνεται από την ονομασία του. Οι παραπάνω κατηγορίες αποτελούν τις κυριότερες κατηγορίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα έξυπνου εξωτερικού φωτισμού. Οι αισθητήρες υπερύθρων αποτελούν μεγαλύτερη κατηγορία αισθητήρων από τους αισθητήρες κίνησης, και πολλοί από τους αισθητήρες κίνησης λειτουργούν με την ανάλυση της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Επειδή οι υπέρυθροι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση διαρροών θερμότητας και άλλων πηγών θερμότητας, τοποθετούνται ως χωριστή κατηγορία.

Οι αισθητήρες κίνησης αποτελούν τη βάση ενός έξυπνου συστήματος φωτισμού. Με την τοποθέσια επαρκούς αριθμού σε κρίσιμα σημεία του συστήματος οδοφωτισμού, αυτό μπορεί να προσαρμόζει τα επίπεδα φωτισμού σε διαφορετικά μέρη του συστήματος, ώστε να επιτυγχάνεται η χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση, χωρίς όμως αυτό να γίνεται εις βάρος της ασφάλειας των χρηστών του χώρου. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να έχουν διττή λειτουργία. Αφενός να οδηγούν σε εξοικονόμηση ενέργειας και αφετέρου, σε ιδιωτικές εγκαταστάσεις ή χώρους εξειδικευμένων λειτουργιών να παρέχουν ζωντανή ροή δεδομένων για τα μέρη του χώρου στα οποία ανιχνεύεται κίνηση, ώστε να είναι δυνατός ο εντοπισμός ύποπτης συχνότητας κυκλοφορίας σε μέρη όπου δεν προβλέπεται τέτοια.

Στα πλαίσια της ασφάλειας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πάνω στο υφιστάμενο δίκτυο φωτισμού αισθητήρες εικόνας και ήχου για αποτροπή ή καταγραφή εγκλημάτων. Σε συνεργασία με τους αισθητήρες κίνησης, οι αισθητήρες εικόνας μπορούν να αρχίσουν την καταγραφή τους, όταν εντοπισθεί κίνηση ορισμένες ώρες ή μέρες του χρόνου, σε περιοχές όπου απαγορεύεται. Εναλλακτικά, εφόσον η ένταση ήχου ξεπεράσει ορισμένα επίπεδα από αισθητήρες ήχου αισθητήρων εικόνας μπορούν όπως οι αισθητήρες κίνησης να ενεργοποιήσουν αισθητήρες εικόνας. Αν και δευτερεύοντα όσον αφορά τον φωτισμό, τέτοιου είδους εφαρμογές μπορούν να αυξήσουν τόσο την ασφάλεια όσο και το αίσθημα ασφάλειας για τους χρήστες ενός χώρου.

Οι αισθητήρες περιβάλλοντος αποτελούν μια περιστασιακή εφαρμογή όσον αφορά τα συστήματα οδοφωτισμού. Δεν υπάρχει όφελος από την εγκατάστασή τους σε μια ιδιωτική εγκατάσταση, όμως είναι εφικτό στα πλαίσια

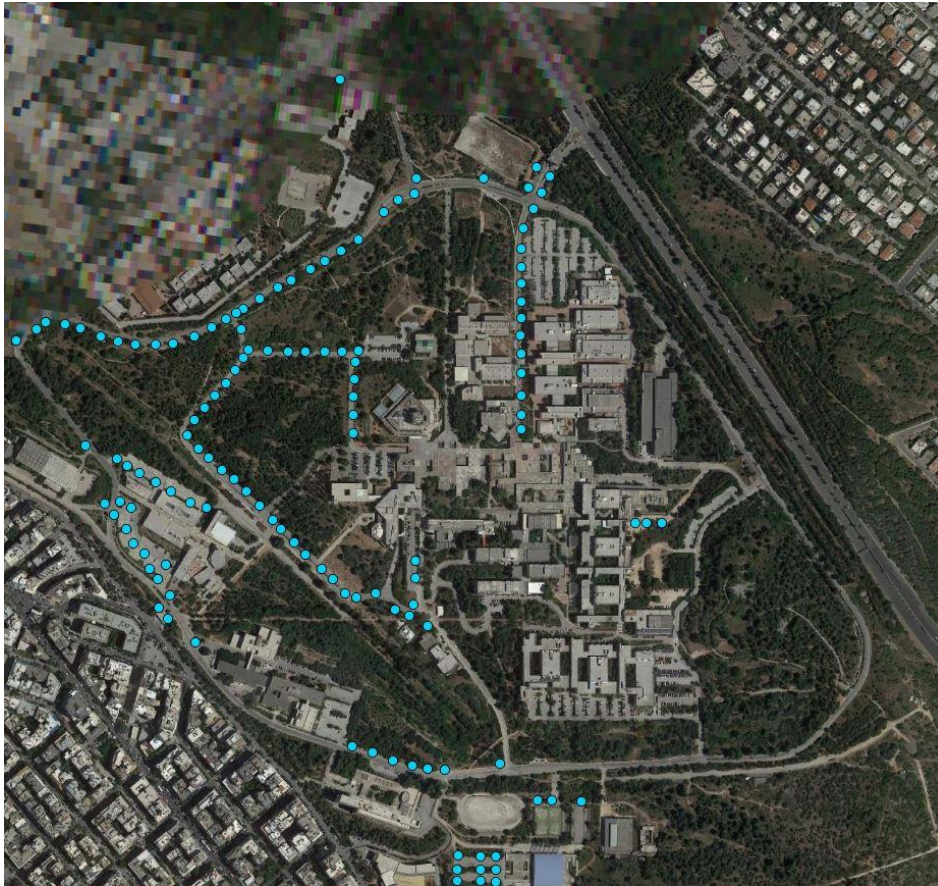
ενός μεγαλύτερου έργου, η εγκατάσταση τέτοιου είδους αισθητήρων σε διαφορετικά σημεία μιας πόλης ή περιοχής να παρέχουν πληθώρα περιβαλλοντικών δεδομένων, όπως θερμοκρασία, υγρασία και σύσταση της ατμόσφαιρας. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα η καταγραφή των καιρικών συνθηκών σε μια περιοχή γίνεται πολύ ακριβής και έτσι διευκολύνεται ακόμη περισσότερο η πρόβλεψή τους. Μια εξαίρεση στον κανόνα τέτοιου είδους εφαρμογών είναι οι περιοχές με ιδιαίτερα καιρικά φαινόμενα, όπως ομίχλη. Με χρήση τέτοιων αισθητήρων το σύστημα φωτισμού μπορεί να αναγνωρίσει πότε οι περιβαλλοντικές συνθήκες (υγρασία, ηλιοφάνεια) είναι τέτοιες ώστε να υπάρχει ομίχλη, και ως αποτέλεσμα να προσαρμοστεί αυξάνοντας τη φωτεινή ροή των φωτιστικών, όπου αυτό είναι δυνατό για αύξηση της ορατότητας.^{[89] [90]}

4. Παρούσα κατάσταση στο κτιριακό συγκρότημα της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

4.1. Υπάρχον σύστημα εξωτερικού φωτισμού

Στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου υπάρχουν συνολικά 1.374 φωτιστικά:

1) 193 φωτιστικά με λαμπτήρες ατμών υψηλής πίεσης (HPS) ισχύος 250W, εκ των οποίων τα 35 χρησιμοποιούνται ως προβολείς σε κορυφές κτηρίων και τα 158 είναι τοποθετημένα σε ιστούς.



Εικόνα 22 – Φωτιστικά με λαμπτήρες ατμών υψηλής πίεσης στο Ε.Μ.Π.

2) 111 φωτιστικά με λαμπτήρες ατμών χαμηλής πίεσης (LPS) ισχύος 90W τοποθετημένα σε ιστούς.



Εικόνα 23– Φωτιστικά με λαμπτήρες ατμών χαμηλής πίεσης στο Ε.Μ.Π.

3) 783 φωτιστικά με συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (CFL) ισχύος 48W τοποθετημένα σε ιστούς.



Εικόνα 24 – Φωτιστικά με συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού στο Ε.Μ.Π.

4) 287 προβολείς με λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων, τοποθετημένοι σε κορυφές διαφόρων κτιρίων. Από αυτούς, οι 208 καταναλώνουν 400W και οι 79 καταναλώνουν 250W.



Εικόνα 25 – Φωτιστικά με λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων στο Ε.Μ.Π.

4.2. Ετήσιο κόστος λειτουργίας

Το σύστημα φωτισμού του Ε.Μ.Π. ακολουθεί το σύστημα οδοφωτισμού του δήμου Αθηνών, στον οποίο ανήκει. Τα σύστημα ενεργοποιείται κάθε μέρα του χρόνου βάσει της ώρας δύσης του ηλίου και απενεργοποιείται βάσει της ώρας ανατολής. Συγκεκριμένα, το σύστημα φωτισμού ενεργοποιείται μισή ώρα πριν τη δύση του ηλίου και απενεργοποιείται μισή ώρα πριν ανατολή. Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής ως πρότυπο χρονιάς θα χρησιμοποιηθεί το 2020. Κατά τη χρονιά αυτή η συνολική διάρκεια λειτουργίας του συστήματος οδοφωτισμού του Ε.Μ.Π. είναι 3978 ώρες.

Για τα φωτιστικά που είναι εγκατεστημένα τα δεδομένα που φαίνονται στον «Πίνακα 4».

Πίνακας 4 – Υπάρχοντα φωτιστικά στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Τύπος φωτιστικού	Πλήθος φωτιστικών	Κατανάλωση λαμπτήρα (W)	Κατανάλωση ballast (W) (~10%)	Κατανάλωση φωτιστικού (W)
Ατμών νατρίου υψηλής πίεσης	193	250	25	275
Ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης	111	90	10	100
Συμπαγείς φθορισμού	783	48	–	48
Μεταλλικών αλογονιδίων	208	400	40	440
Μεταλλικών αλογονιδίων	79	250	25	275

Για διευκόλυνση θα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός που φαίνεται στον «Πίνακα 5» για τη συντομία στην ονομασία των ειδών λαμπτήρων.

Πίνακας 5 – Κωδικοποίηση τύπων φωτιστικών

Συμβολισμός	Τύπος φωτιστικού
HPS	Ατμών νατρίου υψηλής πίεσης
LPS	Ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης
CFL	Συμπαγείς φθορισμού
MH	Μεταλλικών αλογονιδίων

Πίνακας 6 – Εγκατεστημένη ισχύς υπαρχόντων φωτιστικών

Τύπος φωτιστικού	Κατανάλωση φωτιστικού (W)	Πλήθος φωτιστικών	Ισχύς (W)
HPS	275	193	53.075
LPS	100	111	11.100
CFL	48	783	37.584
MH	440	208	91.520
	275	79	21.725
Συνολικά			215,5 kW

Πίνακας 7 – Κατανάλωση ενέργειας υπαρχόντων φωτιστικών

Τύπος φωτιστικού	Κατανάλωση φωτιστικού (W)	Πλήθος φωτιστικών	Ώρες λειτουργίας	Ετήσια κατανάλωση (kWh)
HPS	275	193	3978 h/year	211.132
LPS	100	111		44.156
CFL	48	783		149.509
MH	440	208		450.489
	275	79		
Συνολικά				855.286 kWh

Συνεπώς, σύμφωνα με τον «Πίνακα 7» η κατανάλωση ενέργειας των υπαρχόντων φωτιστικών είναι 855.286 kWh. Το Ε.Μ.Π. χρεώνεται βάσει του τιμολογίου ΒΜ1-10 της ΔΕΗ. Το εν λόγω τιμολόγιο δεν βρίσκεται στην ιστοσελίδα της ΔΕΗ, ενώ παράλληλα δεν είναι προσβάσιμο πουθενά στο διαδίκτυο για την άντληση των απαραίτητων στοιχείων για τις χρεώσεις του. Προκειμένου να μη γίνει τυχαία εκτίμηση, θα χρησιμοποιηθεί το εμπορικό τιμολόγιο ΒΓ της ΔΕΗ, το οποίο είναι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και αφορά εμπορικούς και βιομηχανικούς πελάτες μέσης τάσης. Έτσι, οι χρεώσεις ανά kWh για κάθε μέρα και ώρα είναι οι εξής:

Χρέωση Προμήθειας Ενέργειας

Πίνακας 8 – Τιμολογιακές τιμές χρέωσης ενέργειας

Ημέρες	Ώρες	Τιμή (€/kWh)
Εργάσιμες ημέρες (250 ημέρες/έτος)	07:00 – 23:00	0,07045
	23:00 – 07:00	0,05548
Σάββατα, Κυριακές και αργίες (115 ημέρες/έτος)	00:00 – 24:00	0,05548

Χρέωση Προμήθειας Ισχύος

Πίνακας 9 – Τιμολογιακές τιμές χρέωσης Ισχύος

Τιμή (€/kW/μήνα)
6,66

Ρυθμιζόμενες Χρεώσεις

Πίνακας 10 – Τιμολογιακές τιμές ρυθμιζόμενων χρεώσεων

Σύστημα Μεταφοράς	Δίκτυο Διανομής		Λοιπές Χρεώσεις (€/kWh)	ΕΤΜΕΑΡ (€/kWh)	ΥΚΩ (€/kWh)	
	Χρέωση Ισχύος (Μοναδιαία Πάγια Χρέωση) (€/kW/μήνα)	Χρέωση Ενέργειας (Μοναδιαία Μεταβλητή Χρέωση) (€/kWh)				
	1,197	1,097	0,0028	0,00007	0,00878	0,01790

Βάσει των ωρών ανατολής και δύσης του ηλίου οι ώρες λειτουργίας σε κάθε μια από τις ζώνες λειτουργίας και η αντίστοιχη χρέωση προμήθειας ισχύος φαίνονται στον «Πίνακα 11».

Πίνακας 11 – Αντιστοιχία ωρών λειτουργίας σε ζώνες λειτουργίας

Ζώνη λειτουργίας	Τιμή (€/kWh)	Ώρες/έτος
Εργάσιμες ημέρες 07:00 – 23:00 (250 ημέρες/έτος)	0,07045	873,63
Εργάσιμες ημέρες 23:00 – 07:00 & Σάββατα, Κυριακές και αργίες 00:00 – 24:00 (115 ημέρες/έτος)	0,05548	3.104,37

Πίνακας 12 – Χρέωση ενέργειας ανά ζώνη λειτουργίας

Κόστος (€/kWh)	Εργάσιμες ημέρες 07:00 – 23:00 (250 ημέρες/έτος)	Εργάσιμες ημέρες 23:00 – 07:00 & Σάββατα, Κυριακές και αργίες 00:00 – 24:00 (115 ημέρες/έτος)
Ενέργεια	0,07045 €/kWh	0,05548 €/kWh
Χρέωση Εκπομπών CO ₂	0,00623 €/kWh	
Λοιπές Χρεώσεις	0,00007 €/kWh	
ΕΤΜΕΑΡ	0,00878 €/kWh	
ΥΚΩ	0,0179 €/kWh	
Δίκτυο Διανομής	0,0028 €/kWh	
Σύνολο	0,10623 €/kWh	0,09126 €/kWh
Ειδικός Φόρος Κατανάλωσης (Ε.Φ.Κ.)	0,005 €/kWh * Καταναλισκόμενη Ισχύς	
Φ.Π.Α. 6%	0,06 * (Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος + Ε. Φ. Κ.)	
Ειδικό Τέλος 5%	(Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος – ΕΤΜΕΑΡ + ΕΦΚ) * 0,005	

Ενώ η χρέωση της ισχύος, η οποία χρεώνεται βάσει της Μέγιστης Καταμετρηθείσας Ζήτησης ισχύος ανά μήνα φαίνεται στον «Πίνακα 13».

Πίνακας 13 – Χρέωση Ισχύος

Κόστος	(€/kW/μήνα)
Σύστημα Μεταφοράς	1,197
Σύστημα Διανομής	1,097
Σύνολο	2,294

Πίνακας 14 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	215,5 kW * 873,63 ώρες = 188.267 kWh	20.000€
0,09126 €/kWh	215,5 kW * 3.104,37 ώρες = 668.992 kWh	61.050€
2,294 €/kW/μήνα	215,5 kW * 12 μήνες	5.932€
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		86.984€
0,005 €/kWh	855.286 kWh	4.274€
6%	(86.984 + 4.276)€ = 91.260€	5.474€
5%	(86.984 – 0,00878 * 885.286 + 4.276)€ = 83.487€	435€
Σύνολο		97.165€

Έτσι συνολικά το κόστος ενέργειας και ισχύος για λειτουργία ενός έτους είναι 97.165€, σύμφωνα με τον «Πίνακα 14».

4.3. Ετήσιο κόστος συντήρησης

Στις εγκαταστάσεις φωτισμού η αντικατάσταση των λαμπτήρων είναι πρακτικά η μόνη διαδικασία συντήρησης που απαιτείται. Αν και οι κατασκευαστές φωτιστικών παρέχουν τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής των φωτιστικών, ο πραγματικός χρόνος ζωής αποκλίνει, τόσο λόγω σφαλμάτων όπως η ύπαρξη ελαττωματικών προϊόντων ή η καταστροφή λαμπτήρων από καιρικές συνθήκες, όσο και από την απόκλιση από τον χρόνο ζωής αυτό λόγω ανομοιότητας των προϊόντων.

Το κόστος συντήρησης συνίσταται από το κόστος μίσθωσης του οχήματος για την αντικατάσταση των λαμπτήρων, που ανέρχεται στα 370 ευρώ ανά 8 ώρες, το κόστος εργασίας των τεχνικών είναι 105 ευρώ ανά 8ωρο και το κόστος των λαμπτήρων που αντικαθίστανται. Τα κόστη συμπεριλαμβάνουν Φ.Π.Α. και Ι.Κ.Α. αντίστοιχα και συνολικά είναι 475 € για εργασία 8 ωρών, η οποία ισοδυναμεί με αντικατάσταση 50 λαμπτήρων. Το κόστος εργασίας και μίσθωσης του οχήματος, δηλαδή η υπηρεσία αντικατάστασης των λαμπτήρων αποτελεί το βασικό μέρος του κόστους συντήρησης, και για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό να ελαχιστοποιείται. Δύο μέθοδοι αντικατάστασης ακολουθούνται: η αντικατάσταση των μεμονωμένων ελαττωματικών ή κατεστραμμένων λαμπτήρων και η μαζική αντικατάσταση των λαμπτήρων ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η δεύτερη μέθοδος είναι ευρύτερα διαδεδομένη για εγκαταστάσεις μεγάλου μεγέθους και οδηγεί σε χαμηλότερα έξοδα, που οφείλονται στην οικονομικότερη παραγγελία μεγάλων ποσοτήτων λαμπτήρων για την αντικατάσταση, αντί για την τακτική αγορά μικρότερου αριθμού λαμπτήρων ή την προκαταβολική αγορά και αποθήκευσή τους. Επιπλέον η δεύτερη μέθοδος οδηγεί σε υψηλότερη ποιότητα φωτισμού, καθώς η αντικατάσταση των λαμπτήρων δεν γίνεται κατά το τέλος του χρόνου ζωής τους, που λόγω αποκλίσεων είναι πιθανό πολλοί ήδη να μην παράγουν τον αναγκαίο φωτισμό για την τήρηση των προδιαγραφών, αλλά λίγο νωρίτερα.

Για τον υπολογισμό του τρέχοντος κόστους συντήρησης του συστήματος φωτισμού υπολογίζεται ο αριθμός των λαμπτήρων που χρειάζονται αντικατάσταση ανά έτος για κάθε τύπο φωτιστικού ξεχωριστά, καθώς κάθε τύπος έχει διαφορετική διάρκεια ζωής. Το κόστος του κάθε λαμπτήρα προέκυψε προσεγγιστικά, από αναζήτηση τιμών λαμπτήρων όμοιων χαρακτηριστικών με αυτά που χρησιμοποιούνται στο Ε.Μ.Π. Το διάστημα στο οποίο θα υπολογισθεί το κόστος συντήρησης θα είναι 20 έτη ή 80.000 ώρες λειτουργίας, που συνιστά τη ρεαλιστική εκτίμηση της διάρκειας ζωής των LED chips που επιλέχθηκαν, όπως αναλύεται στην ενότητα 5.1.4. Λόγω του υπολογισμού του κόστους ανά έτος, αυτό παραμένει σταθερό και για διάρκεια ζωής 15 ετών.

Το πλήθος των λαμπτήρων που χρειάζονται αντικατάσταση ανά έτος δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Πλήθος λαμπτήρων που αντικαθίστανται ανά έτος} = \frac{(\text{Σύνολο λαμπτήρων}) * (\text{Ωρες λειτουργίας/έτος})}{\text{Χρόνος ζωής λαμπτήρα σε ώρες}}$$

Πίνακας 15 – Κόστος αγοράς νέων λαμπτήρων

Τύπος φωτιστικού	Πλήθος φωτιστικών	Διάρκεια Ζωής (h)	Κόστος λαμπτήρα (€)	Λαμπτήρες για αντικατάσταση σε 80.000h (~20 έτη)	Συνολικό κόστος αγοράς λαμπτήρων σε ~20 έτη (€)
HPS	193	20.000	18	772	13.896
LPS	111	25.000	14	356	4.973
CFL	783	10.000	8	6.264	50.112
MH	287	15.000	25	1.531	38.267
Συνολικά				8.923	107.248€

Στον «Πίνακα 16» φαίνεται ο υπολογισμός του κόστους μίσθωσης του οχήματος και των τεχνικών για την αντικατάσταση των 4.438 λαμπτήρων.

Πίνακας 16 – Κόστος εργατοωρών

Πλήθος λαμπτήρων	δωρα εργασίας (€)	Κόστος δωρου (€)	Κόστος εργατοωρών (€)
8.923	179	475	85.025€

Συνεπώς το συνολικό κόστος συντήρησης του συστήματος φωτισμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου για 20 έτη είναι:

$$107.248€ + 85.025€ = 192.273€$$

Και

$$\text{Ετήσιο κόστος συντήρησης} = \frac{192.273€}{20} = 9.614€$$

4.4. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας

Αθροίζοντας το ετήσιο κόστος συντήρησης του συστήματος φωτισμού με το ετήσιο κόστος κατανάλωσης, το συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας ανέρχεται σε

$$97.165 € + 9.614€ = 106.779€$$

5. Δράσεις εξοικονόμησης

5.1. Αντικατάσταση των υπαρχόντων φωτιστικών στο συγκρότημα του Ε.Μ.Π.

Η Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου διαθέτει συνολικά 1374 φωτιστικά διαφόρων τύπων, τοποθετημένα σε δρόμους και πεζόδρομους διαφορετικών γεωμετριών και στις κορυφές των κτιρίων. Για να γίνει εφικτή η μελέτη των δρόμων, θα χρησιμοποιηθούν πέντε κάρναβοι για την ομαδοποίηση των επιμέρους δρόμων και πεζοδρόμων για αποδότερη φωτομετρική μελέτη. Τα στοιχεία των πέντε αυτών γεωμετριών φαίνεται στον «Πίνακα 17».

Πίνακας 17 – Χαρακτηριστικά οδών και πεζοδρόμων

A/A	Κωδικός Καννάβου	QTY	Περιγραφή	Διάταξη Ιστών	Οδόστρωμα (m)	Ύψος Φωτεινής Πηγής (m)	Απόσταση Ιστών (m)
1	250 HPS-STR-1	158	Πεζ-Οδοστ-Πεζ	Μονόπλευρη	8,5	8	30
2	90 LPS-STR	111	Πεζ-Οδοστ-Πεζ	Μονόπλευρη	8	9	30
3	CFL-PED-1	227	Πεζοδρ	Μονόπλευρη	2	4	25
4	CFL-PED-2	248	Πεζοδρ	Μονόπλευρη	8	4	20
5	CFL-PED-3	308	Πεζοδρ	Μονόπλευρη	8	4	20
A/A	Κατευθ / Λορ.Κυκλ	Πεζοδρόμια (m)	Προεξοχή (m)	Κλίση Φωτιστικού (°)	Κατανομή Φωτισμού	Τύπος ΦΣ	
1	1/2	1	0-1	0-5	Ασύμμετρη	Οδικό	
2	1/2	1	0-1	0-5	Ασύμμετρη	Οδικό	
3	N/A	N/A	0-1	0-5	Ασύμμετρη	Οδικό	
4	N/A	N/A	0-1	0-5	Ασύμμετρη	Οδικό	
5	N/A	N/A	0	0	Συμμετρική C0-C180 & συμμετρική C90-C270	ΦΣ Κορυφής	

Μελέτη δρόμων

Η μελέτη των δρόμων και πεζοδρόμων, έγινε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο περιορισμό του αριθμού των τύπων φωτιστικών, καθώς το κόστος οποιασδήποτε παραγγελίας προϊόντων μικραίνει όσο το μέγεθος της παραγγελίας αυξάνεται. Επιπλέον, η επιλογή ενός τύπου φωτιστικών οδηγεί σε μεγαλύτερη ομοιομορφία στο σύνολο του κτηριακού συγκροτήματος, ενώ κάνει λιγότερο περίπλοκη τη συντήρηση του συστήματος φωτισμού και την αντικατάσταση προβληματικών λαμπτήρων. Για όλους τους δρόμους ο συντελεστής συντήρησης θα είναι MF = 0,8, ενώ ο τύπος οδοστρώματος για όλες τις μελέτες το R3, με $Q_0 = 0.07$ για στεγνό οδόστρωμα. Πριν την επιλογή φωτιστικών για κάθε τύπου δρόμου και πεζοδρόμου, προέχει η επιλογή κλάσης φωτισμού, η οποία θα γίνεται σε κάθε περίπτωση. Η κατηγοριοποίηση έγινε σύμφωνα με το πρότυπο CEN/TR 13201-1:2014.

Δρόμοι

Για τους δρόμους, δηλαδή τις οδούς A/A 1 και 2, οι επιλογές για τα κριτήρια γίνονται βάσει των χειρίστων συνθηκών. Αυτές οι συνθήκες είναι κατά τις απογευματινές ώρες, όταν δηλαδή το σύστημα φωτισμού μπαίνει σε λειτουργία, τη μεν χειμερινή περίοδο περίπου κατά τις 17:00, την δε εαρινή κατά τις 20:30 μέχρι νωρίς το βράδυ, όπου ο μεγαλύτερος όγκος των φοιτητών και εργαζόμενων έχουν αποχωρήσει. Κατά το χρονικό αυτό διάστημα η κίνηση στους δρόμους αυτούς της Πολυτεχνειούπολης, δεδομένου ότι είναι μιας λωρίδας για κάθε κατεύθυνση, σημαίνει υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο. Παράλληλα, λόγω των στενών πεζοδρομίων, τις ώρες αυτές ο μεγάλος αριθμός πεζών που αποχωρεί από τη Πολυτεχνειούπολη σημαίνει ότι πολλές φορές κάποιος από αυτούς

περπατάνε στο οδόστρωμα και ότι διασχίζουν τους δρόμους από μη προσχεδιασμένα σημεία. Έτσι για τις ώρες αυτές αιχμής, έγιναν οι επιλογές του «Πίνακα 18».

Πίνακας 18 – Χαρακτηριστικά οδών Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

Κριτήριο	Επιλογή	Βάρος
Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας	Χαμηλή ($v < 40\text{km/h}$)	-2
Κυκλοφοριακός φόρτος	Υψηλός (> 45% της μέγιστης χωρητικότητας)	1
Σύνθεση χρηστών	Μεικτή με μεγάλο ποσοστό μη-μηχανοκίνητων	2
Διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας	Όχι	1
Πυκνότητα κόμβων	Υψηλή (< 3 διασταυρώσεις/km)	1
Σταθμευμένα οχήματα	Απόντα	0
Φωτισμός περιβάλλοντος	Χαμηλός	-1
Δυσκολία οδήγησης	Υψηλή	1

Η κλάση βάσει αυτού του πίνακα επιλέγεται μέσω του τύπου:

$$M = 6 - VMS = 6 - \text{άθροισμα βαρών των κριτηρίων}$$

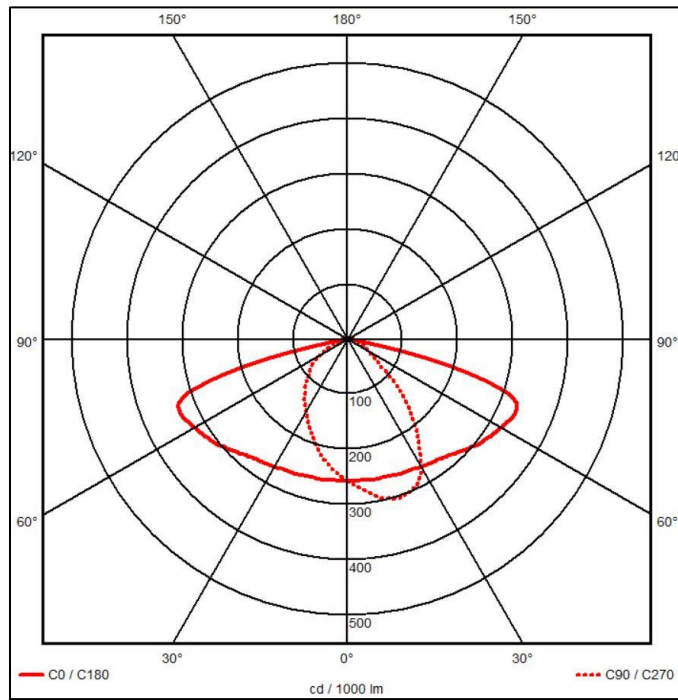
Εν προκειμένω, η κλάση είναι η M3.

Βάσει των παραπάνω, το φωτιστικό που επιλέχθηκε για τους δρόμους της Πολυτεχνειούπολης είναι το φωτιστικό TECEO S 5140 24 XP-G3 της εταιρείας Schreder.



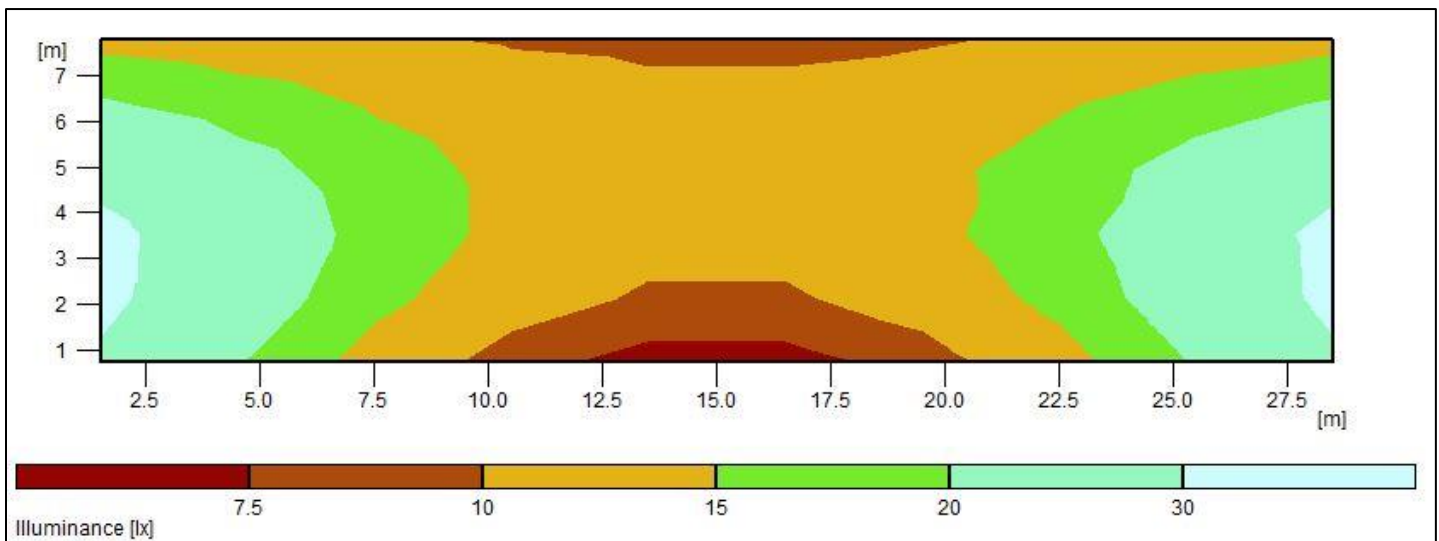
Εικόνα 26 – Φωτιστικό TECEO S 5140 της εταιρείας Schreder

Το φωτιστικό αυτό αποτελείται από 24 LED με ρεύμα οδήγησης 1000 mA και ισχύ 78 W. Η απόδοση του φωτιστικού είναι 105,91 lm/W, ενώ η χρωματική του απόδοση για τα LED chips θερμοκρασίας χρώματος 3000 K είναι 70%. Η θερμοκρασία αυτή επιλέχθηκε αφενός λόγω της υψηλής χρωματικής απόδοσης που έχει, αφετέρου διότι βρίσκεται ανάμεσα στο υπερβολικά ζεστό χρώμα το οποίο δημιουργεί αφύσικο φωτισμό στους εξωτερικούς χώρους, αλλά και το απόλυτα ουδέτερο λευκό των 4000 βαθμών Kelvin.

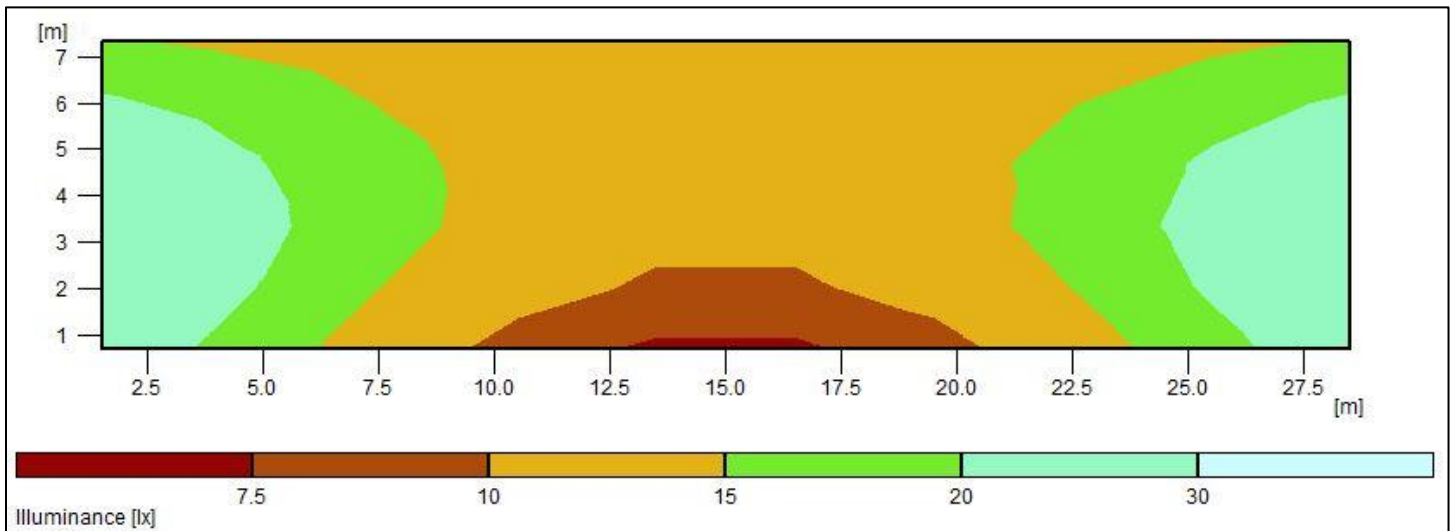


Εικόνα 27– Πολικό διάγραμμα φωτιστικού TECEO S 5140

Για το δρόμο A/A 1, έχουμε το εξής διάγραμμα ψευδοχρωμάτων για την απεικόνιση της φωτεινότητας από την προσομοίωση:



Εικόνα 28 – Προσομοίωση δρόμου A/A 1



Εικόνα 29 – Προσομοίωση δρόμου A/A 2

Παρακάτω φαίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων:

Result	Value	Nominal...
MyLumRow		
▣ TECEO S 5140 Flat glass Light Exha...		
Lum. intensity cl...	G*2	--
Glare index cla...	D5	--
Power	78 W/10...	--
Load/km	2600 W/...	--
Road		
▣ L(1). M3		
Em	1.03 cd/m ²	>= 1.00 c...
Uo	0.46	>= 0.40
UI	0.90	>= 0.60
TI	11	<= 15
Rei	0.35	>= 0.30
▣ L(2). M3		
Em	1.11 cd/m ²	>= 1.00 c...
Uo	0.45	>= 0.40
UI	0.89	>= 0.60
TI	9	<= 15
Rei	0.35	>= 0.30
▣ E. P1		
Em	16.4 lx	>= 15.0 lx
Emin	6.53 lx	>= 3.00 lx
▣ Border area (left)		
▣ E. P3		
Em	8.05 lx	>= 7.50 lx
Emin	6.82 lx	>= 1.50 lx
▣ Border area (right)		
▣ E. P3		
Em	12.0 lx	>= 7.50 lx
Emin	3.95 lx	>= 1.50 lx

Εικόνα 30 – Αποτελέσματα A/A 1

Result	Value	Nominal...
MyLumRow		
▣ TECEO S 5140 Flat glass Light Exha...		
Lum. intensity cl...	G*2	--
Glare index cla...	D5	--
Power	78 W/10...	--
Load/km	2600 W/...	--
Road		
▣ L(1). M3		
Em	1.00 cd/m ²	>= 1.00 c...
Uo	0.58	>= 0.40
UI	0.95	>= 0.60
TI	9	<= 15
Rei	0.46	>= 0.30
▣ L(2). M3		
Em	1.08 cd/m ²	>= 1.00 c...
Uo	0.58	>= 0.40
UI	0.96	>= 0.60
TI	8	<= 15
Rei	0.46	>= 0.30
▣ E. P1		
Em	15.6 lx	>= 15.0 lx
Emin	7.04 lx	>= 3.00 lx
▣ Border area (left)		
▣ E. P3		
Em	9.75 lx	>= 7.50 lx
Emin	8.05 lx	>= 1.50 lx
▣ Border area (right)		
▣ E. P3		
Em	11.4 lx	>= 7.50 lx
Emin	4.66 lx	>= 1.50 lx

Εικόνα 31 – Αποτελέσματα A/A 2

Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν με τις προεξοχές (overhang) και κλίσεις φωτιστικών (tilt) του «Πίνακα 19».

Πίνακας 19 – Προεξοχές και κλίσεις φωτιστικών δρόμων

	A/A 1	A/A 2
Overhang (m)	1	1
Tilt (°)	5	4

Οι τιμές των μεγεθών που ορίζονται από τα πρότυπα και για τους δύο δρόμους είναι εξαιρετικά κοντά στις τιμές τους στις δύο προσομοιώσεις, με απόκλιση κατά πολύ μικρότερης του ορίου του 10% από τις ελάχιστες απαιτούμενες τιμές του προτύπου. Στους υπολογισμούς έγινε χρήση του προτύπου P1 για τους δρόμους για να εξαχθούν από το Relux οι τιμές των Em και Emin, οι οποίες είναι χρήσιμες στη συνέχεια της μελέτης.

Παρατηρείται ότι στα αριθμητικά αποτελέσματα μία τιμή σε κάθε προσομοίωση εμφανίζεται με κόκκινο, το οποίο τυπικά σημαίνει ότι οι εν λόγω τιμές βρίσκονται εκτός των ορίων του προτύπου. Εν προκειμένω, οι τιμές αυτές είναι η μέση ένταση φωτισμού για το δεξί πεζοδρόμιο των δρόμων. Οι τιμές είναι υπερβολικά μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες από το πρότυπο, εξού και ο χρωματισμός τους από το Relux. Αυτό οφείλεται στις υψηλές απαιτήσεις φωτισμού των δρόμων σε σχέση με τα εφαπτόμενα σε αυτούς πεζοδρόμια. Δεδομένου ότι με μείωση του φωτισμού δεν πληρούνται οι απαιτήσεις για τους δρόμους, αλλά και ότι ο υπερφωτισμός των πεζοδρομίων δεν συνεπάγεται κάποιο κίνδυνο για τους χρήστες τους, η μελέτη συνεχίζεται με το φωτιστικό αυτό.

Πεζόδρομοι

Όπως φαίνεται στον πίνακα με τα διάφορα είδη δρόμων και πεζοδρομών, το Ε.Μ.Π. έχει πεζοδρόμους που μπορούν κατηγοριοποιηθούν σε τρεις γεωμετρίες. Οι διάφοροι πεζοδρόμοι του Ε.Μ.Π. έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και ανάγκες φωτισμού, αλλά κυρίως έχουν κοινά χαρακτηριστικά όσον αφορά τα κριτήρια επιλογής κλάσης φωτισμού. Τα χαρακτηριστικά των πεζοδρομών της Πολυτεχνειούπολης φαίνονται στον «Πίνακα 20».

Πίνακας 20 - Χαρακτηριστικά πεζοδρομών Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

Κριτήριο	Επιλογή	Βάρος
Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας	Χαμηλή ($v < 40$ km/h)	1
Κυκλοφοριακός φόρτος	Υψηλός	1
Σύνθεση χρηστών	Πεζοί, ποδηλάτες και μηχανοκίνητα	2
Σταθμευμένα οχήματα	Απόντα	0
Φωτισμός περιβάλλοντος	Χαμηλός	-1

Τα οποία ορίζουν την κλάση φωτισμού ως P3, βάσει του τύπου:

$$P = 6 - VMS = 6 - \text{άθροισμα βαρών των κριτηρίων}$$

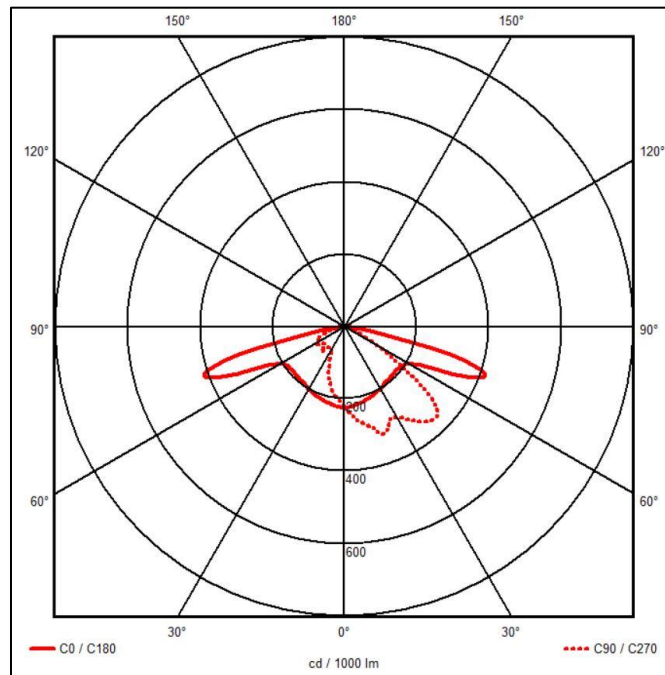
Επισημαίνεται ότι η σύνθεση χρηστών ορίστηκε ως «πεζοί, ποδηλάτες και μηχανοκίνητα», για να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό της κλάσης, πως σε πολλούς από τους πεζοδρόμους του Ε.Μ.Π. κινούνται μοτοσικλετιστές. Αν και η κίνησή τους στους πεζοδρόμους αυτούς είναι παράτυπη, αυξάνει την επικινδυνότητα των πεζών και ποδηλατών και για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε σαν να είναι τακτική αυτή η κίνηση των μοτοσικλετιστών στους πεζοδρόμους.

Για τους πεζοδρόμους Α/Α 3 και 4 απαιτείται η χρήση οδικού φωτιστικού. Ομοίως με τα φωτιστικά δρόμων, το φωτιστικό που επιλέχθηκε είναι το TECEO S 24 XP-G3 της εταιρείας Schreder, το οποίο φαίνεται στο σχήμα. Ωστόσο, θα επιλεγεί το φωτιστικό 5249, του οποίου ο φακός καθώς παρέχει καλύτερη κατανομή του φωτισμού για τις γεωμετρίες αυτές.



Εικόνα 32 – Φωτιστικό TECEO S 5249 της εταιρείας Schreder

Το φωτιστικό αυτό αποτελείται από 24 LED με ρεύμα οδήγησης 200 mA και ισχύ 15,4 W. Η απόδοση του φωτιστικού είναι 166,6 lm/W και επιλέχθηκε το φωτιστικό με θερμοκρασία χρώματος 3000 βαθμών Kelvin, όπου το φωτιστικό έχει 80 CRI.



Εικόνα 33 – Πολικό διάγραμμα φωτιστικού TECEO S 5249

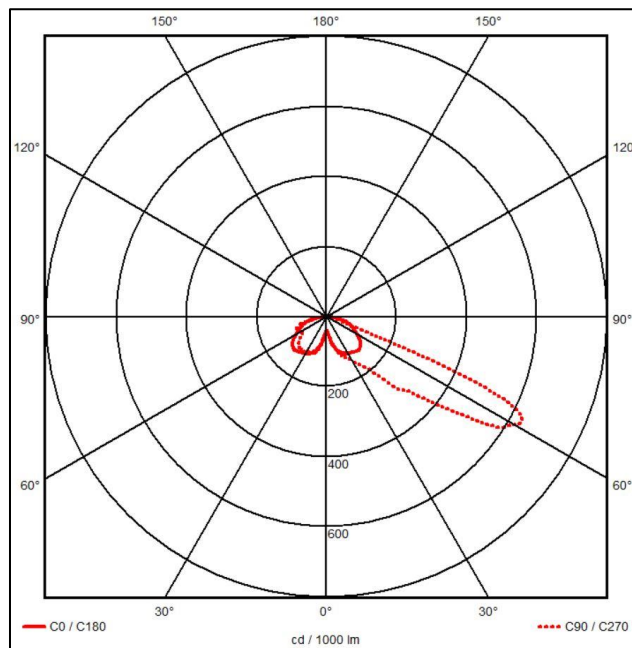
Το φωτιστικό που επιλέχθηκε για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού του πεζόδρομου A/A 5 είναι το PILZEO 5121 16 XP-G3 της εταιρείας Schreder.



Εικόνα 34 – Φωτιστικό PILZEO 5121 της εταιρείας Schreder

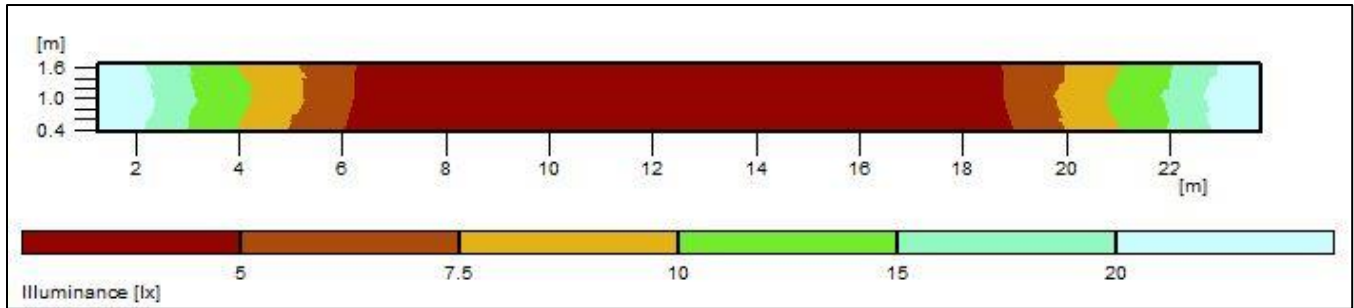
Το εν λόγω φωτιστικό αποτελείται από 16 LED, με ρεύμα οδήγησης 400 mA και ισχύ 20,5 W. Η απόδοση του φωτιστικού είναι 154,1 lm/W και επιλέχθηκε το φωτιστικό με θερμοκρασία χρώματος 3000 βαθμών Kelvin. Στη θερμοκρασία αυτή χρώματος, το φωτιστικό έχει CRI 80.

Ακολουθεί το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού:

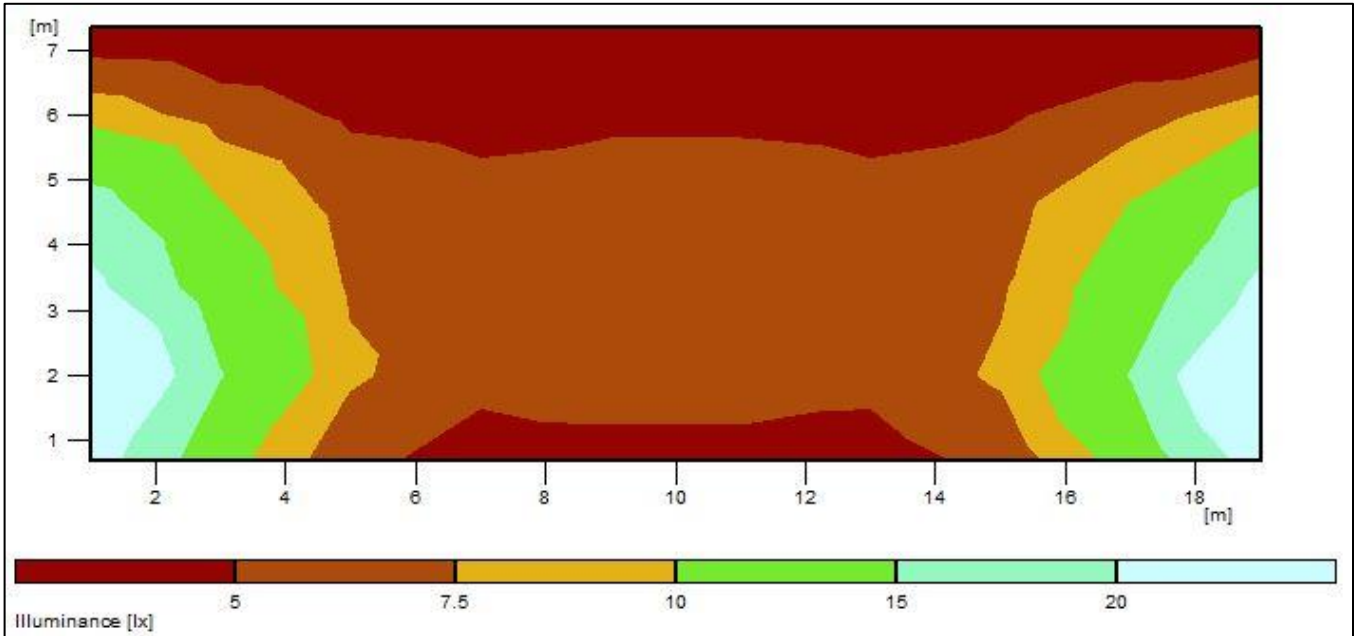


Εικόνα 35 – Πολικό διάγραμμα φωτιστικού PILZEO 5121

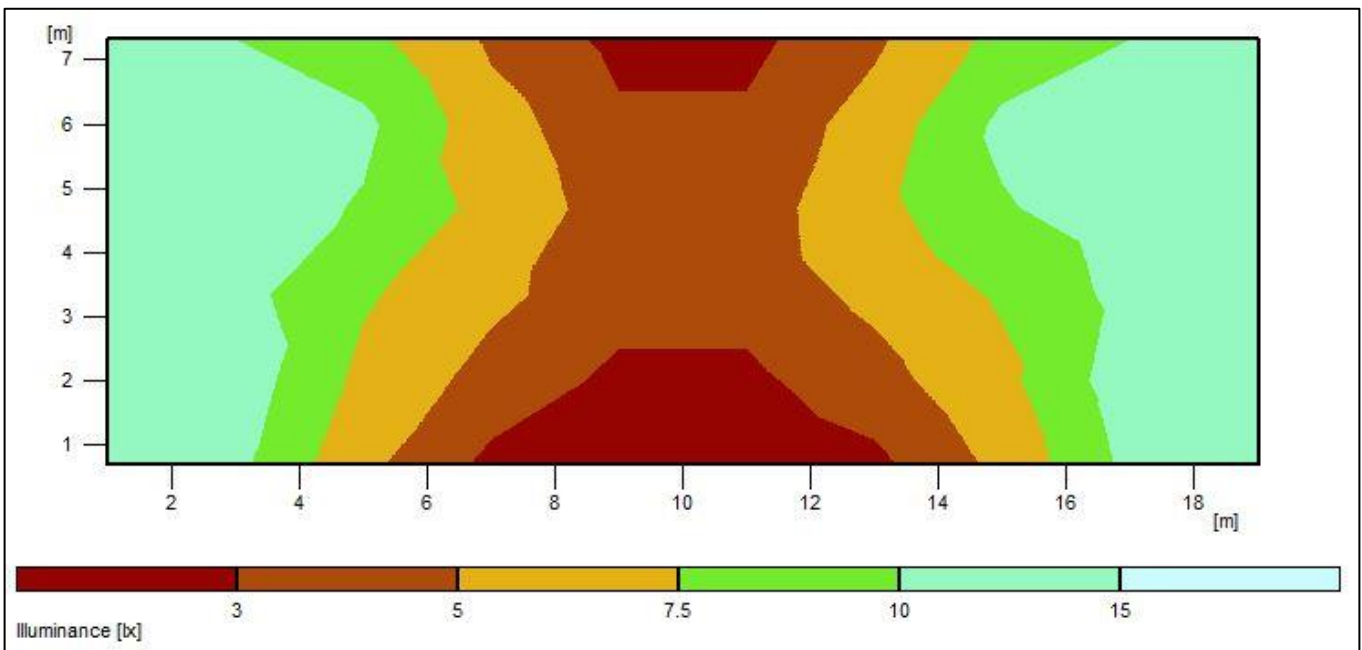
Έτσι οι προσομοιώσεις των πεζόδρομων απέφεραν τα ακόλουθα αποτελέσματα ψευδοχρωμάτων:



Εικόνα 36 – Προσομοίωση πεζόδρομου A/A 3



Εικόνα 37 – Προσομοίωση πεζόδρομου A/A 4



Εικόνα 38 – Προσομοίωση πεζόδρομου A/A 5

Τα αναλυτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής:

Illuminance		Calculation field: 25m x 2m (10 x 3 pts)		
	\bar{E}_m	E_{min}	U_0	U_d
	9.84 lx	3.28 lx	0.33	0.12
P3	≥ 7.50 lx	≥ 1.50 lx		

Εικόνα 39 – Αποτελέσματα A/A 3

Illuminance		Calculation field: 20m x 8m (10 x 6 pts)		
	\bar{E}_m	E_{min}	U_0	U_d
	8.36 lx	1.81 lx	0.22	0.06
P3	≥ 7.50 lx	≥ 1.50 lx		

Εικόνα 40– Αποτελέσματα A/A 4

Illuminance		Calculation field: 25m x 2m (10 x 3 pts)		
	\bar{E}_m	E_{min}	U_0	U_d
	9.84 lx	3.28 lx	0.33	0.12
P3	≥ 7.50 lx	≥ 1.50 lx		

Εικόνα 41 – Αποτελέσματα A/A 5

Τα παραπάνω προέκυψαν με τις επιλογές του «Πίνακα 21».

Πίνακας 21 – Προεξοχές και κλίσεις φωτιστικών πεζόδρομων

	A/A 3	A/A 4	A/A 5
Overhang (m)	0	1	0
Tilt (°)	0	0	0

5.1.2. Ενεργειακή αξιολόγηση της αναβαθμισμένης εγκατάστασης

Για τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν θα υπολογιστούν οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης τμηματικά βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ EN 13201-5. Οι δείκτες αυτοί είναι ποιοτικοί και δίνουν μόνο μια χονδρική εικόνα της ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης, χρησιμοποιούνται ωστόσο για τη σύγκριση διαφορετικών λύσεων μιας εγκατάστασης ή παρόμοιων εγκαταστάσεων, παρέχοντας έναν τρόπο αξιολόγησής τους. Για το λόγο αυτό οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης θα εκτιμώνται για 2 επιπρόσθετα φωτιστικά διαφορετικών χαρακτηριστικών, κατανομών και ισχύος για να είναι εφικτή η μεταξύ τους σύγκριση.

Τα φωτιστικά που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση των τιμών των ενεργειακών δεικτών των φωτιστικών που επιλέχθηκαν ονομάζονται τυπικά A(5117-78W) και B(5250-78W) για τους δρόμους, C(5141-9,8W) και D(5117-13,7W) για τους πεζόδρομους A/A 3 και 4, και E(5117-18,5W) και F(5139-23,5W) για τους πεζόδρομους A/A 5. Τα φωτιστικά αυτά και τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεών τους φαίνονται στον «Πίνακα 22».

Πίνακας 22 – Χαρακτηριστικά εναλλακτικών φωτιστικών

Φωτιστικό	A	B	A	B
Ισχύς (W)	100,3	107,7	100,3	107,7
Φωτεινή ροή (lm)	12.910	13.860	12.910	13.860
	Δρόμος A/A 1		Δρόμος A/A 2	
Προεξοχή (m)	1,0	1,0	1,0	1,0
Tilt (°)	5,0	5,0	4,0	0,0
Lm (cd/m ²)	1,09	1,08	1,04	1,04
Ομοιομορφία - U ₀	0,62	0,40	0,66	0,45
U _i	0,82	0,80	0,87	0,80
T _i (%)	11,0	10,0	9,5	9,0
Re _i	0,67	0,62	0,72	0,69
Em (lx)	16,0	15,8	14,6	14,8
E _{min} (lx)	8,52	6,54	8,70	7,04
Em (lx) πεζοδρομίου 1	13,5	9,73	12,4	15,0
Em (lx) πεζοδρομίου 2	13,4	16,6	13,4	9,78
Em,total (lx)	15,36	15,27	14,26	14,32
Φωτιστικό	C	D	C	D
Ισχύς (W)	16,2	19,1	18,3	19,1
Φωτεινή ροή (lm)	2.340	2.710	2.650	2.710
	Πεζόδρομος A/A 3		Πεζόδρομος A/A 4	
Προεξοχή (m)	0,0	0,0	1,0	0,0
Tilt (°)	0,0	0,0	1,0	3,0
Ομοιομορφία - U ₀	0,18	0,24	0,32	0,32
Em (lx)	8,33	8,19	8,22	7,80
E _{min} (lx)	1,54	1,96	2,67	2,48
Φωτιστικό	E	F		
Ισχύς (W)	29,5	30		
Φωτεινή ροή (lm)	3.800	4.120		
	Πεζόδρομος A/A 5			
Ομοιομορφία - U ₀	0,15	0,13		
Em (lx)	10,8	11,6		
E _{min} (lx)	1,60	1,50		

1) Δείκτης πυκνότητας ισχύος – Power Density Indicator

Ο δείκτης αυτός δίνει μια εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος φωτισμού, υπολογίζοντας πόση ισχύς είναι απαραίτητη για το φωτισμό δεδομένης έκτασης εγκατάστασης.

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (E_i * A_i)} \frac{E}{lx * m^2}$$

όπου:

D_p: Δείκτης πυκνότητας ισχύος

P: Η συνολική ισχύς των φωτιστικών που καλύπτουν την υπό εξέταση περιοχή

E_i: Η μέση ένταση οριζόντιου φωτισμού της υποπεριοχής i

A_i: Το εμβαδόν της υποπεριοχής i που φωτίζεται από το σύστημα φωτισμού

n: Ο αριθμός των φωτιζόμενων υποπεριοχών

Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιείται μόνο μια υποπεριοχή της εγκατάστασης, ως αντιπροσωπευτική όλων των υποπεριοχών που αποτελούν το συνολικό δρόμο ή πεζόδρομο προς μελέτη.

2) Ετήσιος δείκτης ενεργειακής κατανάλωσης – Annual Energy Consumption Indicator

Ο δείκτης αυτός δίνει μια εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος φωτισμού από πλευράς καταναλισκόμενης ενέργειας για δεδομένο χρονικό διάστημα.

$$D_e = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j * t_j) Wh}{A \frac{m^2}{m^2}}$$

όπου:

D_e: Ετήσιος δείκτης ενεργειακής κατανάλωσης

P_j: Η συνολική ισχύς των φωτιστικών που καλύπτουν την υπό εξέταση περιοχή το χρονικό διάστημα λειτουργίας j

t_j: Η διάρκεια της περιόδου λειτουργίας j

A: Το εμβαδόν της περιοχής που φωτίζεται από το σύστημα φωτισμού

m: Ο αριθμός διαφορετικών περιόδων λειτουργίας

Όπως με το δείκτη ενεργειακής πυκνότητας, για το δείκτη ενεργειακής κατανάλωσης θα χρησιμοποιηθούν φωτιστικά ίδιου τύπου με τα επιλεγμένα για την προσομοίωση των εναλλακτικών φωτιστικών, ώστε να υπάρχει ένα ποιοτικό μέτρο σύγκρισης.

3) Συντελεστής λαμπρότητας

Ο συντελεστής λαμπρότητας είναι ένα μέγεθος που βοηθάει με την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης του συστήματος. Αντίθετα με τους προηγούμενους δύο δείκτες, μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή χαρακτηρίζουν εγκαταστάσεις με μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, με τις τιμές του να κυμαίνονται από 0,8 με 1,3. Μια αύξηση από το 0,8 στο 1,3 συνεπάγεται 40% μείωση του δείκτη ενεργειακής πυκνότητας D_p. Όπως και οι προηγούμενοι δείκτες, ο συντελεστής λαμπρότητας καθιστά εύκολη τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης διαφορετικών φωτιστικών.

$$q_{inst} = \frac{\bar{L}}{\bar{E} * Q_0}$$

όπου:

q_{inst}: Συντελεστής λαμπρότητας

L̄: Η μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος

Ē: Η μέση ένταση φωτισμού στο οδόστρωμα

Q₀: Η συνολική ανακλαστικότητα της ασφάλτου

4) Δείκτης συνολικής απόδοσης της εγκατάστασης

$$n_{inst} = C_L * f_M * U * R_{LO} * n_{ls} * n_p$$

όπου:

n_{inst}: Η συνολική απόδοση της εγκατάστασης οδοφωτισμού

C_L: Συντελεστής διόρθωσης λαμπρότητας

f_M: Ο συνολικός συντελεστής συντήρησης της εγκατάστασης

U: Ο συντελεστής χρησιμοποίησης της εγκατάστασης

R_{LO}: Η οπτική απόδοση των φωτιστικών σωμάτων

n_{ls}: Η απόδοση των φωτεινών πηγών σε lm/W

n_p: Η απόδοση ισχύος των φωτιστικών σωμάτων

4.1) Συντελεστής διόρθωσης λαμπρότητας

Εφόσον το κριτήριο αξιολόγησης των προς μελέτη περιοχών είναι η ελάχιστη φωτεινότητα, η δυνατότητα της εγκατάστασης να παρέχει φωτεινότητα ίσως είναι διαφορετική από την προβλεπόμενη, λόγω απόκλισης της τιμής της ανακλαστικότητας της επιφάνειας από αυτήν που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς ή λόγω συγκεκριμένης κατεύθυνσης του φωτός που παράγεται. Ο συντελεστής διόρθωσης λαμπρότητας που λαμβάνει υπόψιν τους παραπάνω δύο παράγοντες υπολογίζεται ως:

$$C_L = \sum_{i=1}^n (\overline{E_{i,min}} * A_i) / \Phi_A$$

όπου:

$E_{i,min}$: Η ελάχιστη απαιτούμενη μέση φωτεινότητα

A_i : Το εμβαδόν της υποπεριοχής στην οποία η ελάχιστη απαιτούμενη μέση φωτεινότητα εφαρμόζεται

Φ_A : Η φωτεινή ροή που φθάνει την προς φωτισμό περιοχή

n : Ο αριθμός των προς φωτισμό περιοχών

Για περιοχή A_i που το φωτιστικό κριτήριο σχεδιασμού είναι η ελάχιστη φωτεινότητα, όπως στις προσομοιώσεις που έγιναν, οι τιμές της ελάχιστης απαιτούμενης μέση φωτεινότητας αντικαθίστανται ως:

$$E_{i,min} = \frac{L_{i,min}}{0,07}$$

4.2) Συντελεστής χρησιμοποίησης της εγκατάστασης

$$U = \frac{\Phi_A}{n_{lu} * \Phi_{ls} * R_{LO}}$$

όπου:

Φ_A : Η φωτεινή ροή που φθάνει την προς φωτισμό περιοχή

Φ_{ls} : Η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από τη φωτεινή πηγή στο φωτιστικό

R_{LO} : Η οπτική απόδοση των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται στη φωτεινή εγκατάσταση

n_{lu} : Ο αριθμός των φωτιστικών στη διάταξη

4.3) Απόδοση ισχύος φωτιστικών σωμάτων

Η απόδοση φωτεινότητας ενός φωτιστικού είναι κατά κανόνα χαμηλότερη από αυτή ενός λαμπτήρα λόγω οπτικών απωλειών και κατανάλωση εξοπλισμού (driver/ballast). Η απόδοση ισχύος ενός φωτιστικού είναι ο λόγος της ισχύος των λαμπτήρων με τη συνολική ισχύ των φωτιστικών:

$$n_p = \frac{P_{ls}}{P}$$

Ο παράγοντας αυτός είναι σημαντικός κυρίως για φωτιστικά παλαιότερης τεχνολογίας, όπου τα παρεμφερή ηλεκτρονικά στοιχεία και ειδικά το ballast, καταναλώνει σημαντικό ποσό ισχύος, συγκρίσιμο με την ισχύ του λαμπτήρα. Ωστόσο στην εγκατάσταση χρησιμοποιούνται LED, όπου αφενός δεν χρησιμοποιούν ballast και αφετέρου οι κατασκευαστές παρέχουν μόνο μια ισχύ κατανάλωσης λόγω του ότι η απόδοση ισχύος των φωτιστικών LED είναι κατά καλή προσέγγιση 1.

Η οπτική απόδοση των φωτιστικών σωμάτων, R_{lo} , λαμβάνεται ίση με 1, ενώ ο συντελεστής συντήρησης της εγκατάστασης ίσος με 0,8.

Βάσει των παραπάνω γίνεται ο υπολογισμός των ενεργειακών δεικτών, των οποίων οι τιμές φαίνονται στους «Πίνακες 23, 24».

Πίνακας 23 – Τιμές συντελεστών αξιολόγησης δρόμων

Φωτιστικό		Δρόμος 1			Δρόμος 2		
		TECEO S 5140	A	B	TECEO S 5140	A	B
Δείκτης	Dp	16,29	20,73	22,39	17,81	23,45	25,07
	De	0,985	1,267	1,360	1,034	1,330	1,428
	Qinst	0,979	1,002	0,998	0,979	1,002	0,998
	Ninst	46,15	35,89	33,43	43,96	34,18	31,83

Πίνακας 24 – Τιμές συντελεστών αξιολόγησης πεζόδρομων

Φωτιστικό		Πεζόδρομος 3			Πεζόδρομος 4		
		TECEO S 5249	C	D	TECEO S 5249	C	D
Δείκτης	Dp	195,63	243,10	291,51	76,75	82,12	102,03
	De	7,658	8,055	9,497	2,553	2,685	3,166
	Qinst	-	-	-	-	-	-
	Ninst	3,12	2,96	2,51	9,35	8,89	7,54
Φωτιστικό		Πεζόδρομος 5					
		PILZEO 5121	E	F			
Δείκτης	Dp	86,31	113,81	107,76			
	De	3,398	4,890	4,973			
	Qinst	-	-	-			
	Ninst	7,02	4,88	4,80			

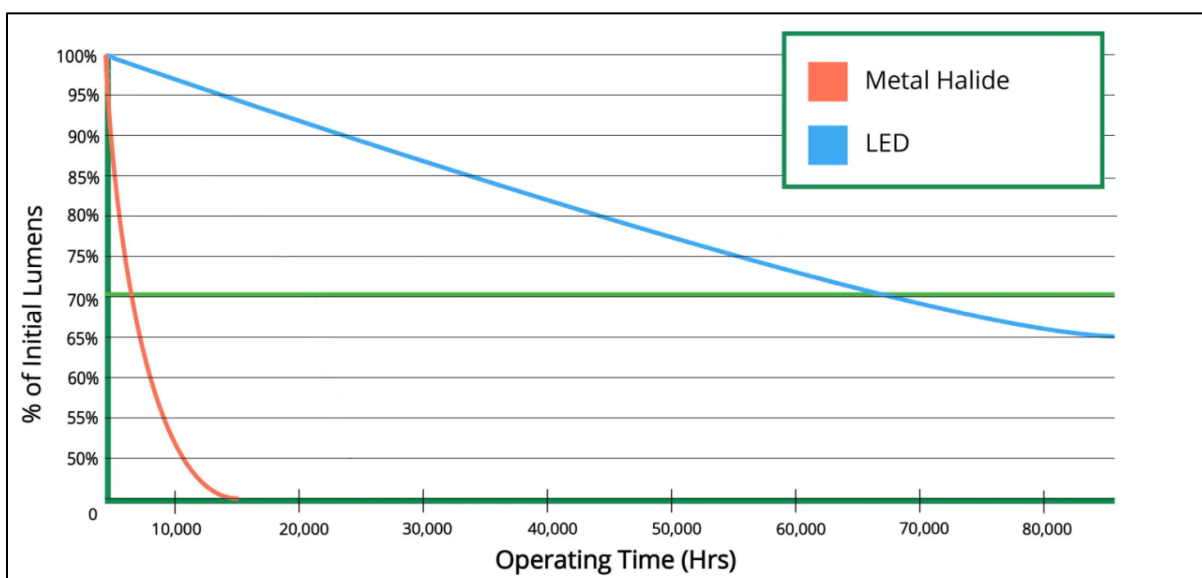
Όπως είναι θεμιτό, οι προσομοιώσεις των εναλλακτικών φωτιστικών οδηγούν σε λιγότερο ενεργειακά αποδοτικές λύσεις. Συγκεκριμένα, το επιλεγμένο φωτιστικό TECEO S 5140 έχει σημαντικά μικρότερο δείκτη ενεργειακής πυκνότητας και ετήσιο δείκτη ενεργειακής απόδοσης, καθώς και σημαντικά μεγαλύτερο δείκτη συνολικής απόδοσης της εγκατάστασης από τα εναλλακτικά δύο φωτιστικά. Το ίδιο ισχύει και για τους πεζόδρομους, όπου το TECEO S 5249 και το PILZEO 5121 οδηγούν σε αντίστοιχα αποτελέσματα για τους ενεργειακούς δείκτες που τους αφορούν, δηλαδή όλους πλην του συντελεστή λαμπρότητας, καθώς αυτό είναι κάτι δεν έχει σημαντική επίπτωση για τους χρήστες πεζοδρόμων. Ενώ λοιπόν τα επιλεγμένα φωτιστικά είναι από κάθε άποψη ενεργειακά ανώτερα από τα εναλλακτικά, ο συντελεστής λαμπρότητας του φωτιστικού B παρουσιάζεται να έχει οριακά καλύτερη τιμή. Αυτό συμβαίνει διότι η ασφαλτος είναι μια ατελής, μη ιδανική επιφάνεια, που οδηγεί σε αρκετά απρόβλεπτες γωνίες ανάκλασης του προσπίπτοντος φωτισμού. Αν και το S 5140 έχει καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά βάσει όλων των σχετικών κριτηρίων, είναι πιθανό το οπτικό, που χρησιμοποιείται ακριβώς για να επιτυγχάνει την καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά και τη βέλτιστη μέση ένταση φωτισμού με τη χαμηλότερη δυνατή ισχύ, να προκαλεί ελαφρά αυξημένη λαμπρότητα υπό συγκεκριμένες γωνίες. Δεδομένου ότι το φωτιστικό B έχει καλύτερη τιμή συντελεστή λαμπρότητας κατά λιγότερο από 2%, είναι εμφανές ότι το φωτιστικό TECEO S 5140 είναι ενεργειακά πολύ αποδοτικό και οδηγεί σε πολύ καλή τιμή του συντελεστή λαμπρότητας.

5.1.3. Ετήσιο κόστος λειτουργίας

Ο υπάρχων εξωτερικός φωτισμός ακολουθεί το συμβατικό τρόπο λειτουργίας, που είναι: ενεργοποίηση μισή ώρα πριν τη δύση του ηλίου και απενεργοποίηση μισή ώρα πριν την ανατολή. Αυτό συμβαίνει ανεξαρτήτως κίνησης εντός του κτιριακού συγκροτήματος και του αν η ημέρα είναι καθημερινή ή ημέρα όπου οι σχολές και οι διοικητικές υπηρεσίες τους δε λειτουργούν. Στο σενάριο αυτό η εξοικονόμηση έγκειται στην αποδοτικότητα των προτεινόμενων φωτιστικών σωμάτων έναντι αυτών που απαρτίζουν το υπάρχον σύστημα φωτισμού.

Για το σκοπό αυτό, τα φωτιστικά που θα χρησιμοποιηθούν για τους δρόμους και πεζόδρομους του ΕΜΠ είναι το TECEO S 5140, το TECEO S 5249 και το PILZEO 5118. Το S 5140 θα αντικαταστήσει 269 φωτιστικά ατμών νατρίου υψηλής και χαμηλής πίεσης, το S 5149 θα αντικαταστήσει 475 φωτιστικά με λαμπτήρες συμπαγούς φθορισμού, ενώ το 5121 θα αντικαταστήσει 308 φωτιστικά με λαμπτήρες συμπαγούς φθορισμού. Πέραν αυτών

των φωτιστικών θα αντικατασταθούν και οι συνολικά 322 προβολείς οι οποίοι βρίσκονται σε κορυφές κτιρίων, εκ των οποίων οι 35 είναι με λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης, ενώ οι υπόλοιποι 287 είναι με λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων. Η προσομοίωση του φωτισμού των προβολέων αυτών βρίσκεται εκτός του πλαισίου αυτής της μελέτης, και για τον λόγο αυτό θα υπάρξει μια αδρή εκτίμηση. Συγκεκριμένα, τα φωτιστικά λαμπτήρων ατμών νατρίου υψηλής πίεσης θα αντικατασταθούν επίσης με φωτιστικά TECEO S 5140 των 78W. Από τα υπόλοιπα 297 φωτιστικά, τα 208 είναι φωτιστικά ισχύος 400W και τα 79 ισχύος 250W. Για τα φωτιστικά που χρησιμοποιούνται δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία, συνεπώς θα γίνει μια εκτίμηση για τον τύπο φωτιστικών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάστασή τους. Μια τυπική τιμή φωτεινής ροής για λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων ισχύος 400W και 250W είναι 25.000 και 40.000 lumens αντίστοιχα. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η φωτεινή ροή των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων μειώνεται πολύ ταχύτερα από ότι των LED. Έτσι, προκειμένου ο παραγόμενος φωτισμός να μην καταστεί ανεπαρκής σε μικρό χρόνο μετά την εγκατάσταση των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων, αυτοί υπερδιαστασιολογούνται σε κατά πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ότι τα φωτιστικά με λαμπτήρες τύπου LED. Η μείωση της φωτεινής ροής συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας των δύο τεχνολογιών φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 42 – Σύγκριση διάρκειας ζωής LED chips και λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων

Από τα φωτιστικά LED που έχουν επιλεγεί όλα έχουν 100.000 ώρες διάρκεια ζωής - L90 σύμφωνα με τον κατασκευαστή, δηλαδή πως στο τέλος των 100.000 ωρών τα φωτιστικά LED θα παράγουν το 90% της μέγιστης φωτεινής ροής τους, ενώ όπως φαίνεται ποιοτικά από το σχήμα αυτό στους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων γίνεται πολύ νωρίτερα, μέχρι και κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας τους. Βάσει αυτού του κριτηρίου οι προβολείς που θα επιλεγθούν για την αντικατάσταση των προβολέων μεταλλικών αλογονιδίων θα μπορούν να παρέχουν κατά 50% λιγότερη φωτεινή ροή στην αρχή της λειτουργίας τους. Επιπλέον, το γεγονός ότι οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων, αντίθετα από τους LEDs, διαχέουν φως προς όλες τις κατευθύνσεις οδηγεί σε απώλεια περίπου του 30% των παραγόμενων lumens κατά την αντανάκλαση. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψιν είναι εύλογο να θεωρηθεί πως οι προβολείς των 400 W και 250 W με ονομαστική φωτεινή ροή 40.000 και 25.000 lumens μπορούν να αντικατασταθούν με προβολείς LED των 12.000 και 8.100 lumens αντίστοιχα ^[91]
^[92].

Ένα φωτιστικό που καλύπτει τις ανάγκες αυτές της πρώτης κατηγορίας είναι το OMNIstar της εταιρείας Schreder. Το φωτιστικό αυτό παρέχει μεγάλη ποικιλία οπτικών και τιμών ισχύος που το κάνουν ευέλικτο και εφαρμόσιμο σε κάθε εφαρμογή που απαιτεί το φωτισμό μεγάλων επιφανειών, όπως στην περίπτωση των πλατειών και εισόδων κτιρίων του Ε.Μ.Π.

Συγκεκριμένα, για τις ανάγκες του Ε.Μ.Π. το φωτιστικό που επιλέχθηκε είναι το OMNIstar το οποίο αποτελείται από 72 LED και είναι κατανάλωσης 111 W, ρεύματος οδήγησης 500 mA και απόδοσης 143 lm/W. Για θερμοκρασία χρώματος 4000 βαθμών Kelvin, το φωτιστικό παρέχει δείκτη χρωματικής απόδοσης 70, και φωτεινή

ροή 11.200 – 15.400 lumen, που καλύπτουν ακόμα και τις πιο δυσχερείς συνθήκες φωτισμού εντός της Πολυτεχνειούπολης. Το φωτιστικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο και για τα δύο είδη φωτιστικών που αντικαθίστανται, καθώς καλύπτει τις ανάγκες και των δύο περιπτώσεων. Το OMNIstar δίνει πολλές δυνατότητες έξυπνου αλλά και σταθερού ελέγχου, συνεπώς ακόμα και αν το δυναμικό πρόγραμμα φωτισμού δε το αφορά, η ρύθμισή του κατά την εγκατάσταση είναι εύκολη. Για τον υπολογισμό των αναγκαίων προβολέων LED χρησιμοποιήθηκε η ισχύς των υπαρχόντων λαμπτήρων, η οποία είναι αυτή που μετατρέπεται σε φως, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η κατανάλωση των ballast τους.



Εικόνα 43 – Φωτιστικό OMNIstar 72-XP της εταιρείας Schreder

Βάσει των παραπάνω, στον «Πίνακα 25» υπολογίζεται η κατανάλωση ισχύος.

Πίνακας 25 – Εγκατεστημένη ισχύς νέων φωτιστικών

Τύπος φωτιστικού	Κατανάλωση φωτιστικού (W)	Πλήθος φωτιστικών	Ισχύς (W)
TECEO S 5140	78	269	20.982
TECEO S 5149	15,4	475	7.315
PILZEO 5121	20,5	308	6.314
TECEO S 5140	78	35	2.730
OMNIstar 72-XP	111	287	31.857
Αθροιστικά:			69,2 kW

Πίνακας 26 – Κατανάλωση ενέργειας νέων φωτιστικών

Τύπος φωτιστικού	Κατανάλωση φωτιστικού (W)	Πλήθος φωτιστικών	Ισχύς (W)	Ώρες λειτουργίας	Ετήσια κατανάλωση (kWh)
TECEO S 5140	78	269	20.982	3978 h/year	83.466
TECEO S 5149	15,4	475	7.315		29.100
PILZEO 5121	20,5	308	6.315		25.120
TECEO S 5140	78	35	2.730		10.860
OMNIstar 72-XP	111	287	31.857		126.727
Αθροιστικά:					275.270 kWh

Πίνακας 27 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	69,2 kW * 873,63 ώρες = 60.455 kWh	6.422€
0,09126 €/kWh	69,2 kW * 3.104,37 ώρες = 214.822 kWh	19.605€
2,294 €/kW/μήνα	69,2 kW * 12 μήνες	1.905€
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		27.932€
0,005 €/kWh	275.270 kWh	1.376€
6%	(27.932 + 1.376)€ = 29.308€	1.758€
5‰	(27.932 – 0,00878 * 275.270 + 1.376)€ = 26.891€	134€
Σύνολο		31.200€

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας είναι 31.200€, όπως φαίνεται στον «Πίνακα 27», ο οποίος δημιουργήθηκε βάσει του «Πίνακα 12».

5.1.4. Ετήσιο κόστος συντήρησης

Τα φωτιστικά τύπου LED είναι πολύ επιρρεπή σε αύξηση της θερμοκρασίας και η αύξηση αυτή μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους. Ενδεικτικά, η διάρκεια ζωής των LED chips μειώνεται κατά 10.000 ώρες ανά 10 βαθμούς °C, ενώ η διάρκεια ζωής των drivers μειώνεται εντονότερα με μεταβολή της θερμοκρασίας, χωρίς όμως να υπάρχει ομοφωνία στην επιστημονική κοινότητα για το πόση ακριβώς είναι αυτή η μείωση. Στην Ελλάδα, η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 22,7 °C, η οποία βρίσκεται αρκετά κάτω από τους 25 °C, για τους οποίους ο χρόνος ζωής των φωτιστικών που επιλέχθηκαν έχουν 100.000 ώρες διάρκεια ζωής σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Ωστόσο, για 5 μήνες του έτους η μέση θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη των 25 °C, στους 30,8 °C. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι το σύστημα φωτισμού λειτουργεί εκτός των ωρών μέγιστης θερμοκρασίας ανεξαρτήτου εποχής, συνεπώς δεν λειτουργεί κατά τις ώρες των ημερών του χρόνου που η θερμοκρασία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τους 25 °C.

Όπως αναφέρθηκε, όλα τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν έχουν διάρκεια ζωής 100.000 ωρών σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Τα φωτιστικά TECEO, PILZEO και OMNIstar έχουν αυτή τη διάρκεια ζωής για κριτήρια L95, L90 και L85 αντίστοιχα. Τα κριτήρια αυτά μέτρησης της διάρκειας ζωής βασίζονται στη μέθοδο δοκιμής IES LM-80, η οποία καθορίζει ακριβώς τα βήματα με τα οποία γίνονται οι δοκιμές. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών των δοκιμών και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο επεξεργασίας των αποτελεσμάτων IES TM-21, που έχει αναπτυχθεί όπως και η IES LM-80 από την Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), μπορεί να γίνει προεκβολή των αποτελεσμάτων στο μέλλον για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των φωτιστικών. Όπως αναγράφεται στη μέθοδο, οι δοκιμές διαρκούν από 6.000 με 10.000 ώρες με λήψη μετρήσεων ανά 1.000 ώρες. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να δώσουν μια καλή εκτίμηση της συμπεριφοράς των φωτιστικών αρκετά μετά των 10.000 ωρών. Ωστόσο, για να προβλεφθούν καταχρήσεις των οδηγιών της μεθόδου, αναγράφεται πως η προέκταση στην οποία μπορεί να γίνει η διάρκεια ζωής αφορά κατά το μέγιστο 6 φορές την περίοδο δοκιμής. Εφόσον αυτή είναι μέχρι 10.000 ωρών, η διάρκεια ζωής 100.000 ωρών των φωτιστικών για αυστηρότερες απαιτήσεις φωτισμού από το LM-80 που χρησιμοποιούμε στο Ε.Μ.Π. είναι σημαντικά μεγαλύτερη αυτού του διαστήματος. Για τον λόγο αυτό, και προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η λειτουργία σε μη ιδανικές θερμοκρασίες, η διάρκεια ζωής όλων των φωτιστικών θα θεωρηθεί 60.000 ώρες με LM-80, το οποίο σημαίνει ότι σε 60.000 ώρες η φωτεινή ροή τους θα έχει πέσει στο 80% της φωτεινής ροής κατά την αρχή της λειτουργίας τους.

Η παραπάνω εκτίμηση δε λαμβάνει ωστόσο το υπόψιν το γεγονός ότι από την καθιέρωση των μεθόδων υπολογισμού της διάρκειας ζωής των φωτιστικών μέχρι σήμερα, η τεχνολογία των LED έχει προχωρήσει, κάνοντας εφικτή την επίτευξη διάρκειας ζωής μεγαλύτερη από τις 60.000 ώρες που είναι το τυπικά μέγιστο διάστημα πρόβλεψης. Από την άλλη μεριά, η τιμή 100.000 ωρών με L90 συνεχίζει να φαίνεται σχετικά υπερβολική. Για τον λόγο αυτό, πέραν της υπερσυντηρητικής εκτίμησης των 60.000 ωρών, θα γίνονται όλοι οι

υπολογισμοί και για την πιο ρεαλιστική εκτίμηση των 80.000 ωρών με L80, οι οποίες αντιστοιχούν σε χονδρικά 20 έτη λειτουργίας της εγκατάστασης.

Βάσει των παραπάνω για το διάστημα των 15 ετών που ισοδυναμούν με τις 60.000 ώρες λειτουργίας των φωτιστικών δεν απαιτείται κάποια αντικατάσταση. Ωστόσο, μπορεί να συμβεί κάποιο σφάλμα στους drivers των φωτιστικών LED, που είναι το πιο ευπαθές εξάρτημα τους. Αν και οι drivers προβλέπουν διάρκεια ζωής 100.000 ωρών, όπως και τα φωτιστικά, ο MTBF (Mean Time Between Faults) είναι 1.213.000 ώρες. Αυτός ο παράγοντας αναπαριστά το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών σφαλμάτων των drivers. Έτσι, για χρονικό διάστημα 60.000 ωρών η πιθανότητα σφάλματος είναι:

$$P(60.000h) = 1 - e^{-\frac{60.000}{1.213.000}} = 4,826 \%$$

Έτσι, για το διάστημα αυτό, θα προκύψει σφάλμα στους drivers 66 φωτιστικών. Το κόστος αντικατάστασης ενός driver είναι 100 € και θεωρώντας πως το συνεργείο απαιτεί τον ίδιο χρόνο για αντικατάσταση ενός driver όσο ενός λαμπτήρα το κόστος αντικατάστασης των drivers θα είναι 6.600 €. Οι απαιτούμενες εργατοώρες θα κοστίσουν:

$$\frac{66}{50} * 475€ = 627€$$

Συνεπώς το συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης θα είναι:

$$\frac{(6.600 + 627)}{15 \text{ έτη}} € \sim 482€/έτος$$

Το κόστος αυτό παραμένει ίδιο ανεξάρτητα με το χρόνο διάρκειας της λειτουργίας, εφόσον το μοναδικό κόστος παραμένει η αντικατάσταση των drives. Συνεπώς, για διάστημα λειτουργίας 20 ετών, που επίσης θεωρείται ότι δεν απαιτείται αντικατάσταση LED, το ετήσιο κόστος συντήρησης θα παραμείνει ίδιο.

5.1.5. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας θα είναι:

$$31.200€ + 482€ = 31.682€$$

Συνεπώς η αντικατάσταση των φωτιστικών σωμάτων με νέα φωτιστικά τύπου LED οδηγεί σε μείωση του ετήσιου κόστους λειτουργίας του συστήματος φωτισμού κατά 70,33%. Το ετήσιο κόστος λειτουργίας παραμένει ανεξάρτητα του αν θεωρηθεί η διάρκεια ζωής της επένδυσης 15 ή 20 έτη.

5.2. Χρήση στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω έγιναν, όπως απαιτείται σε τέτοιου είδους μελέτη, λαμβάνοντας υπόψιν το χειρότερο δυνατό σενάριο, δηλαδή τις ώρες αιχμής για τους δρόμους και πεζόδρομους του Ε.Μ.Π. Ωστόσο, οι ώρες αυτές αποτελούν τη μειοψηφία της ημέρας και ιδιαίτερα της νύκτας, κατά την οποία γίνεται και το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας του συστήματος φωτισμού. Ενδεικτικά, ο μεγαλύτερος κυκλοφοριακός φόρτος κατά τη διάρκεια της ημέρας αφορά τα πρωινά κατά την άφιξη του μεγαλύτερου όγκου φοιτητών και εργαζόμενων στο Ε.Μ.Π. και κατά την αποχώρησή τους. Από την αποχώρησή τους και έπειτα, το Ε.Μ.Π. χρησιμοποιείται κυρίως από κατοίκους της περιοχής για την άσκησή τους, μέχρι τις βραδινές ώρες, που η κίνηση μειώνεται στο ελάχιστο. Αυτά αφορούν τις καθημερινές που δεν είναι αργίες ή ημέρες όπου οι σχολές είναι κλειστές. Τα Σαββατοκύριακα, τις αργίες και τις διακοπές ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος στους δρόμους και πεζόδρομους τους Ε.Μ.Π. δεν εμφανίζεται, ενώ είναι μειωμένη η κυκλοφορία και όλες τις υπόλοιπες ώρες.

Για το λόγο αυτό, για τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος φωτισμού στο συγκρότημα του Ε.Μ.Π. θα μελετηθεί μια σειρά από σενάρια όπου για κάθε ένα θα εκτιμάται το ποσοστό της εξοικονόμηση σε σχέση με την το πιο συμβατικό σενάριο. Κάθε επιπλέον σενάριο προσμετράται στα προηγούμενα και εκτιμάται η επιπρόσθετη εξοικονόμηση που παρέχει.

Μέχρι αυτό το σημείο, οι μελέτες και οι εκτιμήσεις γίνονται θεωρώντας πως οι απαιτήσεις φωτισμού είναι διαρκώς ίσες με τις μέγιστες απαιτούμενες. Συγκεκριμένα, καθώς όλα τα κριτήρια επιλογής των απαιτούμενων κλάσεων φωτισμού είναι σταθερά και εξαρτώνται με τη γεωμετρία των επιφανειών και το σκοπό χρήσης τους, ο κυκλοφοριακός φόρτος, ο οποίος σε συμβατικά έργα στατικού φωτισμού θεωρείται ίσος με τον μέγιστο παρατηρήσιμο, είναι μια μεταβλητή που μεταβάλλεται ανάλογα με τη μέρα και την ώρα του χρόνου. Τους χρήστες της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου αποτελούν από φοιτητές, κάτοικους της περιοχής και εργαστηριακό, διδακτικό ή διοικητικό προσωπικό. Από αυτούς οι φοιτητές αποτελούν τη συντριπτικά μεγαλύτερο μέρος των χρηστών, ακολουθούμενο από το διάφορων ειδών προσωπικό του Ε.Μ.Π. και τέλος, οι υπόλοιποι χρήστες του συγκροτήματος αποτελούν μια πολύ μικρή μειοψηφία. Βάσει των στοιχείων αυτών, η χρήση των επιλεγμένων κλάσεων M3 και P3 οδηγεί σε υπερφωτισμό για τη πλειοψηφία των ωρών λειτουργίας του συστήματος φωτισμού, δεδομένου ότι από τις πρώτες βραδινές ώρες και έπειτα δεν γίνονται μαθήματα ή εργαστήρια στο Ε.Μ.Π. και ολοκληρώνονται οι δραστηριότητες όλων των φοιτητικών ομάδων.

5.2.1. Εφαρμογή προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού

Για την εφαρμογή ενός οποιουδήποτε προγράμματος φωτισμού σε ένα σύστημα φωτισμού, είναι αναγκαία η απομακρυσμένη διαχείρισή του. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, υπάρχει πληθώρα επιλογών για τη δημιουργία ενός δικτύου IoT, με ορισμένες από αυτές να έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όταν αυτό το δίκτυο αφορά ένα σύστημα έξυπνου φωτισμού. Για την εφαρμογή της απομακρυσμένης διαχείρισης θα χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο Zigbee, ενώ θα χρησιμοποιηθεί τοπολογία τύπου star, όπου οι ελεγκτές φωτιστικών (Luminaire Controller – LuCo) επικοινωνούν με τον κοντινότερο τοπικό ελεγκτή τομέα (Segment Controller – SeCo) προκειμένου να μεταβιβαστούν τελικά τα απαραίτητα δεδομένα στο κεντρικό σύστημα διαχείρισης (Central Management System – CMS).

Κάθε φωτιστικό θα διαθέτει ένα LuCo, ενώ ένα SeCo είναι επαρκές για την εξυπηρέτηση μέχρι και 150 LuCos. Έτσι, θα χρειαστούν 1.052 ελεγκτές LuCo και 8 SeCo, προκειμένου να μη γίνει σχεδίαση του συστήματος με την ακραία περίπτωση των 150 ελεγκτών φωτιστικών, αλλά με μια ασφαλή εκτίμηση των 140 LuCos ανά ένα SeCo. Όσον αφορά το CMS, επιλέχθηκε το σύστημα Owlet, της εταιρείας Owlet GmbH^[93] και η αγορά του κοστίζει 2.000€. Πέραν του κόστους αυτού και του κόστους εγκατάστασης των ελεγκτών, το σύστημα απομακρυσμένης διαχείρισης επηρεάζει την κατανάλωση λόγω των ελεγκτών ως εξής:

- Προστίθεται κατανάλωση 1W σε όλα τα φωτιστικά, το οποίο χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του SeCo κάθε φωτιστικού, ο οποίος καταναλώνει ενέργεια μόνο τις ώρες που τα φωτιστικά σώματα είναι ενεργά, δηλαδή κατά το ωράριο λειτουργίας του οδοφωτισμού.
- Προστίθεται κατανάλωση 15W ανά SeCo, οι οποίοι λειτουργούν καθόλη τη διάρκεια του έτους

5.2.2. Λειτουργία του στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου σεναρίου θα θεωρηθεί πως οι προβολείς του Ε.Μ.Π. για λόγους ασφαλείας δεν επηρεάζονται από τον κυκλοφοριακό φόρτο ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους. Τα στοιχεία που φαίνονται στον «Πίνακα 28» διατηρούνται σταθερά καθόλη τη διάρκεια του χρόνου τόσο στους δρόμους όσο και στους πεζόδρομους του Ε.Μ.Π.

Πίνακας 28 – Μη μεταβλητά χαρακτηριστικά δρόμων και πεζόδρομων Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου

Κριτήριο	Επιλογή	Βάρος
Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας	Χαμηλή ($v < 40\text{km/h}$)	-2
Σύνθεση χρηστών	Μεικτή με μεγάλο ποσοστό μη-μηχανοκίνητων	2
Διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας	Όχι	1
Πυκνότητα κόμβων	Υψηλή (< 3 διασταυρώσεις/km)	1
Σταθμευμένα οχήματα	Απόντα	0
Φωτισμός περιβάλλοντος	Χαμηλός	-1
Δυσκολία οδήγησης	Υψηλή	1
Κριτήριο	Επιλογή	Βάρος
Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας	Χαμηλή ($v < 40 \text{ km/h}$)	1
Σύνθεση χρηστών	Πεζοί, ποδηλάτες και μηχανοκίνητα	2
Σταθμευμένα οχήματα	Απόντα	0
Φωτισμός περιβάλλοντος	Χαμηλός	-1

Ανάλογα με τον κυκλοφοριακό φόρτο, βάσει των στοιχείων του «Πίνακα 28» υπολογίζονται οι απαιτούμενες κλάσεις φωτισμού.

Πίνακας 29 – Κλάσεις φωτισμού συναρτήσει του κυκλοφοριακού φόρτου

Κυκλοφοριακός φόρτος	Δρόμοι		Πεζόδρομοι	
	Κλάση φωτισμού	Ελάχιστη μέση λαμπρότητα (cd/m^2)	Κλάση φωτισμού	Ελάχιστη μέση ένταση φωτισμού (lux)
Υψηλός (1)	M3	1,00	P3	7,50
Μέσος (0)	M4	0,75	P4	5,00
Χαμηλός (-1)	M5	0,50	P5	3,00

Με καθορισμένες τις απαιτούμενες κλάσεις φωτισμού για κάθε ένταση κυκλοφοριακού φόρτου απομένει ο χαρακτηρισμός της κάθε ώρα της ημέρας ως ώρα υψηλού, μέσου ή χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Για τον σκοπό αυτό λήφθηκαν υπόψιν τα ωρολόγια προγράμματα των σχολών του Ε.Μ.Π. καθώς και το ωράριο εργασίας των υπαλλήλων του. Αρχικά, για τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα του χρόνου θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας, εφόσον η κίνηση είναι πολύ μειωμένη τις ημέρες όπου δεν εργάζονται οι υπάλληλοι και οι φοιτητές δεν πηγαίνουν για μαθήματα στις σχολές τους.

Βάσει των παραπάνω ορίστηκαν τρεις ζώνες κυκλοφορίας: υψηλής, μέσης και χαμηλής. Οι ώρες που ανήκουν στην κάθε ζώνη φαίνονται στον «Πίνακα 30». Λόγω της δυσκολίας ακριβή υπολογισμού των προσερχόμενων φοιτητών ανάλογα με την ημέρα της εβδομάδας το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την καθημερινές είναι το ίδιο.

Πίνακας 30 – Ωράρια εφαρμογής ζωνών κυκλοφορίας

Ζώνη κυκλοφορίας	Καθημερινές	Σαββατοκύριακα
Υψηλής	17:00 – 21:00	-
Μέσης	06:00 – 08:00 & 21:00 – 23:00	17:00 – 23:00
Χαμηλής	23:00 – 06:00	23:00 – 08:00

Οι ώρες υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου εμφανίζονται μόνο της απογευματινές ώρες των καθημερινών, καθώς τις ώρες εκείνες ο μεγαλύτερος όγκος των φοιτητών μετακινείται εντός της Πολυτεχνειούπολης ή αποχωρούν από αυτήν. Ίδιας και μεγαλύτερης έντασης κυκλοφοριακός φόρτος εμφανίζεται τις πρωινές ώρες κατά την άφιξη των φοιτητών στις σχολές τους, όμως δεδομένου ότι οι διαλέξεις και τα εργαστήρια των σχολών αρχίζουν το νωρίτερο 8:45, ενώ στις εξεταστικές περιόδους οι πρωινές εξετάσεις γίνονται στις 8:30. Οι ώρες αυτές όμως βρίσκονται καθόλη τη διάρκεια του χρόνου εντός του διαστήματος που το σύστημα φωτισμού είναι απενεργοποιημένο, συνεπώς το πρωί η μέγιστη κυκλοφορία είναι μέσης έντασης, και οφείλεται στους υπαλλήλους του Ε.Μ.Π. που καταφθάνουν νωρίτερα από τους φοιτητές, καθώς και από σε λίγους φοιτητές.

Συνεπώς, τις πρωινές ώρες λειτουργίας του συστήματος φωτισμού δεν παρατηρείται υψηλής έντασης κυκλοφορίας.

Σε κάθε περίπτωση, αν η ώρα εκκίνησης ή λήξης της λειτουργίας του συστήματος φωτισμού, οι οποίες είναι μισή ώρα πριν τη δύση του ηλίου και μισή ώρα πριν την ανατολή του ηλίου αντίστοιχα, προσπεράσουν κάποιο από τα όρια των παραπάνω ζωνών, τότε οι ώρες αυτές θα αποτελέσουν τα νέα όρια. Ενδεικτικά, στα ωρολόγια πλάνα που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες, για αυτές τις ώρες χρησιμοποιείται ο μέσος όρος τους για τον τρέχων μήνα. Κάθε κελί των προγραμμάτων χρωματίζεται ανάλογα με την ζώνη στην οποία ανήκει βάσει των χρωμάτων του παραπάνω πίνακα, με το γκρι χρώμα να χρησιμοποιείται για τις ώρες ημέρας, όπου το σύστημα φωτισμού βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Το ωρολόγιο πρόγραμμα λειτουργίας φαίνεται λεπτομερώς στον «Πίνακα 32».

Είναι εμφανές από τους πίνακες ότι κατά τη διάρκεια της εβδομάδας η πλειοψηφία των ωρών λειτουργίας γίνεται σε ώρες χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου, δηλαδή ώρες κατά τις οποίες υπό συνθήκες στατικού φωτισμού ο παρεχόμενος φωτισμός είναι δύο κλάσεις φωτισμού ανώτερος από ότι πραγματικά είναι απαραίτητο. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είχε δύο ωρολόγια προγράμματα, για καθημερινές και Σαββατοκύριακα αντίστοιχα. Είναι πιθανό ότι η πρόβλεψη των αργιών για ένα οποιοδήποτε δημόσιο χώρο στο σύστημα φωτισμού να οδηγούσε σε αμελητέες εξοικονομήσεις σε σχέση με την ετήσια κατανάλωση. Ωστόσο, τα ετήσια προγράμματα λειτουργίας των σχολών περιλαμβάνουν μεγάλα διαστήματα διακοπών κατά το καλοκαίρι, το Πάσχα και τα Χριστούγεννα, τα οποία συνυπολογίζοντας και τις γιορτές αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα του χρόνου. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε το πρόγραμμα λειτουργίας των Σαββατοκύριακων για τις ημέρες του «Πίνακα 31».

Πίνακας 31 – Ημέρες εντασσόμενες στο πρόγραμμα των Σαββατοκύριακων

Χειμερινό Εξάμηνο	
28/10/2020	28 ^η Οκτωβρίου
17/11/2020	17 ^η Νοεμβρίου
23/12/2020 – 31/12/2020	Διακοπές Χριστουγέννων
01/01/2020 – 06/01/2020	Διακοπές Πρωτοχρονιάς
Εαρινό Εξάμηνο	
02/03/2020	Καθαρά Δευτέρα
25/03/2020	25 ^η Μαρτίου
13/04/2020 – 26/04/2020	Διακοπές του Πάσχα
01/05/2020	Πρωτομαγιά
08/06/2020	Αγίου Πνεύματος
13/07/2020 – 26/08/2020	Καλοκαιρινές Διακοπές

Πίνακας 32 – Ωρολόγια προγράμματα στατικού προσαρμοστικού φωτισμού

ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΕΣ

Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00
2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00
3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00
4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00
5:00	5:00	5:00	5:00	5:44	5:31	5:45	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00
6:00	6:47	6:13	6:21	6:00	6:00	6:00	6:12	6:40	6:54	6:37	6:00
7:09	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:03
8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00
10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00
12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00
14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00
17:58	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:41	17:37
18:00	18:29	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:58	18:00	18:00
19:00	19:00	19:05	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:57	19:00	19:00	19:00
20:00	20:00	20:00	20:28	20:58	20:00	20:00	20:43	20:00	20:00	20:00	20:00
21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:19	21:15	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00
23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00

ΣΑΒΒΑΤΟΚΥΡΙΑΚΑ

Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00
2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00
3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00
4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00
5:00	5:00	5:00	5:00	5:44	5:31	5:45	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00
6:00	6:47	6:13	6:21	6:00	6:00	6:00	6:12	6:40	6:54	6:37	6:00
7:09	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:03
8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00
10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00
12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00
14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00
17:58	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:41	17:37
18:00	18:29	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:58	18:00	18:00
19:00	19:00	19:05	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:57	19:00	19:00	19:00
20:00	20:00	20:00	20:28	20:58	20:00	20:00	20:43	20:00	20:00	20:00	20:00
21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:19	21:15	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00
23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00

Υπολογίζοντας τις ώρες λειτουργίας σε κάθε ζώνη λειτουργίας μπορεί να βρεθεί η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται. Τα φωτιστικά LED όπως έχει αναφερθεί παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά σε συνθήκες dimming και σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζεται αύξηση της απόδοσης. Δηλαδή σε πολλές περιπτώσεις η μείωση της παροχής ισχύος ενός φωτιστικού LED οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση lumens/Watt, μέχρι και κατά 10%. Για να είναι βέβαιο ότι τα αποτελέσματα θα έχουν λάβει υπόψιν ατέλειες του συστήματος και αστάθμητους παράγοντες, θα υποθεθεί ότι η ισχύς και η φωτεινή ροή που αποδίδουν τα φωτιστικά έχουν γραμμική σχέση^[93]. Οι υπόλοιποι παράγοντες που προσμετρούνται για την αξιολόγηση φωτιστικών που χρησιμοποιούνται σε έργα δυναμικού φωτισμού δεν είναι σίγουρο πως πάντα παρουσιάζουν εξίσου καλή συμπεριφορά κατά το dimming. Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, η αλλαγή του συντελεστή ισχύος όπως και η αρμονική παραμόρφωση ρεύματος είναι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να μεταβάλλονται με τρόπο που να μη μπορεί να προσεγγισθεί ή να μην μεταβάλλονται σημαντικά. Ωστόσο, όλα τα φωτιστικά σώματα που επιλέχθηκαν έχουν ως βασικό τους χαρακτηριστικό τη δυνατότητα dimming και της τηλεδιαχείρισης, οπότε θεωρείται πως όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι έχουν γίνει ώστε η συμπεριφορά των φωτιστικών σωμάτων κατά το dimming τους να μην οδηγεί σε παράπλευρες παρενέργειες στο σύστημα πέραν της μείωσης της φωτεινής ροής και της καταναλισκόμενης ισχύος. Ανάλογα με τη ζώνη λειτουργίας κάθε φωτιστικό ανάλογα με το δρόμο και τον πεζόδρομο στον οποίο ανήκει θα μειώνει την κατανάλωση ισχύος του όπως φαίνεται στον «Πίνακα 33» και στον «Πίνακα 34» αντίστοιχα, με τη μείωση που παρατηρείται στη ζώνη υψηλής κυκλοφορίας να αφορά στην πράξη την εφαρμογή του LOR.

Πίνακας 33 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος δρόμων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσε της ζώνης κυκλοφορίας

Ζώνη κυκλοφορίας	Δρόμοι		
	Ποσοστό ισχύος σε σχέση με την ονομαστική		
	Δρόμος 1 ($\bar{L} = 1,07 \text{ cd/m}^2$)	Δρόμος 2 ($\bar{L} = 1,08 \text{ cd/m}^2$)	$\bar{L}_{min} \text{ (cd/m}^2)$
Υψηλής	93,46 %	92,59%	1,00
Μέσης	70,09%	69,44%	0,75
Χαμηλής	53,5%	54%	0,50

Πίνακας 34 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος πεζόδρομων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσε της ζώνης κυκλοφορίας

Ζώνη κυκλοφορίας	Πεζόδρομοι		
	Ποσοστό ισχύος σε σχέση με την ονομαστική		$\bar{E}_{min} \text{ (lux)}$
	Πεζόδρομος 3 ($\bar{E} = 9,57 \text{ lux}$)	Πεζόδρομος 4 ($\bar{E} = 7,84 \text{ lux}$)	
Υψηλής	78,37%	95,66%	7,50
Μέσης	52,25%	63,78%	5,00
Χαμηλής	31,35%	38,27%	3,00
Ζώνη κυκλοφορίας	Ποσοστό ισχύος σε σχέση με την ονομαστική	$\bar{E}_{min} \text{ (lux)}$	
	Πεζόδρομος 5 ($\bar{E} = 8,14 \text{ lux}$)		
Υψηλής	92,14%	7,50	
Μέσης	61,14%	5,00	
Χαμηλής	36,86%	3,00	

Έχοντας τα παραπάνω προγράμματα λειτουργίας ως κανόνα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της λειτουργίας του συστήματος φωτισμού στον «Πίνακα 35».

Πίνακας 35 – Αντιστοιχία ωρών λειτουργίας σε ζώνες κυκλοφορίας

Ζώνη κυκλοφορίας	Ώρες λειτουργίας (h)
Υψηλής	336,4
Μέσης	1.037,1
Χαμηλής	2.604,8

5.2.3. Ετήσιο κόστος κατανάλωσης

Με την εφαρμογή του στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού, είναι εφικτή μέσω των ελεγκτών η εφαρμογή του CLO. Έτσι, η υπερδιαστασιολόγηση που προκύπτει από τις μελέτες φωτισμού στο Relux λόγω του συντελεστή συντήρησης $MF = 0,8$ που επιλέχθηκε, θα αμεληθεί, με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η παροχή σταθερής φωτεινής ροής, ίση με την αναγκαία σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα καθόλη τη διάρκεια ζωής των φωτιστικών και όχι κατά το τέλος της διάρκειας ζωής τους. Η εφαρμογή του CLO όπως έχει αναφερθεί αποφέρει εξοικονόμηση καταναλισκόμενης ενέργειας της τάξης του 10%, ενώ η αύξηση της διάρκειας ζωής που επιφέρει στα LED δε θα ληφθεί υπόψιν. Η εξοικονόμηση αυτή εφαρμόζεται στην εγκατεστημένη ισχύ των φωτιστικών και την κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 36 – Κατανάλωση ενέργειας στατικού προγράμματος φωτισμού

Τύπος φωτιστικού	Ονομαστική ισχύς (W)	Πλήθος φωτιστικών	Ισχύς ανά ζώνη κυκλοφορίας (%)			Ισοδύναμη Ισχύς (W)	Ώρες λειτουργίας	Ετήσια κατανάλωση (kWh)
			M3-P3	M4-P4	M5-P5			
Δρόμος 1	12.324	158	93,46	70,09	53,5	7.543	3978 h/year	30.008
Δρόμος 2	8.658	111	92,59	69,44	54,00	5.307		21.110
Πεζόδρομος 3	3.496	227	78,37	52,25	31,35	1.426		5.671
Πεζόδρομος 4	3.819	248	95,66	63,78	38,27	1.901		7.562
Πεζόδρομος 5	6.314	308	92,14	61,14	36,86	3.022		12.023
Προβολείς TECEO	2.730	35	100	100	100	2.730		10.861
OMNIstar 72-XP	31.857	287	100	100	100	31.860		126.737
Αθροιστικά:								213.973 kWh
Εξοικονόμηση CLO (10%):								- 21.397 kWh
Συνολικά:								192.576 kWh

Κατά τις δημόσιες αργίες, η χρέωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μειωμένη καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, όπως κατά τα Σαββατοκύριακα. Παρακάτω παρατίθενται όλες οι δημόσιες αργίες, στις οποίες το σύστημα φωτισμού θα λειτουργεί με ωρολόγιο πρόγραμμα των Σαββατοκύριακων, και φαίνονται για ποιες από αυτές το 2020 η τιμολόγηση είναι διαφορετική λόγω του ότι δεν συμπίπτουν με Σαββατοκύριακα. Οι αργίες που έχουν χρωματισθεί με πράσινο είναι οι μέρες που λόγω του ότι είναι καθημερινές σημαίνει ότι θα αλλάξουν πρόγραμμα λειτουργίας από αυτό των καθημερινών σε αυτό των Σαββατοκύριακων, ενώ αυτές που είναι χρωματισμένες με πορτοκαλί δε θα παρουσιάσουν αλλαγή επειδή ήδη λειτουργούν με το πρόγραμμα αυτό.

Πίνακας 37 – Αργίες του 2020

Ημέρα	Ημερομηνία	
Πρωτοχρονιά	01/01/2020	Τετάρτη
Θεοφάνεια	06/01/2020	Δευτέρα
Καθαρά Δευτέρα	02/03/2020	Δευτέρα
Ευαγγελισμός της Θεοτόκου	25/03/2020	Τετάρτη
Μεγάλη Παρασκευή	17/04/2020	Παρασκευή
Μεγάλο Σάββατο	18/04/2020	Σάββατο
Κυριακή του Πάσχα	19/04/2020	Κυριακή
Δευτέρα του Πάσχα	20/04/2020	Δευτέρα
Εργατική Πρωτομαγιά	01/05/2020	Παρασκευή
Πεντηκοστή	07/06/2020	Κυριακή
Αγίου Πνεύματος	08/06/2020	Δευτέρα
Κοίμηση της Θεοτόκου	15/08/2020	Σάββατο
28 ^η Οκτωβρίου	28/10/2020	Τετάρτη

Χριστούγεννα	25/12/2020	Παρασκευή
Σύναξη της Θεοτόκου	26/12/2020	Σάββατο

Για την εκτίμηση της χρέωσης της ετήσιας κατανάλωσης χρειάζεται υπολογισμός των τιμολογιακών χρεώσεων στις οποίες εμπίπτουν οι επιλεγμένες ζώνες λειτουργίας. Παρακάτω φαίνεται σε ποιά χρέωση αντιστοιχεί κάθε τμήμα των ωρών λειτουργίας:

Πίνακας 38 – Ώρες λειτουργίας ανά ζώνη κυκλοφορίας και ζώνη χρέωσης

Διάστημα	Υψηλής	Μέσης	Χαμηλής
07:00 – 23:00	336,4 h	537,2 h	-
23:00 – 07:00	-	499,9 h	2.604,8 h

Συνδυάζοντας τους «Πίνακες 37,38», οι ώρες λειτουργίες κατανέμονται όπως φαίνονται στον «Πίνακα 39».

Πίνακας 39 – Κατανάλωση ενέργειας με στατικό πρόγραμμα φωτισμού ανά ζώνη χρέωσης

Τύπος φωτιστικού	Ισχύς ονομαστική ισχύς (W)	Ενέργεια M3-P3 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)	Ενέργεια M5-P5 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)
Δρόμος 1	12.324	3.875	4.640	4.318	17.174
Δρόμος 2	8.658	2.697	3.230	3.006	12.178
Πεζόδρομος 3	3.496	922	981	913	2.855
Πεζόδρομος 4	3.819	1.229	1.308	1.218	3.807
Πεζόδρομος 5	6.314	1.957	2.074	1.930	6.062
Προβολείς TECEO	2.730	918	1.467	1.365	7.111
OMNIstar 72-XP	31.857	10.718	17.114	15.926	82.980
Συνολικά:	62,3 kW (Με CLO)	22.316	30.814	28.675	132.167
		53.130 kWh		160.843 kWh	
		- 5.313 kWh (CLO)		- 16.084 kWh (CLO)	
		47.817 kWh		144.759 kWh	
		192.577 kWh			

Στην κατανάλωση που υπολογίστηκε πρέπει να προσμετρηθεί η κατανάλωση των ελεγκτών που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του προσαρμοστικού φωτισμού.

Πίνακας 40 – Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας ελεγκτών στατικού προσαρμοστικού φωτισμού

Τύπος	Κατανάλωση	Πλήθος	Ώρες λειτουργίας 23:00 – 07:00 και αργίες	Ώρες λειτουργίας 07:00 – 23:00	Κατανάλωση σε ώρες χαμηλής χρέωσης (kWh)	Κατανάλωση σε ώρες υψηλής χρέωσης (kWh)
LuCo	1W	1.052	3.104,4 ώρες	873,6 ώρες	3.265,8	919
SuCo	15W	8	6.752 ώρες	2.008 ώρες	810,2	241
Συνολικά					4.076 kWh	1.160 kWh

Πίνακας 41 – Κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας ελεγκτών στατικού προσαρμοστικού φωτισμού

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	1.160 kWh	123€
0,09126 €/kWh	4.076 kWh	372€
2,294 €/kW/μήνα	(15 * 8 + 1 * 1052)W/1000 * 12 μήνες	32€
Συνολικά		527€

Πίνακας 42 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας στατικού προγράμματος φωτισμού

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	47.817 kWh	5.080€
0,09126 €/kWh	144.759 kWh	13.210€
2,294 €/kW/μήνα	62,3 kW * 12 μήνες	1.715€
Κόστος κατανάλωσης ελεγκτών		527€
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος	20.732€	
0,005 €/kWh	197.813 kWh	989€
6%	(20.732 + 989)€ = 21.721€	1.303€
5‰	(21.721 – 0,00878 * 197.813 + 989)€ = 20.973€	105€
Σύνολο	23.129€	

Οι χρεώσεις του «Πίνακα 42» είναι αυτές που φαίνονται στον «Πίνακα 12». Με την αλλαγή του συστήματος φωτισμού από στατικό σε δυναμικό φωτισμό το κόστος συντήρησης του συστήματος δε μεταβάλλεται, αφού οι ώρες λειτουργίας του συστήματος είναι ίδιες ανεξαρτήτου της φωτεινής ροής των φωτιστικών σωμάτων. Κατά τους υπολογισμούς, η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων των φωτιστικών θεωρήθηκε ίδια. Ωστόσο, το dimming των φωτιστικών LED μειώνει τη θερμοκρασία λειτουργίας τους, η οποία έχει σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής των LED chips και των drivers. Δεν έχει γίνει ακόμα επαρκές ερευνητικό έργο για την ποσοτικοποίηση της αύξησης της διάρκειας ζωής των φωτιστικών LED με το dimming, ωστόσο η μη συμπερίληψή της στους παραπάνω υπολογισμούς σημαίνει πως η εξοικονόμηση που υπολογίζεται είναι η κατά το ελάχιστον εφικτή^[94].

5.2.4. Ετήσιο κόστος συντήρησης

Ομοίως με τους drivers των φωτιστικών LED, οι 1.052 ελεγκτές φωτιστικών σωμάτων και οι 8 ελεγκτές τομέων παρουσιάζουν σφάλματα. Για τους ελεγκτές φωτιστικών σωμάτων τα σφάλματα αυτά αποτελούν το μόνο λόγο αντικατάστασής τους. Για τους SeCos, θα θεωρηθεί ότι το τροφοδοτικό τους παρουσιάζει συχνά καταστροφικά σφάλματα λόγω της χαμηλής τιμής του και συνεπώς απαιτείται κύκλος αντικατάστασης 2 ετών. Για όλους τους ελεγκτές γίνει χρήση του MTBF παράγοντα για κάθε ένα από τα δύο, προκειμένου να υπολογισθεί η επίπτωσή τους στο ετήσιο κόστος συντήρησης της εγκατάστασης. Το κόστος ενός ελεγκτή LuCo είναι 150€ και ενός SeCo είναι 1600€.

- **Διάρκεια ζωής: 15 έτη**

Πίνακας 43 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 15 ετών

	Πλήθος	MTBF (ώρες)	Ποσοστό κατεστραμμένων ελεγκτών	Πλήθος σφαλμάτων σε 15 έτη	Κόστος αγοράς
Ελεγκτής LuCo	1.052	2.000.000	2,595%	28	4.200€
Ελεγκτής SeCo	8	1.700.000	3,468%	1	1.600€
Συνολικά					5.800€

Το τροφοδοτικό των ελεγκτών τομέα θεωρείται πως θα απαιτεί αντικατάσταση ανά δύο έτη λόγω του μικρού παράγοντα MTBF (70.000h) και του χαμηλού του κόστους. Το κόστος του τροφοδοτικού ανέρχεται στα 50€ άρα το κόστος αγοράς νέων τροφοδοτικών ανά δύο έτη σε βάθος 15ετίας θα είναι:

$$\frac{50€}{\text{τμχ}} * \frac{15}{2} \text{ φορές} * 8 \text{ SeCos} = 3.000€$$

Οπότε το συνολικό κόστος αγοράς νέων εξαρτημάτων για διάστημα 15ετίας θα είναι:

$$5.800\text{€} + 3.000\text{€} = 8.800\text{€}$$

Το κόστος εργατοωρών, θεωρώντας το κόστος αντικατάστασης ίδιο ανεξαρτήτως προϊόντος είναι:

$$\frac{28 + 1 + 15/2 * 8}{50} * 475\text{€} \sim 846\text{€}$$

Συνεπώς το συνολικό ετήσιο έτος συντήρησης θα είναι:

$$\frac{5.800 + 846}{15}\text{€} = 443\text{€}$$

Έτσι το συνολικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ελεγκτών του συστήματος απομακρυσμένης διαχείρισης, προσμετρώντας τα 400€ που υπολογίσθηκαν για το ετήσιο κόστος αντικατάστασης των drivers των φωτιστικών, ανέρχεται στα:

$$400\text{€} + 443\text{€} = 843\text{€}$$

- **Διάρκεια ζωής: 20 έτη**

Ομοίως υπολογίζεται το ετήσιο κόστος λειτουργίας 20 έτη διάρκεια ζωής.

Πίνακας 44 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 20 ετών

	Πλήθος	MTBF (ώρες)	Ποσοστό κατεστραμμένων ελεγκτών	Πλήθος σφαλμάτων σε 20 έτη	Κόστος αγοράς
Ελεγκτής LuCo	1.052	2.000.000	2,595%	42	6.300€
Ελεγκτής SeCo	8	1.700.000	3,468%	1	1.600€
Συνολικά					7.900€

Σε βάθος 20ετίας το κόστος αντικατάστασης των τροφοδοτικών των ελεγκτών τομέων θα είναι:

$$\frac{50\text{€}}{\text{τμχ}} * \frac{20}{2} \text{φορές} * 8 \text{ SeCos} = 4.000\text{€}$$

Το συνολικό κόστος αγοράς νέων εξαρτημάτων για διάστημα 20ετίας θα είναι:

$$7.900\text{€} + 4.000\text{€} = 11.900\text{€}$$

Το κόστος εργατοωρών θα είναι:

$$\frac{28 + 1 + 15/2 * 8}{50} * 475\text{€} \sim 1169\text{€}$$

Συνεπώς το συνολικό ετήσιο έτος συντήρησης θα είναι:

$$\frac{7.900 + 1169}{20}\text{€} = 453\text{€}$$

Έτσι το συνολικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ελεγκτών του συστήματος απομακρυσμένης διαχείρισης, προσμετρώντας τα 400€ που υπολογίσθηκαν για το ετήσιο κόστος αντικατάστασης των drivers των φωτιστικών, ανέρχεται στα:

$$400\text{€} + 453\text{€} = 853\text{€}$$

Παρατηρείται πως η αλλαγή στο χρόνο ζωής της επένδυσης επιφέρει αλλαγή στο ετήσιο κόστος λειτουργίας της τάξης των 10 ευρώ. Λόγω της αδυναμίας εκτίμησης ενός τέτοιου μεγέθους με τόση ακρίβεια, θα θεωρηθεί ότι κόστος παραμένει ίδιο και ίσο με 843€, που είναι η τιμή για τα 15 έτη.

5.2.5. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας

Το συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας θα είναι:

$$23.129\text{€} + 843\text{€} = 23.972\text{€}$$

Δηλαδή η εφαρμογή ενός απλού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος λειτουργίας κατά 77,55%, ενώ σε σχέση με την απλή αντικατάσταση των φωτιστικών με φωτιστικά με LED επιτυγχάνεται επιπλέον εξοικονόμηση 24,34%.

5.3. Χρήση δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού

Κατά το προηγούμενο σενάριο εξοικονόμησης ενέργειας, ως ελάχιστη στάθμη φωτισμού για τους δρόμους και τους πεζόδρομους θεωρήθηκε η στάθμη φωτισμού που ορίζεται από τα αντίστοιχα πρότυπα, M5 και P5 που αντιστοιχούν για το μικρότερο δυνατό κυκλοφοριακό φόρτο. Ωστόσο, τις βραδινές ώρες, δηλαδή τον κύριο όγκο λειτουργίας του συστήματος φωτισμού, στην Πολυτεχνειούπολη κυκλοφορούν ελάχιστοι άνθρωποι, και αν το κάνουν, αυτό συμβαίνει σε περιορισμένο μέρος ολόκληρου του συγκροτήματος, κάνοντας τη λειτουργία όλων των φωτιστικών σε κατάσταση κάλυψης των προδιαγραφών των προτύπων M5 και P5 να οδηγεί σε κατανάλωση μεγάλου ποσού ενέργειας που δεν ωφελεί κάποιον από τους χρήστες της Πολυτεχνειούπολης.

5.3.1. Λειτουργία του δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού

Αυτό το ζήτημα μπορεί να διορθωθεί με ένα σύστημα δυναμικού ή έξυπνου φωτισμού. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες για την ανίχνευση των περαστικών, τα φωτιστικά μπορούν να λειτουργούν στην προβλεπόμενη κλάση φωτισμού, M5 και P5, ενώ στη συνέχεια, όταν δεν υπάρχει άνθρωπος υπάρχουν δύο εφαρμοζόμενες πρακτικές. Η μια είναι η πλήρης απενεργοποίηση των φωτιστικών μέχρι την εκ νέου ανίχνευση ανθρώπου, ενώ η άλλη είναι η μείωση του φωτισμού στο 10% του μέγιστου. Η πρώτη περίπτωση ενέχει διαφόρους κινδύνους, όπως σφάλματα κατά την ανίχνευση ανθρώπων ή τη βλάβη ανιχνευτών, όπου εφόσον γίνουν βυθίζουν στο σκοτάδι ολόκληρα τμήματα της Πολυτεχνειούπολης καθιστώντας τα απροσπέλαστα, ενώ παράλληλα η εξοικονόμηση είναι της τάξης του 10%, που κάνει το ρίσκο ασύμφορο. Για τους λόγους αυτούς θα εφαρμοστεί η δεύτερη λύση. Για το δυναμικό πρόγραμμα φωτισμού υπάρχει μια νέα ζώνη κυκλοφοριακού φόρτου, χαμηλότερου φόρτου από τον ελάχιστο που μπορεί να προβλεφθεί από τα σχετικά πρότυπα, η οποία θα ονομάζεται ζώνη «ελάχιστου» κυκλοφοριακού φόρτου.

Τα φωτιστικά θα κατηγοριοποιηθούν σε ομάδες. Η κάθε ομάδα θα έχει αισθητήρες για τον εντοπισμό ανθρώπων και κινούμενων οχημάτων στον χώρο και θα αυξάνουν κατά τις βραδινές ώρες ελάχιστου φόρτου κυκλοφορίας την ένταση φωτισμού από το 10% των προδιαγραφών στην ένταση φωτισμού που απαιτούν οι κλάσεις M5 και P5 όταν απαιτείται. Δεδομένου του μεγέθους της Πολυτεχνειούπολης και του μεγέθους των ομάδων αυτών προκειμένου να μην είναι απαραίτητη η αγορά υπερβολικά μεγάλου αριθμού αισθητήρων, θεωρείται πως, κατά το 20% της διάρκειας λειτουργίας της ζώνης ελάχιστου φόρτου κυκλοφορίας, η ένταση φωτισμού που θα χρησιμοποιείται θα είναι αυτή που ανταποκρίνεται στα πρότυπα M5 και P5, ενώ για το υπόλοιπο 80%, το 10% της μέγιστης έντασης φωτισμού. Αυτό γίνεται διότι η Πολυτεχνειούπολη καλύπτει πολύ μεγάλη έκταση και πολλές περιοχές της χρησιμοποιούνται μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, συνεπώς ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 10% καλύπτει τις φορές που θα χρειαστεί να λειτουργήσει το σύστημα φωτισμού σε συνθήκες αυξημένων αναγκών φωτισμού.

Τα παραπάνω αφορούν τα φωτιστικά δρόμων και πεζόδρομων της Πολυτεχνειούπολης. Το μεγαλύτερο φορτίο αποτελείται από τους εγκατεστημένους προβολείς στις κορυφές των κτηρίων. Το φορτίο αυτό δεν μπορεί να προσεγγισθεί με τον ίδιο τρόπο, καθώς δεν υπάρχουν σχετικά πρότυπα που να προβλέπουν τη μείωση της φωτεινής ροής προβολέων συναρτήσει του κυκλοφοριακού φόρτου και την κατηγοριοποίηση σε αντίστοιχες κλάσεις. Για τον λόγο αυτό, το dimming των προβολέων θα γίνει μόνο κατά τις ώρες ελάχιστου κυκλοφοριακού φόρτου, ενώ τις υπόλοιπες ώρες η λειτουργία τους θα είναι στο μέγιστο. Αντίθετα με τα υπόλοιπα φωτιστικά, οι προβολείς κατά τις ώρες που θα γίνεται dimming δε θα μειώνουν την φωτεινή ροή τους στο 10% της ονομαστικής, αλλά στο 30%, θεωρώντας τη συχνότητα ενεργοποίησής τους ίδια με των υπόλοιπων φωτιστικών. Αξίζει να επισημανθεί ότι η ανίχνευση κίνησης στο Ε.Μ.Π. κατά το 20% των ωρών ελάχιστης κυκλοφορίας είναι μια εξαιρετικά συντηρητική εκτίμηση. Το νούμερο αυτό, λόγω της έκτασης του Ε.Μ.Π. και του αριθμού των φωτιστικών που βρίσκονται σε περιοχές που εξυπηρετούν μόνο διοικητικές υπηρεσίες ή τις σχολές, είναι πιο κοντά στο 10% από ότι στο 20%. Ωστόσο, η μελέτη θα γίνει με τη θεώρηση αυτή για να γίνει πιο εμφανής η εξοικονόμηση που συνεπάγεται η εφαρμογή ενός τέτοιου σεναρίου, λαμβάνοντας την χειρότερη δυνατή περίπτωση. Έτσι, τις ώρες που οι δεν έχει εντοπιστεί χρήστης, οι προβολείς των 78 W και 111 W θα μειώνουν τη φωτεινή ροή τους, μειώνοντας την ισχύ τους στα 23 W και 33 W αντίστοιχα. Ο λόγος που η ελάχιστη φωτεινή ροή για τους προβολείς είναι το 30% της ονομαστικής έναντι του 10% που ισχύει για τα άλλα φωτιστικά είναι η ποικιλία θέσεων που αυτοί εγκαθίστανται. Οι προβολείς του Ε.Μ.Π. φωτίζουν χώρους στάθμευσης, τις πύλες εισόδου και εξόδου και τις περιοχές γύρω από τα κτήρια. Καθεμιά από τις εφαρμογές αυτές καλύπτεται με τη λειτουργία των προβολέων σε ονομαστική λειτουργία με κατανάλωση ισχύος 111 W. Ωστόσο, κάποιες από τις φωτιζόμενες περιοχές είναι πιθανό να είναι υπερβολικά υποφωτισμένες εφόσον οι προβολείς είναι σε μεγάλο υψόμετρο αν η ελάχιστη φωτεινή ροή είναι στο 10% της ονομαστικής.

Οι αισθητήρες οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για τον εντοπισμό κινούμενων ανθρώπων και οχημάτων, θα τοποθετηθούν σε όλες τα κομβικά σημεία των δρόμων και πεζόδρομων του Ε.Μ.Π., από όπου είναι εφικτό να εισέλθει κάποιος σε κάποιο δρόμο ή πεζόδρομο ώστε να ενεργοποιείται η εκάστοτε ομάδα φωτιστικών. Στον ποδηλατόδρομο και τους περιφερειακούς δρόμους του Ε.Μ.Π. η θέση των αισθητήρων είναι προφανής, καθώς υπάρχει μικρός αριθμός διασταυρώσεων. Για την κεντρική πλατεία του Ε.Μ.Π., τους χώρους στάθμευσης και τους διάφορους πεζόδρομους και δρόμους που βρίσκονται μεταξύ των κτιρίων, θα τοποθετηθούν αισθητήρες σε περισσότερες τοποθεσίες, προκειμένου να μην υπάρχουν νεκρές περιοχές ανίχνευσης κίνησης. Συνολικά για ολόκληρη την Πολυτεχνειούπολη θα χρειαστούν 249 αισθητήρες στις θέσεις που φαίνονται στην «Εικόνα 44».



Εικόνα 44 – Αισθητήρες κίνησης στο Ε.Μ.Π.

Ο αισθητήρας κίνησης που επιλέχθηκε είναι ο Bobby/W της εταιρείας Lince. Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία και μικροκύματα για την ανίχνευση των ανθρώπων, χωρίς παράλληλα να ενεργοποιείται από την παρουσία ζώων. Μπορεί να ανιχνεύσει κίνηση σε απόσταση μέχρι και 10 μέτρα και έχει οριζόντια κάλυψη 60° με δυνατότητα αύξησης, συνεπώς είναι κατάλληλος για την εφαρμογή του στο Ε.Μ.Π., όπου θα χρησιμοποιηθεί σε χώρους που απαιτείται όσο το δυνατόν ευρύτερη κάλυψη της περιοχής και η μεγάλη απόσταση ανίχνευσης κάνει εφικτή τη χρήση μικρότερου αριθμού αισθητήρων σε σχέση με πολλούς άλλους αισθητήρες. Βασικό στοιχείο της επιλογής του αισθητήρα αυτού είναι η διαλειτουργικότητά του, καθώς μπορεί να συνεργαστεί με οποιοδήποτε πίνακα και με οποιοδήποτε σύστημα διαχείρισης. Για τον λόγο αυτό, η συνύπαρξή του σε ένα ασύρματο δίκτυο διαχείρισης κάνει περιττή την πρόσθετη αγορά των δεκτών καναλιών Lince RX-8 με τους οποίους τυπικά πωλείται ο εν λόγω αισθητήρας, εφόσον μπορεί να μεταδίδει το σήμα του απευθείας στους ελεγκτές των φωτιστικών σωμάτων και μεταπηδώντας από LuCo σε LuCo το σήμα μπορεί να φθάσει σε ένα SeCo για την μετέπειτα επεξεργασία της πληροφορίας.



Εικόνα 45 – Αισθητήρας Bobby/w της εταιρείας Linceo

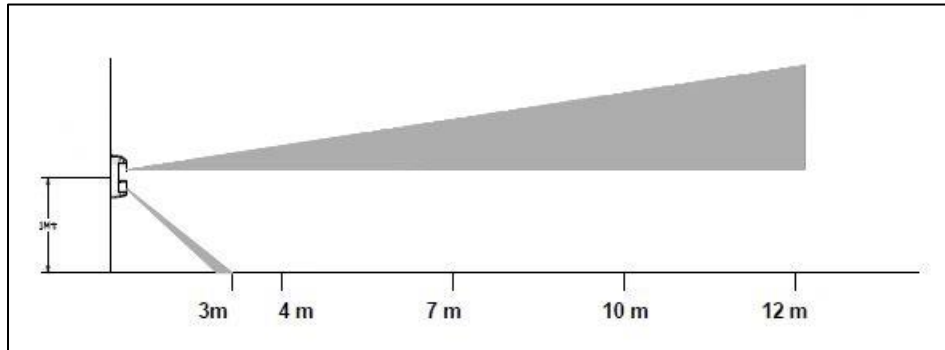
Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα Bobby/w είναι η ταυτόχρονη λειτουργία τριών ανιχνευτών, δύο PIR και ενός μικροκυμάτων. Οι τρεις ανιχνευτές εξετάζουν διαφορετικό εύρος γωνιών, και μόνο εφόσον ένα αντικείμενο ανιχνευτεί και από τους τρεις ανιχνευτές εκπέμπεται σήμα ανίχνευσης.

	<p>Το ζώο ανιχνεύεται μόνο από δύο από τους 3 ανιχνευτές (κάτω PIR και MW) και δεν ενεργοποιείται συναγερμός.</p> <p>The pet is detected only by two of the three sensors (lower PIR and MW) then the alarm is not activated.</p>
<p>Όχι συναγερμός NO ALARM</p>	
	<p>Ο άνθρωπος ανιχνεύεται μόνο από δύο από τους 3 ανιχνευτές (πάνω PIR και MW) και δεν ενεργοποιείται συναγερμός.</p> <p>The person is detected by two of the three sensors (upper PIR and MW) then the alarm is not activated.</p>
<p>Όχι συναγερμός NO ALARM</p>	
	<p>Ο άνθρωπος ανιχνεύεται από τους 3 ανιχνευτές (πάνω PIR, κάτω PIR και MW) και ενεργοποιείται συναγερμός.</p> <p>The person is detected by all three of the three sensors (upper PIR, lower PIR, MW) then the alarm is activated.</p>
<p>Συναγερμός ALARM</p>	

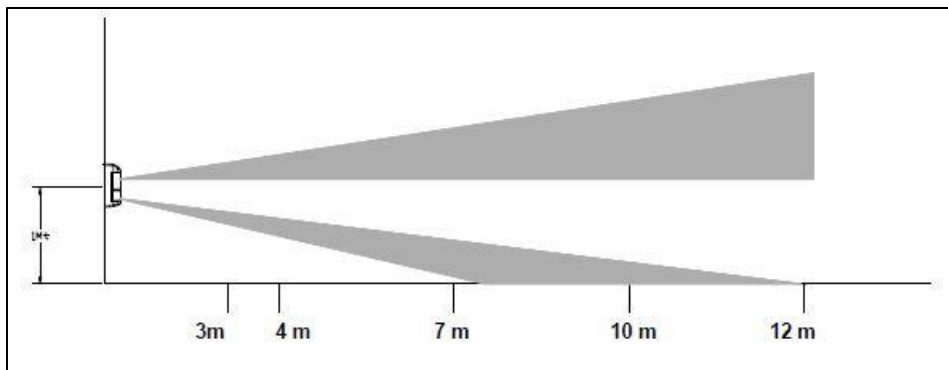
Εικόνα 46 – Αρχή λειτουργίας αισθητήρα κίνησης Bobby/w

Ο τρόπος λειτουργίας του, καθώς και η δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης των τριών ανιχνευτών για να μεταβάλλεται η απόσταση στην οποία είναι επιθυμητή η ανίχνευση, σημαίνει πως ο αισθητήρας αυτός είναι

κατάλληλος για όλες τις εφαρμογές εντός της Πολυτεχνειούπολης, καθώς στους πεζόδρομους και τους ποδηλατόδρομους, όπου η απόσταση ανίχνευση μπορεί να είναι μικρότερη οι ανιχνευτές μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να αποκλίνουν περισσότερο, ώστε να έχουν μικρότερη περιοχή ανίχνευσης και να μην ενεργοποιούνται από κινούμενα κλαδιά δέντρων ή ζώα, ενώ στους δρόμους ρυθμίζοντας τους ανιχνευτές ώστε να συγκλίνουν οι δέσμες τους, είναι εφικτή η πιο ακριβής και γρήγορη ανίχνευση διερχόμενων οχημάτων, ενώ παραμένει και η δυνατότητα ανίχνευσης πεζών.



Εικόνα 47 – Κάτω PIR ρυθμισμένο στη θέση Α για απόσταση ανίχνευσης 3 m



Εικόνα 48 – Κάτω PIR ρυθμισμένο στη θέση Ε για απόσταση ανίχνευσης 12 m

Το πρόγραμμα δυναμικού φωτισμού που θα χρησιμοποιηθεί φαίνεται στην επόμενη σελίδα. Είναι πανομοιότυπο με το στατικό πρόγραμμα φωτισμού που μελετήθηκε στο προηγούμενο σενάριο εξοικονόμησης ενέργειας, εκτός από τις ώρες 1:00 – 6:00 το πρωί. Οι ώρες αυτές είναι επισημασμένες με ανοικτό γαλάζιο χρώμα για να σηματοδοτούν τη ζώνη ελάχιστου κυκλοφοριακού φόρτου, δηλαδή το διάστημα κατά το οποίο οι αισθητήρες των φωτιστικών θα είναι υπεύθυνα για την αύξηση της φωτεινής ροής τους σε αυτήν που αντιστοιχεί στα πρότυπα M5 και P5, εκτός των προβολέων, των οποίων η φωτεινή ροή αυξάνεται στην ονομαστική τους.

Πίνακας 45 – Ωρολόγια προγράμματα δυναμικού προσαρμοστικού φωτισμού

ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΕΣ

Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00
2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00
3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00
4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00
5:00	5:00	5:00	5:00	5:44	5:31	5:45	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00
6:00	6:47	6:13	6:21	6:00	6:00	6:00	6:12	6:40	6:54	6:37	6:00
7:09	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:03
8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00
10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00
12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00
14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00
17:58	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:41	17:37
18:00	18:29	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:58	18:00	18:00
19:00	19:00	19:05	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:57	19:00	19:00	19:00
20:00	20:00	20:00	20:28	20:58	20:00	20:00	20:43	20:00	20:00	20:00	20:00
21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:19	21:15	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00
23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00

ΣΑΒΒΑΤΟΚΥΡΙΑΚΑ

Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00	1:00
2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00	2:00
3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00	3:00
4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00
5:00	5:00	5:00	5:00	5:44	5:31	5:45	5:00	5:00	5:00	5:00	5:00
6:00	6:47	6:13	6:21	6:00	6:00	6:00	6:12	6:40	6:54	6:37	6:00
7:09	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:03
8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00	9:00
10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00	11:00
12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00	13:00
14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00	16:00
17:58	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:00	17:41	17:37
18:00	18:29	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:58	18:00	18:00
19:00	19:00	19:05	19:00	19:00	19:00	19:00	19:00	19:57	19:00	19:00	19:00
20:00	20:00	20:00	20:28	20:58	20:00	20:00	20:43	20:00	20:00	20:00	20:00
21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:19	21:15	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00
23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00	23:00

Ομοίως με πριν οι ζώνες κυκλοφορίας θα είναι ίδιες, με την προσθήκη της ζώνης ελάχιστου κυκλοφοριακού φόρτου όπως φαίνεται στους «Πίνακες 46,47».

Πίνακας 46 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος πεζόδρομων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσε της ζώνης κυκλοφορίας

Ζώνη κυκλοφορίας	Δρόμοι		
	Ποσοστό ισχύος σε σχέση με την ονομαστική		
	Δρόμος 1 ($\bar{L} = 1,07 \text{ cd/m}^2$)	Δρόμος 2 ($\bar{L} = 1,08 \text{ cd/m}^2$)	\bar{L}_{min} (cd/m^2)
Υψηλής	93,46 %	92,59%	1,00
Μέσης	70,09%	69,44%	0,75
Χαμηλής	53,5%	54%	0,50
Ελάχιστης	16,82%	16,67%	0,18

Πίνακας 47 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος δρόμων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσε της ζώνης κυκλοφορίας

Ζώνη κυκλοφορίας	Πεζόδρομοι		
	Ποσοστό ισχύος σε σχέση με την ονομαστική		
	Πεζόδρομος 3 ($\bar{E} = 9,57 \text{ lux}$)	Πεζόδρομος 4 ($\bar{E} = 7,84 \text{ lux}$)	\bar{E}_{min} (lux)
Υψηλής	78,37%	95,66%	7,50
Μέσης	52,25%	63,78%	5,00
Χαμηλής	31,35%	38,27%	3,00
Ελάχιστης	12,54%	15,31%	1,2
Ζώνη κυκλοφορίας	Ποσοστό ισχύος σε σχέση με την ονομαστική		\bar{E}_{min} (lux)
	Πεζόδρομος 5 ($\bar{E} = 8,14 \text{ lux}$)		
Υψηλής	92,14%		7,50
Μέσης	61,14%		5,00
Χαμηλής	36,86%		3,00
Ελάχιστης	14,74%		1,2

Οι ώρες λειτουργίας για κάθε ζώνη λειτουργίας παρουσιάζονται στον «Πίνακα 48».

Πίνακας 48 – Αντιστοιχία ωρών λειτουργίας σε ζώνες κυκλοφορίας

Ζώνη κυκλοφορίας	Ώρες λειτουργίας (h)
Υψηλής	336,4
Μέσης	1.037,1
Χαμηλής	987,6
Ελάχιστης	1.617,1

Για την εκτίμηση της χρέωσης της ετήσιας κατανάλωσης χρειάζεται υπολογισμός των τιμολογιακών χρεώσεων στις οποίες εμπίπτουν οι επιλεγμένες ζώνες λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό παρατίθενται στον «Πίνακα 49» οι υπολογισμένες ώρες λειτουργίας ανά ζώνη κυκλοφορίας και ζώνη χρέωσης.

Πίνακας 49 – Ώρες λειτουργίας ανά ζώνη κυκλοφορίας και ζώνη χρέωσης

Διάστημα	Υψηλής	Μέσης	Χαμηλής	Ελάχιστης
07:00 – 23:00	336,4 h	537,2 h	-	-
23:00 – 07:00	-	499,9 h	987,6 h	1617,1 h

5.3.2. Ετήσιο κόστος κατανάλωσης

Βάσει των ωρών λειτουργίας των φωτιστικών σε κάθε ζώνη λειτουργίας, καθώς και την αντιστοίχιση των ωρών αυτών στις δύο ζώνες χρέωσης υπολογίζεται το ετήσιο κόστος κατανάλωσης της εγκατάστασης, προσμετρώντας την κατανάλωση των ελεγκτών του συστήματος διαχείρισης.

Πίνακας 50 – Κατανάλωση ενέργειας με δυναμικό πρόγραμμα φωτισμού ανά ζώνη χρέωσης

Τύπος φωτιστικού	Ισχύς ονομαστική ισχύς (W)	Ενέργεια M3-P3 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)	Ενέργεια M5-P5 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)	Ενέργεια ελάχιστης ζώνης 23:00 – 07:00 (kWh)
Δρόμος 1	12.324	3.875	4.640	4.318	6.512	3.352
Δρόμος 2	8.658	2.697	3.230	3.006	4.617	2.334
Πεζόδρομος 3	4.108.7	922	981	913	1.082	709
Πεζόδρομος 4	10.063.6	1.229	1.308	1.218	1.443	946
Πεζόδρομος 5		1.957	2.074	1.930	2.299	1.505
Προβολείς TECEO	2.730	918	1.467	1.365	2.696	2.146
OMNIstar 72-XP	31.857	10.718	17.114	15.926	31.463	25.037
Συνολικά:	62,3 kW (Με CLO)	22.316	30.814	28.675	50.112	36.028
		53.130 kWh		114.816 kWh		
		- 5.313 kWh		- 11.482 kWh		
		47.817 kWh		103.334 kWh		
		151.151 kWh				

Για την εφαρμογή του σεναρίου αυτού, αντίθετα με το προηγούμενο, οι προβολείς του Ε.Μ.Π. θα συμμετέχουν στη μείωση της φωτεινής ροής τους κατά τη ζώνη ελάχιστης κυκλοφορίας. Για τον λόγο αυτόν θα χρειαστεί εκτός των αισθητήρων να τοποθετηθούν ελεγκτές LuCo και SeCo προκειμένου να μπορεί να γίνει ο έλεγχός τους. Συγκεκριμένα, θα χρειασθούν 322 ελεγκτές LuCo, οι οποίοι ισοδυναμούν σε 3 ελεγκτές SeCo.

Πίνακας 51 – Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας προβολέων

Τύπος	Κατανάλωση	Πλήθος	Ώρες λειτουργίας 23:00 – 07:00 και αργίες	Ώρες λειτουργίας 07:00 – 23:00	Κατανάλωση σε ώρες χαμηλής χρέωσης (kWh)	Κατανάλωση σε ώρες υψηλής χρέωσης (kWh)
LuCo	1W	322	3.104,4 ώρες	873,6 ώρες	1000	282
SuCo	15W	3	6.752 ώρες	2.008 ώρες	101	30
Συνολικά					1001 kWh	312 kWh

Πίνακας 52 – Κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας ελεγκτών προβολέων

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	312 kWh	33€
0,09126 €/kWh	1001 kWh	91€
2,294 €/kW/μήνα	(15 * 3 + 1 * 322)W/1000 * 12 μήνες	10€
Συνολικά		134€

Πίνακας 53 – Κόστος κατανάλωσης δυναμικού προγράμματος φωτισμού

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	47.817 kWh	5.080€
0,09126 €/kWh	103.334 kWh	9.430€
2,294 €/kW/μήνα	62,3 kW * 12 μήνες	1.715€
Κόστος κατανάλωσης ελεγκτών προγράμματος στατικού φωτισμού + Κόστος κατανάλωσης ελεγκτών προβολέων		527+134€
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		16.886€
0,005 €/kWh	152.464 kWh	762€
6%	(16.886 + 762)€ = 17.648€	1.059€
5‰	(16.886 – 0,00878 * 152.466 + 762)€ = 16.309€	82€
Σύνολο		18.789€

Άρα η χρέωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 18.789€, σύμφωνα με τον «Πίνακα 53» του οποίου οι χρεώσεις ορίστηκαν βάσει του «Πίνακα 12».

5.3.3. Ετήσιο κόστος συντήρησης

Το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης δε μεταβάλλεται σημαντικά με τη μετάβαση από το στατικό στο δυναμικό σύστημα φωτισμού. Αυτό συμβαίνει διότι όλες οι υποδομές βρίσκονται ήδη εκεί, πέραν των αισθητήρων κίνησης. Ένας αισθητήρας Bobby/w κοστίζει 100€ μαζί με τη βάση και τροφοδοτείται από μια μπαταρία λιθίου 3.6V, 2.100 mAh κόστους 5€ η οποία περιέχεται εντός του αισθητήρα κατά την αγορά του. Τυπικά, ο χρόνος ζωής της μπαταρίας εντός της συσκευής είναι 5 χρόνια. Στο Ε.Μ.Π., ο μέσος αισθητήρας προβλέπεται να έχει σημαντικά μεγαλύτερη συχνότητα ενεργοποίησης και άρα κατανάλωσης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, ο χρόνος ζωής των μπαταριών θα θεωρηθεί 4 χρόνια. Για την αντικατάσταση των μπαταριών των αισθητήρων δεν απαιτείται η μίσθωση καλαθοφόρου οχήματος, λόγω του χαμηλού ύψους εγκατάστασης των αισθητήρων. Επιπλέον, λόγω της ευκολίας στην πρόσβαση των αισθητήρων και τη μικρή δυσκολία της δουλειάς, θεωρείται ότι απαιτείται ο μισός χρόνος εργασίας για την αντικατάσταση μπαταριών αισθητήρων σε σχέση με ελεγκτές ή λαμπτήρες. Συνεπώς, θεωρείται πως η αντικατάσταση των μπαταριών κοστίζει 105 ευρώ ανά 100 μπαταρίες προς αντικατάσταση. Δεν προβλέπονται άλλοι παράγοντες καταστροφικού σφάλματος των αισθητήρων, συνεπώς για τη διάρκεια 15 ετών που μελετάται, θα θεωρηθεί πως δεν απαιτείται αντικατάσταση.

- **Διάρκεια ζωής: 15 έτη**

Πίνακας 54 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 15 ετών

	Πλήθος	MTBF (ώρες)	Ποσοστό κατεστραμμένων ελεγκτών	Πλήθος σφαλμάτων σε 15 έτη	Κόστος αγοράς
Ελεγκτής LuCo	1.374	2.000.000	2,595%	36	5.400€
Ελεγκτής SeCo	10	1.700.000	3,468%	1	1.600€
Σύνολο					7.000€

Το κόστος αντικατάστασης των τροφοδοτικών ανέρχεται στα 50€/τεμάχιο άρα το κόστος αγοράς νέων τροφοδοτικών ανά δύο έτη σε βάθος 15ετίας θα είναι:

$$\frac{50€}{\text{τμχ}} * \frac{15}{2} \text{ φορές} * 10 \text{ SeCo} = 3.750€$$

Οπότε το συνολικό κόστος αγοράς νέων εξαρτημάτων για διάστημα 15ετίας θα είναι:

$$7.000\text{€} + 3.750\text{€} = 10.750\text{€}$$

Το κόστος εργατοωρών, θεωρώντας το κόστος αντικατάστασης ίδιο ανεξαρτήτως προϊόντος:

$$\frac{36 + 1 + 15/2 * 10}{50} * 475\text{€} \sim 1.064\text{€}$$

Το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών λιθίου των αισθητήρων κίνησης ανά έτος θα είναι:

$$\frac{(249 \text{ τμχ} * \frac{5\text{€}}{\text{τμχ}} * \frac{15}{4})}{15} * \frac{105}{100} \text{€} = 327\text{€}$$

Συνεπώς το συνολικό ετήσιο έτος συντήρησης θα είναι:

$$\frac{10.750 + 1.064}{15} \text{€} + 327\text{€} = 1.115\text{€}$$

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ελεγκτών του συστήματος απομακρυσμένης διαχείρισης, προσμετρώντας τα 400€ που υπολογίσθηκαν για το ετήσιο κόστος αντικατάστασης των drivers των φωτιστικών, ανέρχεται στα:

$$400\text{€} + 1.115\text{€} = 1.515\text{€}$$

- **Διάρκεια ζωής: 20 έτη**

Πίνακας 55 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 20 ετών

	Πλήθος	MTBF (ώρες)	Ποσοστό κατεστραμμένων ελεγκτών	Πλήθος σφαλμάτων σε 20 έτη	Κόστος αγοράς
Ελεγκτής LuCo	1.374	2.000.000	3,921%	53	7.950€
Ελεγκτής SeCo	10	1.700.000	4,597%	1	1.600€
Σύνολο					9.550€

Το κόστος αντικατάστασης των τροφοδοτικών σε βάθος 20ετίας θα είναι:

$$\frac{50\text{€}}{\text{τμχ}} * \frac{20}{2} \text{ φορές} * 10 \text{ SeCo} = 5.000\text{€}$$

Το συνολικό κόστος αγοράς νέων εξαρτημάτων για διάστημα 20 ετών θα είναι:

$$9.550\text{€} + 5.000\text{€} = 14.550\text{€}$$

Το κόστος εργατοωρών, θεωρώντας το κόστος αντικατάστασης ίδιο ανεξαρτήτως προϊόντος:

$$\frac{53 + 1 + 20/2 * 10}{50} * 475\text{€} \sim 1.463\text{€}$$

Το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών λιθίου των αισθητήρων κίνησης ανά έτος θα είναι:

$$\frac{(249 \text{ τμχ} * \frac{5\text{€}}{\text{τμχ}} * \frac{20}{4})}{15 * 100} * 105\text{€} \sim 436\text{€}$$

Συνεπώς το συνολικό ετήσιο έτος συντήρησης θα είναι:

$$\frac{14.550 + 1.463}{20} \text{€} + 436 \text{€} = 1.264 \text{€}$$

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ελεγκτών του συστήματος απομακρυσμένης διαχείρισης, προσμετρώντας τα 400€ που υπολογίσθηκαν για το ετήσιο κόστος αντικατάστασης των drivers των φωτιστικών, ανέρχεται στα:

$$400 \text{€} + 1.264 \text{€} = 1.664 \text{€}$$

5.3.4. Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας με δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού συνολικό θα είναι:

- **Διάρκεια ζωής: 15 έτη**

$$18.789 \text{€} + 1.197 \text{€} = 19.986 \text{€}$$

- **Διάρκεια ζωής: 20 έτη**

$$18.789 \text{€} + 1.664 \text{€} = 20.453 \text{€}$$

Το οποίο επιφέρει 81,28% εξοικονόμηση στην υπάρχουσα εγκατάσταση και 16,63% εξοικονόμηση σε σχέση με την εφαρμογή στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού, θεωρώντας τη διάρκεια ζωής της επένδυσης 15 έτη. Παρατηρείται πως η διαφορά στο συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας για διάρκεια ζωής των LED και της επένδυσης, από τα 15 στα 20 έτη είναι 467€. Το ποσό αυτό αποτελεί διαφορά της τάξης του 3% σε σχέση με το συνολικό κόστος για λειτουργία 15 ετών. Συνεπώς για λόγους απλούστευσης, θα θεωρηθεί πως η διαφορά στη διάρκεια ζωής της επένδυσης επηρεάζει μόνο τους οικονομικούς δείκτες που μελετώνται στο «Κεφάλαιο 6», και όχι στο κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης για το σενάριο δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού και για όλες τις υπόλοιπες δράσεις εξοικονόμησης. Άρα το συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας θα είναι:

$$19.986 \text{€}$$

5.4. Ρύθμιση έντασης φωτισμού των προβολέων κατά την εγκατάστασή τους

Όπως αναφέρθηκε κατά την επιλογή των φωτιστικών, οι προβολείς του Πολυτεχνείου φωτίζουν διαφόρων ειδών επιφάνειες. Αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που αντικαθιστούν τα προηγούμενα φωτιστικά μεταλλικών αλογονιδίων, 250 W και 400 W, καθώς και τον περιορισμένο αριθμό φωτιστικών οδοφωτισμού ατμών νατρίου υψηλής πίεσης που χρησιμοποιούνται ως προβολείς, ισχύος 250 W. Οι πρώτες δύο κατηγορίες αντικαθίστανται με προβολείς OMNI-star των 111 Watts, ενώ η τελευταία με φωτιστικό TECEO των 78 Watt.

Αν και τα παραπάνω σενάρια δράσεων για μείωση της ετήσιου κόστους λειτουργίας του συστήματος φωτισμού επιτυγχάνουν μεγάλες εξοικονομήσεις, το μεγαλύτερο τμήμα της κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται στη λειτουργία των προβολέων αυτών. Για λόγους ασφαλείας, δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο που να περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο με ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού θα μπορούσε να μειώνεται η φωτεινή ροή που παρέχουν οι προβολείς. Αυτό που μπορεί να γίνει είναι η ρύθμιση των φωτιστικών που επιλέγονται κατά την εγκατάστασή τους.

Για να υπάρχει ευελιξία στον τρόπο που μια τέτοια μελέτη θα μπορούσε να εφαρμοσθεί, οι προβολείς μελετώνται ως μεμονωμένο σενάριο. Κατά την αναζήτηση των φωτιστικών που θα χρησιμοποιηθούν βρέθηκε ότι οι ανάγκες

για τους προβολείς μεταλλικών αλογονιδίων είναι 8.100 και 12.000 lumens αντίστοιχα. Λόγω της μείωσης του κόστους με την αύξηση του μεγέθους των παραγγελιών σε τέτοιου είδους έργα θεωρήθηκε ότι το OMNI-star των 111 Watt με φωτεινή ροή 15.400 lumen καλύπτει τις ανάγκες αυτές. Ωστόσο, η φωτεινή ροή μπορεί να μειωθεί και για τις δύο κατηγορίες σημαντικά και συγκεκριμένα, το φωτιστικό OMNI-star πληροί τις προδιαγραφές για ρύθμισή του κατά την εγκατάστασή του. Έτσι, θα υπολογισθεί η ενέργεια και η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται με ρύθμιση των προβολών του Ε.Μ.Π. ώστε να επιτυγχάνουν την ελάχιστη επιθυμητή φωτεινότητα. Η σχέση ισχύος και φωτεινής ροής θεωρείται επίσης γραμμική. Το σενάριο αυτό επηρεάζει μόνο την κατανάλωση των προβολέων και για αυτό δε χρειάζεται κάποιος άλλος υπολογισμός για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητάς του.

Πίνακας 56 – Ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς για τους εγκαθιστάμενους προβολείς

Αριθμός Φωτιστικών	Παρεχόμενη φωτεινή ροή (lumens)	Ονομαστική Ισχύς (Watt)	Απαιτούμενη φωτεινή ροή (lumens)	Απαιτούμενη ισχύς	
287	15.400	111	12.500	81,17%	90,1 W
35	10.038	78	8.100	80,86%	63,07 W

Για την απλή αντικατάσταση των λαμπτήρων και για τη 2^η δράση, οι προβολείς λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο, καταναλώνοντας ίδια ποσά ενέργειας, με μόνη διαφορά την εφαρμογή του CLO κατά τη 2^η δράση, που μειώνει την κατανάλωση των προβολέων κατά 10%. Εφόσον οι προβολείς δε λειτουργούν βάσει ωρολογίου προγράμματος λειτουργίας, η κατανάλωση υπολογίζεται απλά πολλαπλασιάζοντας με τις ώρες λειτουργίας και τον αριθμό φωτιστικών:

$$\text{Κατανάλωση προβολέων} = (208 * 90,1 + 79 * 63,07) \text{ W} * 3978 \text{ h} = 94.371 \text{ kWh}$$

Έναντι της προηγούμενης κατανάλωσης των 137.587 kWh επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 68,59% με αυτήν την κατανάλωση των προβολέων. Από την κατανάλωση αυτή, οι 873,63 ώρες αφορούν καθημερινές στο διάστημα 07:00 – 23:00, ενώ οι 3.104,37 ώρες αφορούν είτε το διάστημα 23:00 – 07:00 καθημερινών, είτε Σαββατοκύριακα και αργίες. Δίχως την εφαρμογή του σεναρίου αυτού η κατανάλωση ενέργειας και ισχύος των προβολέων κόστιζε 13.965€, όπως φαίνεται στον «Πίνακα 57». Οι τιμές των χρεώσεων σε όλους τους πίνακες ακολουθούν ορίζονται στον «Πίνακα 12».

Πίνακας 57 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	$(287 * 111 + 35 * 78) \text{ W} * 873,63 \text{ h} = 30.228 \text{ kWh}$	3.211 €
0,09126 €/kWh	$(287 * 111 + 35 * 78) \text{ W} * 3.104,37 \text{ h} = 107.411 \text{ kWh}$	9.802 €
2,294 €/kW/μήνα	$(287 * 111 + 35 * 78) \text{ W} * 12 \text{ μήνες} = 34.6 \text{ kW} * 12 \text{ μήνες} = 415,2 \text{ kW}$	952 €
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		13.965 €
0,005 €/kWh	137.587 kWh	688€
6%	$(13.965 + 688)€ = 14.653€$	879€
5%	$(13.965 - 0,00878 * 137.587 + 688)€ = 13.445€$	68€
Σύνολο		15.600€

Πίνακας 58 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	$(287 * 90,1 + 35 * 63,07) \text{ W} * 873,63 \text{ h} = 25.550 \text{ kWh}$	2.714 €
0,09126 €/kWh	$(287 * 90,1 + 35 * 63,07) \text{ W} * 3.104,37 \text{ h} = 87.233 \text{ kWh}$	7.961 €

2,294 €/kW/μήνα	$(287 * 90,1 + 35 * 63,07) W * 12 \text{ μήνες}$ $= 28,1 kW * 12 \text{ μήνες} = 337,2 kW$	774 €
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		11.449 €
0,005 €/kWh	94.371 kWh	472€
6%	$(11.449 + 472)€ = 11.921€$	715€
5‰	$(11.449 - 0,00878 * 94.371 + 472)€ = 11.092€$	55€
Σύνολο		12.691€

Με ρύθμιση της φωτεινής ροής των προβολέων κατά την εγκατάστασή τους η κατανάλωση κοστίζει 12.691€, όπως υπολογίζεται στον «Πίνακα 58». Τα παραπάνω αφορούν την απλή αντικατάσταση των λαμπτήρων με LED chips και το σενάριο στατικού προγράμματος φωτισμού, κατά τα οποία σενάρια η ένταση φωτισμού των προβολέων είναι σταθερή καθόλη τη διάρκεια λειτουργία τους.

Πίνακας 59 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με CLO – στατικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	$0,9 * (287 * 111 + 35 * 78) W * 873,63 h$ $= 27.205 kWh$	2.890 €
0,09126 €/kWh	$0,9 * (287 * 111 + 35 * 78) W * 3.104,37 h$ $= 96.670 kWh$	8.822 €
2,294 €/kW/μήνα	$0,9 * (287 * 111 + 35 * 78) W * 12 \text{ μήνες}$ $= 31.1 kW * 12 \text{ μήνες} = 373,2 kW$	856 €
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		12.568 €
0,005 €/kWh	123.875 kWh	619€
6%	$(12.568 + 619)€ = 13.187€$	791€
5‰	$(12.568 - 0,00878 * 123.875 + 619)€ = 12.099€$	60€
Σύνολο		14.038€

Πίνακας 60 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους με CLO – στατικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	$0,9 * (287 * 90,1 + 35 * 63,07) W * 873,63 h$ $= 22.995 kWh$	2.443 €
0,09126 €/kWh	$0,9 * (287 * 90,1 + 35 * 63,07) W * 3.104,37 h$ $= 78.501 kWh$	7.164 €
2,294 €/kW/μήνα	$0,9 * (287 * 90,1 + 35 * 63,07) W * 12 \text{ μήνες}$ $= 25.3 kW * 12 \text{ μήνες} = 303,6 kW$	696 €
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		10.303€
0,005 €/kWh	84.934 kWh	425€
6%	$(10.303 + 425)€ = 10.728€$	644€
5‰	$(10.303 - 0,00878 * 84.934 + 425)€ = 9983€$	50€
Σύνολο		11.422€

Στη συνέχεια υπολογίζεται η εφαρμογή της ρύθμισης της έντασης φωτισμού των προβολέων κατά την εγκατάστασή τους με το δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού, κατά το οποίο οι προβολείς δεν έχουν σταθερή παρεχόμενη φωτεινή ροή καθόλη τη διάρκεια της νύχτας.

Πίνακας 61 – Κατανάλωση ενέργειας από τους προβολείς με το δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού χωρίς τη ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους

Τύπος φωτιστικού	Ισχύς ονομαστική ισχύς (W)	Ενέργεια M3-P3 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)	Ενέργεια M5-P5 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)	Ενέργεια ελάχιστης ζώνης 23:00 – 07:00 (kWh)
OMNI-star	31.857	918	1.467	1.365	2.696	2.146
TECEO	2.730	11.636	17.114	15.926	31.463	25.037
Συνολικά	31,1 kW (Με CLO)	9.442	18.581	17.291	34.159	27.183
		28.023 kWh		78.633 kWh		
		- 10 % CLO		- 10 % CLO		
		25.221		70.770		
		94.190 kWh				

Πίνακας 62 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού χωρίς τη ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	25.221 kWh	2.679€
0,09126 €/kWh	70.770 kWh	6.458€
2,294 €/kW/μήνα	31,1 kW * 12 μήνες = 373,2 kW	856€
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		9.993€
0,005 €/kWh	94.190 kWh	471€
6%	(9.993 + 471)€ = 10.464€	628€
5%	(9.993 – 0,00878 * 94.190 + 471)€ = 9.637€	48€
Σύνολο		11.140€

Με την εφαρμογή του σεναρίου αυτού στο πρόγραμμα δυναμικού φωτισμού η χρέωση θα είναι όπως υπολογίζεται στους «Πίνακες 63, 64».

Πίνακας 63 – Κατανάλωση ενέργειας από τους προβολείς ανά ζώνη χρέωσης

Τύπος φωτιστικού	Ισχύς ονομαστική ισχύς (W)	Ενέργεια M3-P3 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 07:00 – 23:00 (kWh)	Ενέργεια M4-P4 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)	Ενέργεια M5-P5 23:00 – 07:00 + ΣΚ/αργίες (kWh)	Ενέργεια ελάχιστης ζώνης 23:00 – 07:00 (kWh)
OMNI-star	25.859	8.700	13.891	12.927	25.539	20.323
TECEO	2.205	1.185	742	1.185	1.102	2.178
Συνολικά	25.3 kW (Με CLO)	9.442	15.076	14.030	27.717	22.056
		- 10 % CLO		- 10 % CLO		
		22.066 kWh		57.423 kWh		
		79.488 kWh				

Πίνακας 64 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού με ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους

Χρεώσεις		Ετήσιο Κόστος
0,10623 €/kWh	22.066 kWh	2.344€
0,09126 €/kWh	57.423 kWh	5.240€
2,294 €/kW/μήνα	25,3 kW * 12 μήνες = 303,6 kW	774€
Αξία Ηλεκτρικού Ρεύματος		8.280€
0,005 €/kWh	79.488 kWh	397€
6%	(8.280 + 397)€ = 8.677€	521€
5%	(8.280 – 0,00878 * 79.488 + 397)€ = 7.979€	40€
Σύνολο		9.238€

Η εφαρμογή της ρύθμισης της φωτεινής ροής των προβολέων κατά την εγκατάστασή τους μπορεί να γίνει επί οποιοδήποτε από τα προηγούμενα τρία σενάρια εξοικονόμησης ενέργειας και δεν απαιτεί την εγκατάσταση οποιοδήποτε είδους εξοπλισμού. Η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται για κάθε δράση εξοικονόμηση φαίνεται στον «Πίνακα 65».

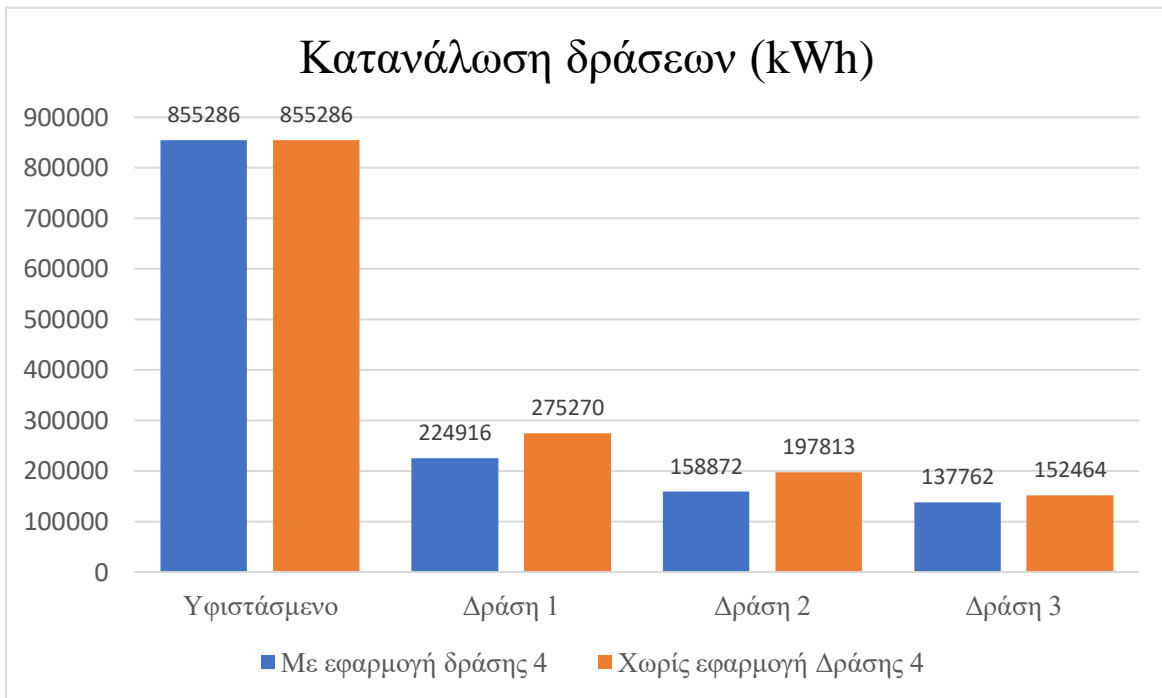
Πίνακας 65 – Εξοικονόμηση στις δράσεις 1-3 με την εφαρμογή της δράσης 4 (ρύθμιση φωτεινής ροής προβολέων κατά την εγκατάστασή τους)

Δράση	Αρχική συνολική κατανάλωση ενέργειας	Τελική συνολική κατανάλωση ενέργειας	Εξοικονόμηση Ενέργειας	Αρχικό κόστος λειτουργίας	Τελικό κόστος λειτουργίας	Εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας
1 Αντικατάσταση φωτιστικών	275.270 kWh	224.916 kWh	18,29%	31.682€	28.773€	9,18%
2 Στατικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού	197.813 kWh	158.872 kWh	19,67%	23.972€	21.356€	10,91%
3 Δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού	152.464 kWh	137.762 kWh	9,64%	19.896€	17.994€	9,56%

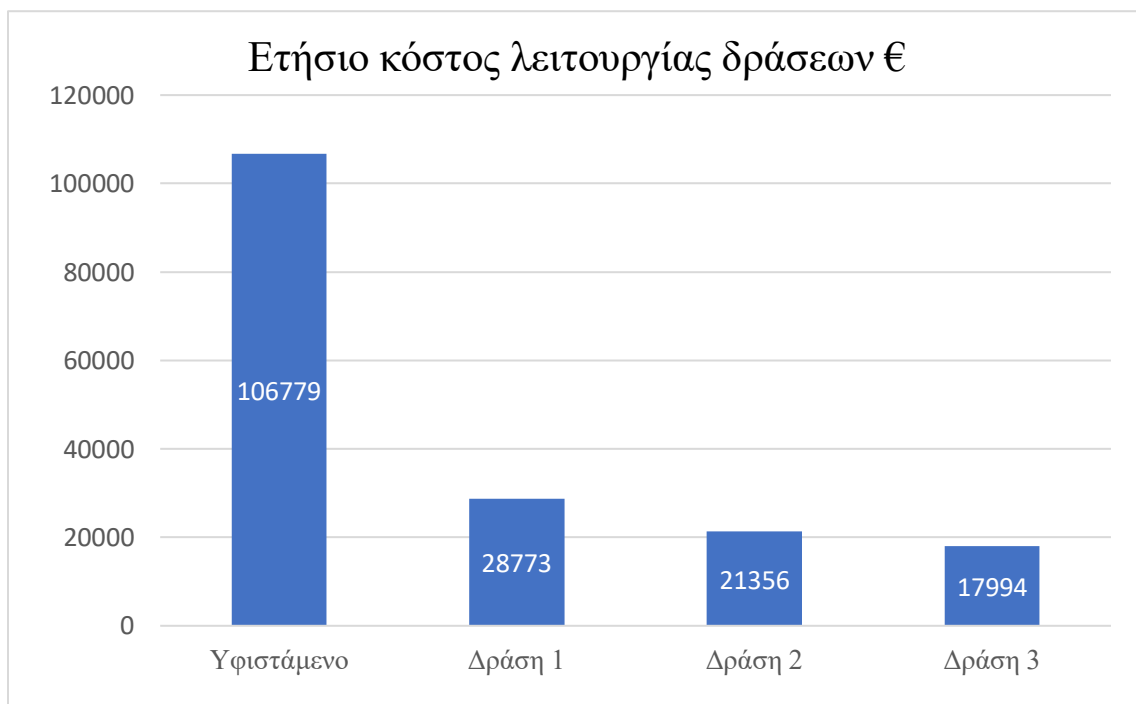
5.5. Σύγκριση δράσεων εξοικονόμησης

Στα παραπάνω κεφάλαια έγινε παρουσίαση 4 δράσεων για εξοικονόμηση του Ε.Μ.Π. στα ετήσια έξοδα οδοφωτισμού. Για την κάθε δράση υπολογίστηκε η επίπτωση που έχει στην κατανάλωση ενέργειας και ισχύος, στο κόστος συντήρησης και τελικά στο συνολικό ετήσιο έργο λειτουργίας. Τα παραπάνω έγιναν με κύριο γνώμονα τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας και για αυτόν τον λόγο δεν υπολογίστηκε το αρχικό κόστος κεφαλαίου που απαιτείται για την υλοποίηση των δράσεων αυτών.

Στις «Εικόνες 49 και 50» φαίνονται γραφικά οι διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας και στο ετήσιο κόστος λειτουργίας μεταξύ των δράσεων αντίστοιχα, σε σύγκριση πάντα με την κατανάλωση και το ετήσιο κόστος λειτουργίας του υφιστάμενου συστήματος οδοφωτισμού. Στην «Εικόνα 49» εμφανίζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή μη ή της δράσης 4, η οποία έχει μηδενικό επιπρόσθετο κόστος επένδυσης, σε σχέση με τη μη εφαρμογή της. Λόγω της μεγάλης αποδοτικότητας αυτής της δράσης και των μηδενικών πόρων που χρειάζονται για την επιπρόσθετη εφαρμογή της, στη συνέχεια της μελέτης, όταν γίνεται αναφορά στα κόστη κατανάλωσης, θα θεωρείται ότι η δράση 4 βρίσκεται ήδη σε εφαρμογή.



Εικόνα 49 – Κατανάλωση των δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας



Εικόνα 50 – Ετήσιο συνολικό κόστος των δράσεων (με εφαρμογή της δράσης 4)

Είναι εμφανές από τα γραφήματα του ετήσιου κόστους λειτουργίας και ετήσιας κατανάλωσης των δράσεων, πως οι προτεινόμενες δράσεις έχουν σημαντική επίπτωση στα έξοδα λειτουργίας του συστήματος οδοφωτισμού του Ε.Μ.Π. Όπως είναι αναμενόμενο, από τη δράση 1 προς τη δράση 3, τα έξοδα λειτουργίας μειώνονται, όπως και η καταναλισκόμενη ενέργεια. Αυτό γίνεται διότι τα σενάρια μελετήθηκαν θεωρώντας σε κάθε επόμενο σενάριο το προηγούμενο ως βάση για την εφαρμογή του. Έτσι, η 3^η δράση, η οποία περιλαμβάνει και τις προηγούμενες δύο παρουσιάζει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα ως προς τις άλλες δράσεις, θεαματικά χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (εξοικονόμηση 83,90%) και κατανάλωση ενέργειας (εξοικονόμηση 83,15%) σε σχέση με το υφιστάμενο σύστημα εξωτερικού φωτισμού.

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε πολλά σημεία της έρευνας όπου η απουσία δεδομένων απαιτούσε την εκτίμηση διαφόρων μεγεθών από τον συντάκτη, ελήφθησαν οι χειρότερες δυνατές συνθήκες. Με τόσο μεγάλο αριθμό δυσμενών εκτιμήσεων, είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι οι υπολογισμοί που έγιναν παραπάνω, και οι εξοικονομήσεις που επιτυγχάνονται είναι οι ελάχιστες δυνατές. Εάν ο οικολογικός αντίκτυπος ήταν η μόνη επιδίωξη της συγκεκριμένης έρευνας, βάσει των παραπάνω στοιχείων, η αδιαμφισβήτητα καλύτερη δράση είναι η δράση 3, της εφαρμογής δηλαδή δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού στα νέα φωτιστικά LED, με την προσθήκη ελεγκτών και αισθητήρων κίνησης στην Πολυτεχνειούπολη.

6. Τεχνοοικονομική μελέτη προτεινομένων δράσεων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκαν τέσσερις πιθανές δράσεις για τη μείωση της κατανάλωσης του συστήματος φωτισμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Οι δράσεις αυτές υπολογίστηκαν σειριακά, με την καθεμία να στηρίζεται πάνω στις προηγούμενες για να είναι εφαρμόσιμη. Έχοντας υπολογίσει τα ετήσια κόστη λειτουργίας θα γίνει οικονομική αξιολόγηση των δράσεων, προκειμένου να βρεθεί ο χρόνος απόσβεσης της κάθε δράσης, καθώς και το συνολικό οικονομικό όφελος.

6.1. Χαρακτηριστικά στοιχεία της επένδυσης

- **Διάρκεια ζωής της επένδυσης**

Ο υπολογισμός των διαφόρων κριτηρίων αξιολόγησης θα γίνει με διάρκεια ζωής της επένδυσης 15 και 20 έτη, ως μια συντηρητική και μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση. Το διάστημα αυτό επιλέχθηκε διότι αποτελεί τη προβλεπόμενη διάρκεια ζωής των LED που θα τοποθετηθούν στο Ε.Μ.Π. (60.000 ώρες και 80.000 ώρες για 15 και 20 έτη αντίστοιχα) και συνεπώς εντός αυτής δεν απαιτείται η αγορά νέων LED chips, εκτός από αμελητέο αριθμό απρόβλεπτων σφαλμάτων.

- **Κεφάλαιο επένδυσης**

Κάθε μια από τις δράσεις απαιτεί διαφορετικό αρχικό κεφάλαιο για την εφαρμογή της. Αν και λόγω του μικρότερου κόστους λειτουργίας που συνεπάγονται, θα επέλθει απόσβεση του κεφαλαίου αυτού, είναι σημαντικό ο χρόνος απόσβεσης να μην είναι απαγορευτικά μεγάλος και να δικαιολογεί τη δέσμευση των απαραίτητων πόρων. Στον «Πίνακα 64» φαίνονται τα κόστη των διαφόρων εξαρτημάτων που χρειάζονται κατά την αρχική εγκατάσταση για κάθε δράση και υπολογίζεται το συνολικό κόστος. Τα κόστη αυτά είναι ενδεικτικά, και δεν συνιστούν τις ακριβείς τιμές των φωτιστικών με τα οποία έγινε η μελέτη. Η 4^η δράση έχει μηδενικό κόστος εφαρμογής, καθώς απαιτεί λίγο χρόνο από τους τεχνικούς κατά την εγκατάσταση για τη ρύθμιση των προβολέων. Λόγω αυτού, καθώς και της σημαντικής επίπτωσης που έχει στη συνολική κατανάλωση, σε όλα τα μεγέθη των πρώτων τριών δράσεων θα θεωρηθεί ότι έχει συμπεριληφθεί η επίδραση της ρύθμισης της έντασης των προβολέων κατά την εγκατάστασής τους.

Πίνακας 66 – Κεφάλαιο επένδυσης για κάθε μια από τις δράσεις

Δράση		Πλήθος			Κόστος		
Προϊόν	Κόστος	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Φωτιστικό δρόμου LED 78W	440€	304			133.760€		
Φωτιστικό δρόμου LED 15,4W	330€	475			156.750€		
Φωτιστικό κορυφής LED 20,5 W	550€	308			169.400€		
Προβολέας LED 111W	600€	287			172.200€		
LuCo	150€	-	1.052	1.374	-	157.800€	206.100€
SeCo	1.600€	-	8	10	-	12.800€	16.000€
Bobby/w	100€	-	-	294	-	-	29.400€
Λογισμικό Κεντρικής Διαχείρισης	2.000€	-	1	1	-	2.000€	2.000€
Σύνολο					632.110€	804.710€	885.610€

- **Η ροή των ωφελειών**

Οι ωφέλειες περιλαμβάνουν τα έσοδα από την πώληση αγαθών ή υπηρεσιών που οφείλονται στην επένδυση, συνεπώς στην περίπτωση των δράσεων που μελετώνται, αποτελούνται από την εξοικονόμηση σε κατανάλωση ρεύματος και έξοδα συντήρησης της εγκατάστασης.

Πίνακας 67 – Εξοικονόμηση πόρων από κάθε δράση

Δράση	Εξοικονόμηση ανά έτος	Συνολική εξοικονόμηση στο χρόνο ζωής της επένδυσης	
		15 έτη	20 έτη
1	78.006€	1.170.090€	1.560.120€
2	85.423€	1.281.345€	1.708.460€
3	88.785€	1.331.775€	1.775.700€

6.2. Αξιολόγηση της επένδυσης

6.2.1. Κριτήριο της Απόδοσης Επένδυσης (Return of Investment – ROI)

Το κριτήριο της Απόδοσης Επένδυσης αγνοεί τον πληθωρισμό και υπολογίζει το ύψος των κερδών ανά μονάδα επενδύομένου κεφαλαίου. Ορίζεται ως το πηλίκο του συνολικού οικονομικού οφέλους της επένδυσης στη διάρκεια ζωής της προς το κόστος της επένδυσης.

$$ROI = \frac{\left(K_{\text{ετήσιο υφιστάμενο}} - K_{\text{ετήσιο επένδυσης}} \right) * n}{K_0}$$

όπου:

K_0 : το κόστος επένδυσης

$K_{\text{ετήσιο υφιστάμενο}}$: Το ετήσιο λειτουργικό κόστος της υφιστάμενης εγκατάστασης

$K_{\text{ετήσιο επένδυσης}}$: Το ετήσιο λειτουργικό κόστος που προκύπτει μέσω της επένδυσης

n : η διάρκεια ζωής της επένδυσης

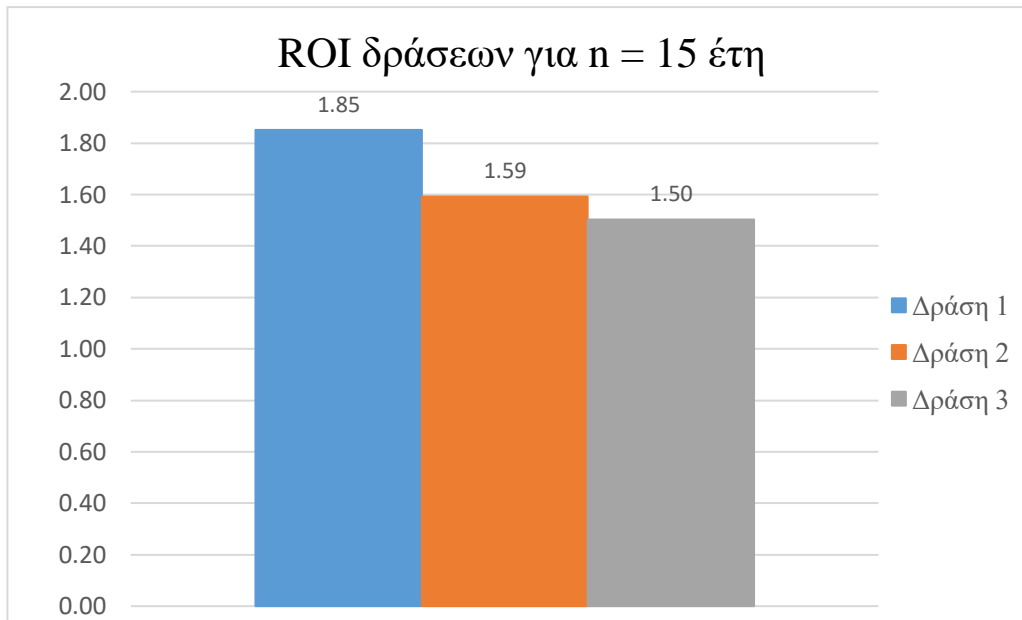
- **Διάρκεια ζωής επένδυσης: 15 έτη**

Στον «Πίνακα 64» υπολογίζεται η απόδοση των επενδύσεων για τις τρεις δράσεις.

Πίνακας 68 – Απόδοση Επένδυσης για τις τρεις επενδυτικές δράσεις

Δράση	$K_{\text{υφιστάμενο}}$ (€ έτος)	$K_{\text{επένδυσης}}$ (€ έτος)	Κόστος επένδυσης (€)	Διάρκεια Ζωής Επένδυσης	ROI
1	106.779	28.773	632.110	15 έτη	1,85
2		21.356	804.710		1,59
3		17.994	885.610		1,50

Για την αξιολόγηση των επενδύσεων βάσει του κριτηρίου του ROI, απορρίπτονται οι επενδύσεις με ROI μικρότερο της μονάδας και αυτή με τη μεγαλύτερη τιμή ROI θεωρείται η πιο συμφέρουσα. Επομένως, για διάρκεια ζωής 15 ετών, όλες οι επενδύσεις εγκρίνονται, έχοντας ROI κατά πολύ μεγαλύτερο της μονάδας, με την 1^η δράση να έχει τη μεγαλύτερη τιμή.

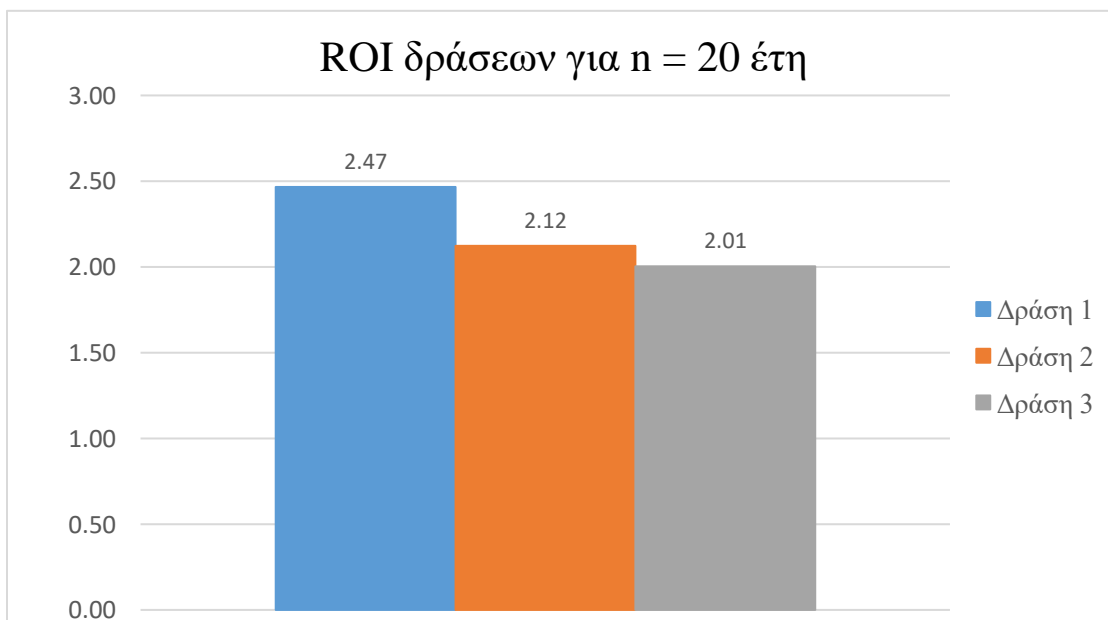


Εικόνα 51 – Γραφική αναπαράσταση της απόδοσης επενδύσεων των δράσεων για n = 15 έτη

- **Διάρκεια ζωής επένδυσης: 20 έτη**

Πίνακας 69 – Απόδοση Επένδυσης για τις τρεις επενδυτικές δράσεις

Δράση	$K_{\text{υφιστάμενο}} \left(\frac{\text{€}}{\text{έτος}} \right)$	$K_{\text{επένδυσης}} \left(\frac{\text{€}}{\text{έτος}} \right)$	Κόστος επένδυσης (€)	Διάρκεια Ζωής Επένδυσης	ROI
1	106.779	28.773	632.110	20 έτη	2,47
2		21.356	804.710		2,12
3		17.994	885.610		2,01



Εικόνα 52 - Γραφική αναπαράσταση της απόδοσης επενδύσεων των δράσεων για n = 20 έτη

Βάσει του κριτηρίου της Απόδοσης Επένδυσης, τα αποτελέσματα για τις τρεις δράσεις είναι παρόμοια, ανεξάρτητα της διάρκειας ζωής της επένδυσης: όλες οι δράσεις εγκρίνονται, έχοντας σημαντικά μεγαλύτερη τιμή

του ROI από τη μονάδα. Η 1^η δράση εμφανίζεται ως η πιο συμφέρουσα και για διάρκεια ζωής της επένδυσης τα 20 έτη.

6.2.2. Κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία μιας επένδυσης της στιγμή έναρξης της εμπορικής λειτουργίας της, εν προκειμένω στιγμή έναρξης λειτουργίας του καινούργιο συστήματος φωτισμού του Ε.Μ.Π., δίνεται από τη σχέση:

$$ΚΠΑ = -K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{ΚΤΡ_t}{(1+k)^t}$$

όπου:

K₀ : το κόστος επένδυσης

ΚΤΡ_t : οι καθαρές ταμειακές ροές του έτους t εκφρασμένες σε τιμές συγκεκριμένης περιόδου, δηλαδή χωρίς πληθωρισμό

k : κόστος αναγωγής ή προεξόφλησης

n : η διάρκεια ζωής της επένδυσης

Από τις παραπάνω μεταβλητές, το κόστος της επένδυσης και η διάρκεια ζωής έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 6.1. Ως επιτόκιο αναγωγής θα χρησιμοποιηθούν δύο τιμές, του 3% και 5%. Για αυτήν την επένδυση, ως Καθαρές Ταμειακές Ροές (ΚΤΡ) ορίζεται το λειτουργικό κέρδος της εγκατάστασης, δηλαδή η ροή ωφελειών, που παρουσιάστηκε στον «Πίνακα 63». Εφόσον η ΚΠΑ κάποιας δράσης είναι θετική, τότε η εφαρμογή της είναι επικερδής και είναι οικονομικά βιώσιμη. Όσο μεγαλύτερη είναι η ΚΠΑ τόσο πιο συμφέρουσα είναι μια επένδυση, χωρίς όμως η ΚΠΑ να αποτελεί το μοναδικό κριτήριο αξιολόγησης εναλλακτικών επενδύσεων. Εφόσον η ΚΠΑ είναι αρνητική τότε η επένδυση απορρίπτεται, καθώς στη διάρκεια ζωής της επένδυσης δε προβλέπεται να γίνει απόσβεση και επομένως θα είναι ζημιογόνα. Τέλος, αν η ΚΠΑ μιας επένδυσης είναι μηδενική ή πολύ κοντά στο μηδέν, η επένδυση χαρακτηρίζεται ως οικονομικά αδιάφορη και δεν υπάρχει από οικονομική σκοπιά διαφορά από την εφαρμογή ή μη της αντίστοιχης δράσης. Οι ΚΠΑ των τριών επενδύσεων φαίνονται στον «Πίνακα 70» και στον «Πίνακα 71» για επιτόκια αναγωγής 3% και 5% αντίστοιχα για διάρκεια ζωής 15 έτη, και στους «Πίνακες 72 και 73» για διάρκεια ζωής 20 έτη.

- **Διάρκεια ζωής επένδυσης: 15 έτη**

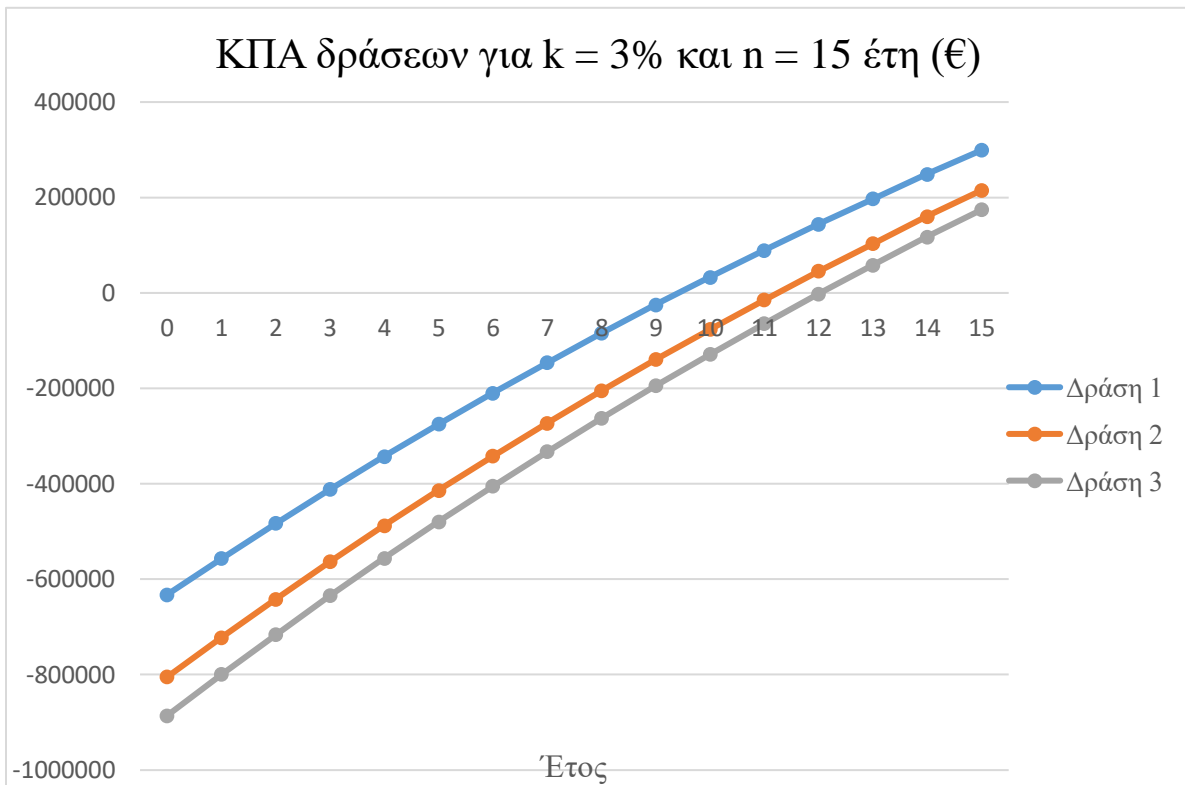
Πίνακας 70 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής k = 3% και n = 15 έτη

k=3%		Δράση 1		Δράση 2		Δράση 3	
t (Έτος)	Συντελεστής αναγωγής	ΚΤΡ	ΚΤΡ/(1+k) ^t	ΚΤΡ	ΚΤΡ/(1+k) ^t	ΚΤΡ	ΚΤΡ/(1+k) ^t
0	0	-632.110	-632.110	-804.710	-804.710	-885.610	-885.610
1	0,97087379	78.006	-556.376,0	85.423	-721.775,0	88.785	-799.411,0
2	0,94259591	78.006	-482.847,9	85.423	-641.255,7	88.785	-715.722,6
3	0,91514166	78.006	-411.461,3	85.423	-563.081,5	88.785	-634.471,7
4	0,88848705	78.006	-342.154,0	85.423	-487.184,3	88.785	-555.587,4
5	0,86260878	78.006	-274.865,4	85.423	-413.497,7	88.785	-479.000,7
6	0,83748426	78.006	-209.536,6	85.423	-341.957,3	88.785	-404.644,7
7	0,81309151	78.006	-146.110,5	85.423	-272.500,5	88.785	-332.454,3
8	0,78940923	78.006	-84.531,9	85.423	-205.066,8	88.785	-262.366,6
9	0,76641673	78.006	-24.746,8	85.423	-139.597,2	88.785	-194.320,3
10	0,74409391	78.006	33.297,0	85.423	-76.034,5	88.785	-128.255,9
11	0,72242128	78.006	89.650,2	85.423	-14.323,1	88.785	-64.115,8
12	0,70137988	78.006	144.362,0	85.423	45.590,9	88.785	-18.43,8

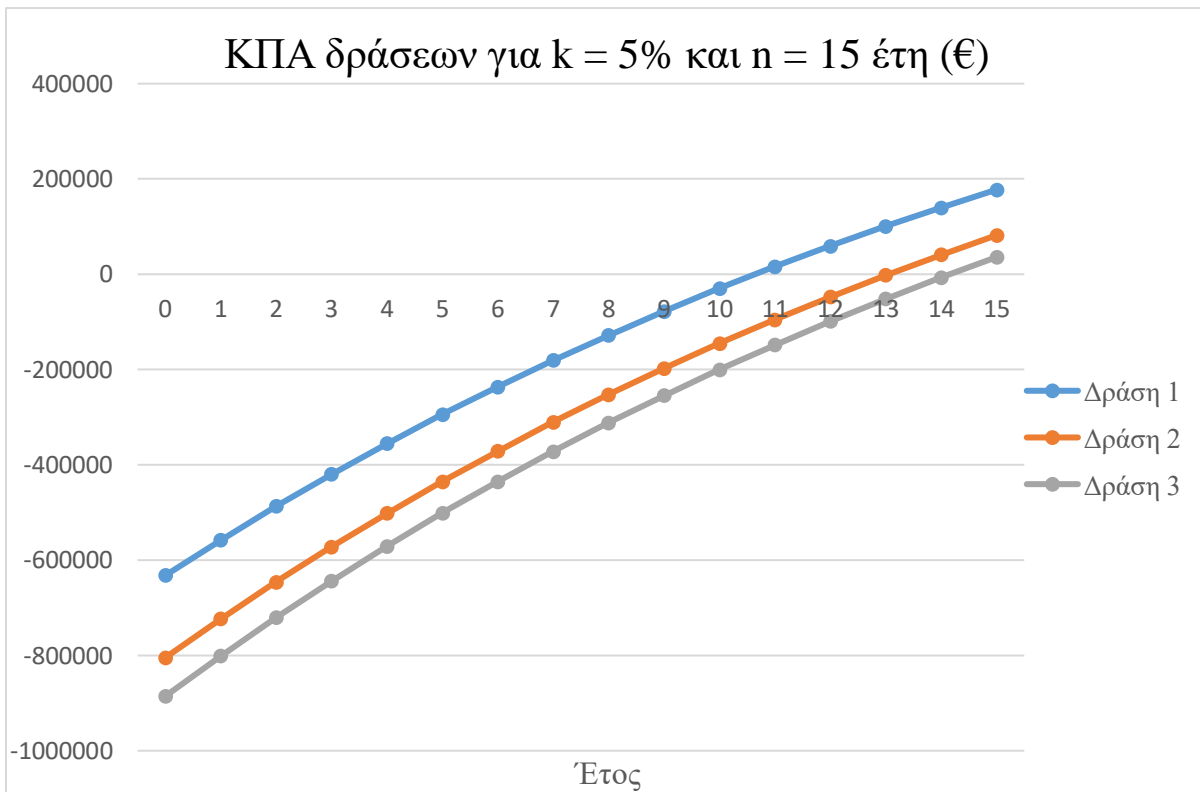
13	0,68095134	78.006	197.480,3	85.423	103.759,8	88.785	58.614,5
14	0,66111781	78.006	249.051,5	85.423	160.234,5	88.785	117.311,9
15	0,64186195	78.006	299.120,6	85.423	215.064,2	88.785	174.299,6
		ΚΠΑ₁:	299.121€	ΚΠΑ₂:	215.064€	ΚΠΑ₃:	174.300€

Πίνακας 71 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 5\%$ και $n = 15$ έτη

k=5%		Δράση 1		Δράση 2		Δράση 3	
t (Έτος)	Συντελεστής αναγωγής	ΚΤΡ	ΚΤΡ/(1+k)^t	ΚΤΡ	ΚΤΡ/(1+k)^t	ΚΤΡ	ΚΤΡ/(1+k)^t
0	0	-632.110	-632.110	-804710	-80.4710	-885610	-885610
1	0,95238095	70.688	-557.818,6	77531	-723.354,8	80228	-801.052,9
2	0,90702948	70.688	-487.064,8	77531	-645.873,6	80228	-720.522,2
3	0,86383760	70.688	-419.680,3	77531	-572.082,0	80228	-643.826,4
4	0,82270247	70.688	-355.504,6	77531	-501.804,3	80228	-570.782,8
5	0,78352617	70.688	-294.384,8	77531	-434.873,1	80228	-501.217,4
6	0,74621540	70.688	-236.175,6	77531	-371.129,2	80228	-434.964,7
7	0,71068133	70.688	-180.738,2	77531	-310.420,6	80228	-371.866,8
8	0,67683936	70.688	-127.940,6	77531	-252.603,0	80228	-311.773,7
9	0,64460892	70.688	-77.657,3	77531	-197.538,5	80228	-254.542,1
10	0,61391325	70.688	-29.768,3	77531	-145.096,2	80228	-200.035,8
11	0,58467929	70.688	15.840,1	77531	-95.151,2	80228	-148.125,0
12	0,55683742	70.688	59.276,8	77531	-47.584,5	80228	-98.686,2
13	0,53032135	70.688	100.645,1	77531	-22.82,8	80228	-51.601,6
14	0,50506795	70.688	140.043,4	77531	40.861,6	80228	-6.759,2
15	0,48101710	70.688	177.565,6	77531	81.951,5	80228	35.947,9
		ΚΠΑ₁:	177.566€	ΚΠΑ₂:	81.952€	ΚΠΑ₃:	35.948€



Εικόνα 53 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και $n = 15$ έτη



Εικόνα 54 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και $n = 15$ έτη

- Διάρκεια ζωής επένδυσης: 20 έτη

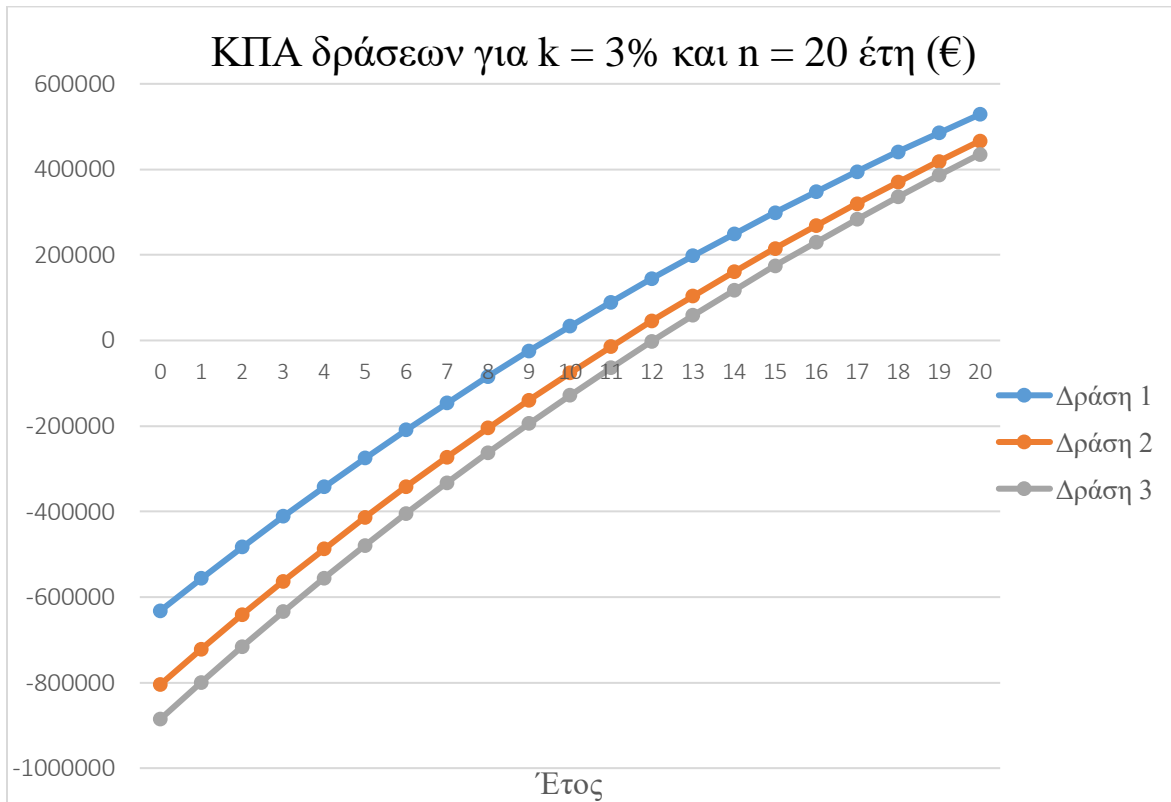
Πίνακας 72 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 3\%$ και $n = 20$ έτη

$k=3\%$		Δράση 1		Δράση 2		Δράση 3	
t (Έτος)	Συντελεστής αναγωγής	ΚΤΡ	$ΚΤΡ/(1+k)^t$	ΚΤΡ	$ΚΤΡ/(1+k)^t$	ΚΤΡ	$ΚΤΡ/(1+k)^t$
0	0	-632.110	-632.110	-80.4710	-804.710	-885.610	-885.610
1	0,97087379	78.006	-556.376,0	85.423	-721.775,0	88.785	-799.411,0
2	0,94259591	78.006	-482.847,9	85.423	-641.255,7	88.785	-715.722,6
3	0,91514166	78.006	-411.461,3	85.423	-563.081,5	88.785	-634.471,7
4	0,88848705	78.006	-342.154,0	85.423	-487.184,3	88.785	-555.587,4
5	0,86260878	78.006	-274.865,4	85.423	-413.497,7	88.785	-479.000,7
6	0,83748426	78.006	-209.536,6	85.423	-341.957,3	88.785	-404.644,7
7	0,81309151	78.006	-146.110,5	85.423	-272.500,5	88.785	-332.454,3
8	0,78940923	78.006	-84.531,9	85.423	-205.066,8	88.785	-262.366,6
9	0,76641673	78.006	-24.746,8	85.423	-139.597,2	88.785	-194.320,3
10	0,74409391	78.006	33.297,0	85.423	-76.034,5	88.785	-128.255,9
11	0,72242128	78.006	89.650,2	85.423	-14.323,1	88.785	-64.115,8
12	0,70137988	78.006	144.362,0	85.423	45.590,9	88.785	-1.843,8
13	0,68095134	78.006	197.480,3	85.423	103.759,8	88.785	58.614,5
14	0,66111781	78.006	249.051,5	85.423	160.234,5	88.785	117.311,9
15	0,64186195	78.006	299.120,6	85.423	215.064,2	88.785	174.299,6
16	0,62316694	78.006	347.731,3	85.423	268.297,0	88.785	229.627,4
17	0,60501645	78.006	394.926,2	85.423	319.979,3	88.785	283.343,8
18	0,58739461	78.006	440.746,5	85.423	370.156,3	88.785	335.495,7
19	0,57028603	78.006	485.232,3	85.423	418.871,9	88.785	386.128,5
20	0,55367575	78.006	528.422,3	85.423	466.168,5	88.785	435.286,6
		ΚΠΑ1:	528.422€	ΚΠΑ2:	466.189€	ΚΠΑ3:	435.287€

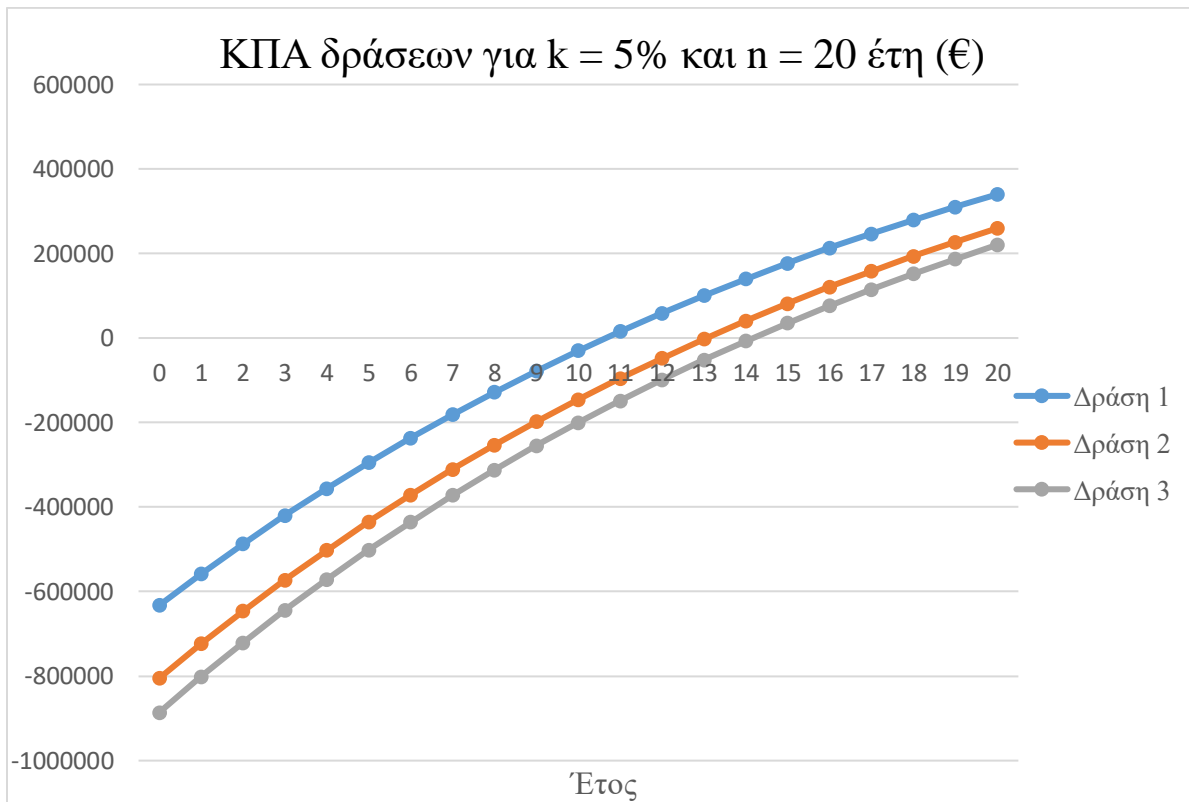
Πίνακας 73 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 5\%$ και $n = 20$ έτη

$k=5\%$		Δράση 1		Δράση 2		Δράση 3	
t (Έτος)	Συντελεστής αναγωγής	ΚΤΡ	$ΚΤΡ/(1+k)^t$	ΚΤΡ	$ΚΤΡ/(1+k)^t$	ΚΤΡ	$ΚΤΡ/(1+k)^t$
0	0	-632.110	-632.110	-804.710	-804.710	-885.610	-885.610
1	0,95238095	78.006	-557.818,6	85.423	-723.354,8	88.785	-801.052,9
2	0,90702948	78.006	-487.064,8	85.423	-645.873,6	88.785	-720.522,2
3	0,86383760	78.006	-419.680,3	85.423	-572.082,0	88.785	-643.826,4
4	0,82270247	78.006	-355.504,6	85.423	-501.804,3	88.785	-570.782,8
5	0,78352617	78.006	-294.384,8	85.423	-434.873,1	88.785	-501.217,4
6	0,74621540	78.006	-236.175,6	85.423	-371.129,2	88.785	-434.964,7
7	0,71068133	78.006	-180.738,2	85.423	-310.420,6	88.785	-371.866,8
8	0,67683936	78.006	-127.940,6	85.423	-252.603,0	88.785	-311.773,7
9	0,64460892	78.006	-77.657,3	85.423	-197.538,5	88.785	-254.542,1
10	0,61391325	78.006	-29.768,3	85.423	-145.096,2	88.785	-200.035,8
11	0,58467929	78.006	15.840,1	85.423	-95.151,2	88.785	-148.125,0
12	0,55683742	78.006	59.276,8	85.423	-47.584,5	88.785	-98.686,2
13	0,53032135	78.006	100.645,1	85.423	-2.282,8	88.785	-51.601,6

14	0,50506795	78.006	140.043,4	85.423	40.861,6	88.785	-6.759,2
15	0,48101710	78.006	177.565,6	85.423	81.951,5	88.785	35.947,9
16	0,45811152	78.006	213.301,1	85.423	121.084,8	88.785	76.621,4
17	0,43629669	78.006	247.334,8	85.423	158.354,6	88.785	115.358,0
18	0,41552065	78.006	279.747,9	85.423	193.849,6	88.785	152.250,0
19	0,39573396	78.006	310.617,5	85.423	227.654,4	88.785	187.385,2
20	0,37688948	78.006	340.017,2	85.423	259.849,4	88.785	220.847,3
		КПА1:	340.017€	КПА2:	289.849€	КПА3:	220.847€



Εικόνα 55 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και $n = 20$ έτη



Εικόνα 56 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και $n = 20$ έτη

Σύμφωνα με το κριτήριο της ΚΠΑ, η 1^η δράση είναι η καλύτερη με διαφορά, ανεξαρτήτως διάρκειας ζωής της επένδυσης, και ιδιαίτερα με επιτόκιο αναγωγής ίσο με 5%. Το μικρό απαιτούμενο κόστος επένδυσης της 1^{ης} δράσης δίνει σημαντικό προβάδισμα στην 1^η δράση, το οποίο δεν μπορούν να καλύψουν οι άλλες δύο δράσεις ακόμη και για 20 έτη διάρκειας ζωής της επένδυσης. Ωστόσο, όλες οι δράσεις εγκρίνονται και βάσει αυτού του κριτηρίου, καθώς έχουν ΚΠΑ σημαντικά μεγαλύτερη του μηδενός, παρέχοντας σημαντικό οικονομικό όφελος εφόσον υλοποιηθούν.

6.2.3. Κριτήριο του Δείκτη Αποδοτικότητας – ΔΑ (Cost Effectiveness Index – CEI)

Το κριτήριο του δείκτη αποδοτικότητα (ΔΑ) δείχνει την απόδοση της επένδυσης ανά μονάδα κεφαλαίου λαμβάνοντας υπόψιν τη μεταβολή στην αξία του χρήματος με την πάροδο του χρόνου. Ο ΔΑ ορίζεται ως το πηλίκο της τωρινής αξίας των αναμενόμενων ετήσιων οικονομικών οφελών προς το κόστος επένδυσης. Για την αξιολόγηση των επενδύσεων βάσει αυτού του κριτηρίου, οι επενδύσεις με ΔΑ>1 απορρίπτονται, ενώ από όσες έχουν ΔΑ<1 θεωρείται βέλτιστη αυτή με τη μικρότερη τιμή ΔΑ.

$$\Delta A = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{KTP_t}{(1+k)^t}}{K_0}$$

όπου:

K₀ : το κόστος επένδυσης

KTP_t : οι καθαρές ταμειακές ροές του έτους t εκφρασμένες σε τιμές συγκεκριμένης περιόδου, δηλαδή χωρίς πληθωρισμό

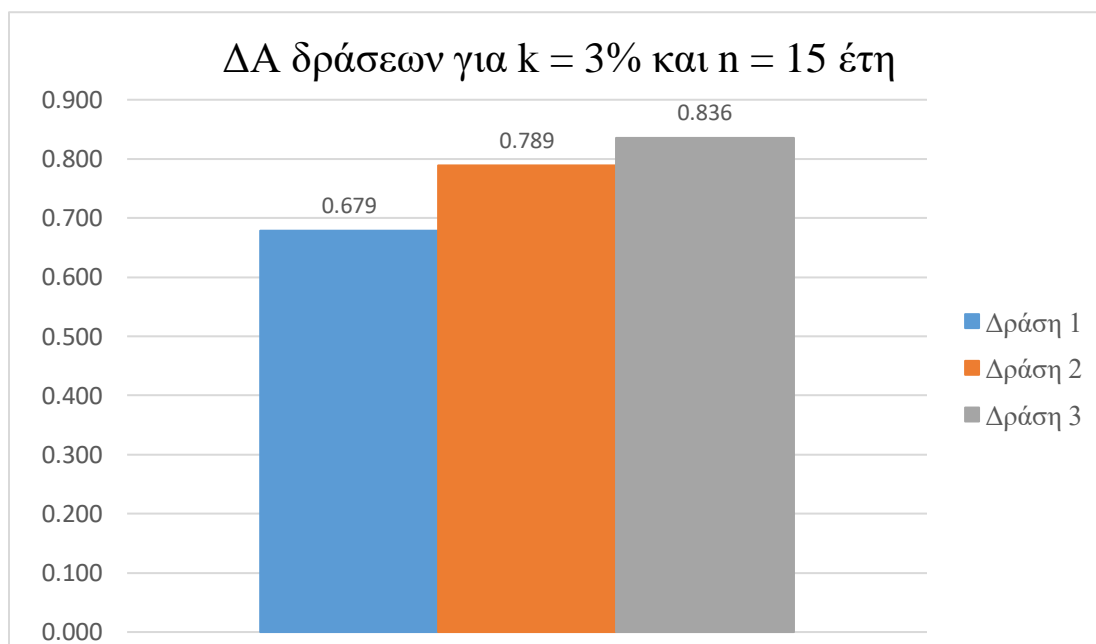
k : κόστος αναγωγής ή προεξόφλησης

n : η διάρκεια ζωής της επένδυσης

- Διάρκεια ζωής επένδυσης: 15 έτη

Πίνακας 74 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής k = 3% και n = 15 έτη

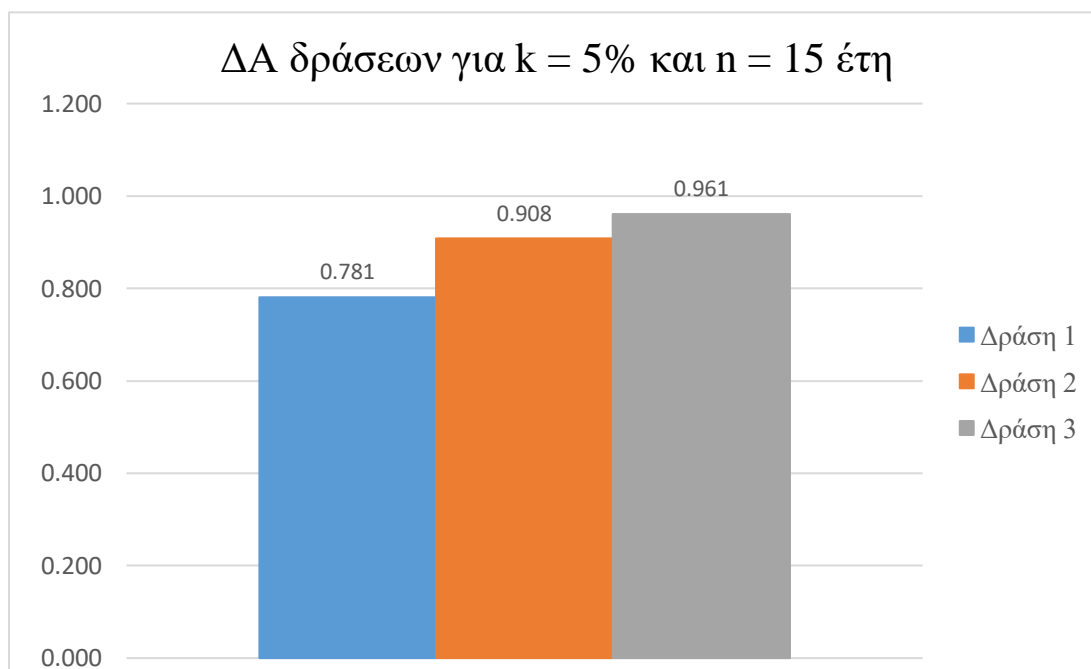
Δράση	1 ^η	2 ^η	3 ^η
K₀	632.110€	804.710€	885.610€
Άθροισμα ανηγμένων Καθαρών Ταμειακών Ροών	931.231€	1.019.774€	1.059.910€
ΔΑ	0,679	0,789	0,836



Εικόνα 57 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 15 έτη

Πίνακας 75 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής k = 5% και n = 15 έτη

Δράση	1 ^η	2 ^η	3 ^η
K₀	632.110€	804.710€	885.610€
Άθροισμα ανηγμένων Καθαρών Ταμειακών Ροών	809.676	886.662	921.558€
ΔΑ	0,781	0,908	0,961



Εικόνα 58 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 15 έτη

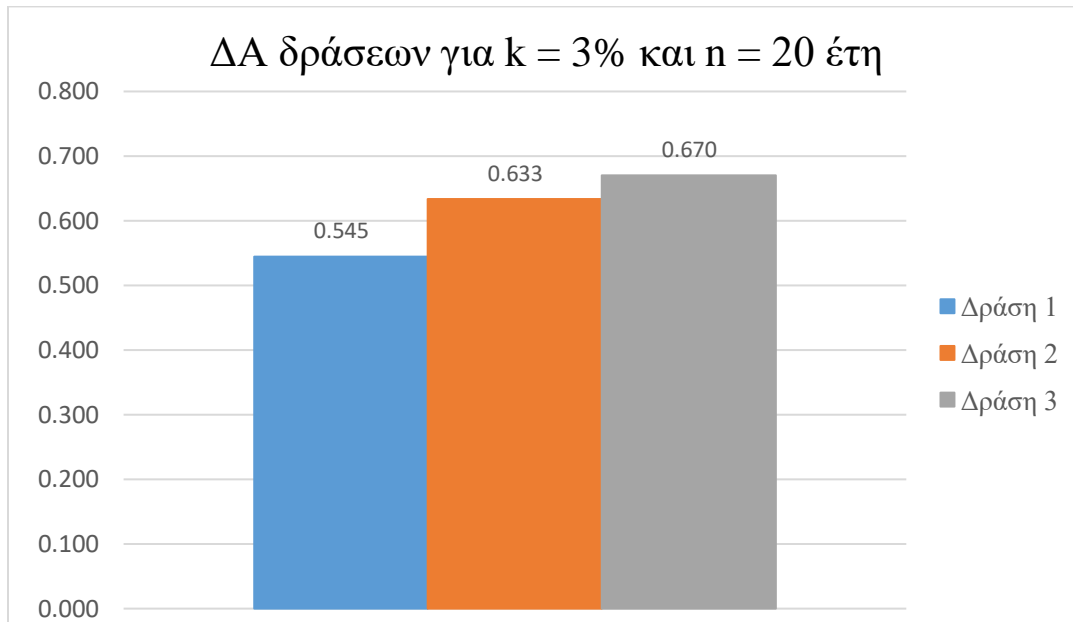
- **Διάρκεια ζωής επένδυσης: 20 έτη**

Πίνακας 76 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής k = 3% και n = 15 έτη

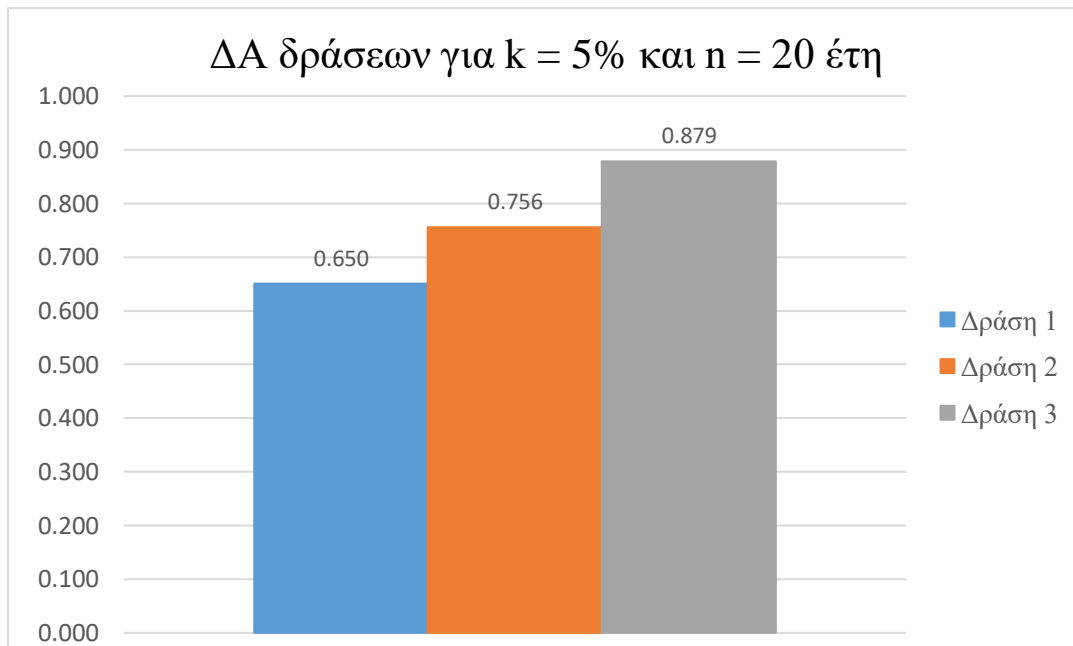
Δράση	1 ^η	2 ^η	3 ^η
K₀	632.110€	804.710€	885.610€
Άθροισμα ανηγμένων Καθαρών Ταμειακών Ροών	1.160.532€	1.270.879€	1.320.897€
ΔΑ	0,545	0,633	0,670

Πίνακας 77 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής k = 5% και n = 15 έτη

Δράση	1 ^η	2 ^η	3 ^η
K₀	632.110€	804.710€	885.610€
Άθροισμα ανηγμένων Καθαρών Ταμειακών Ροών	972.127€	1.064.559€	1.007.968€
ΔΑ	0,650	0,756	0,879



Εικόνα 59 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και $n = 20$ έτη



Εικόνα 60 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και $n = 20$ έτη

Το κριτήριο του ΔΑ, αναδεικνύει την απλή αντικατάσταση των υπάρχοντων λαμπτήρων με φωτιστικά LED ως τη βέλτιστη επένδυση. Ανεξαρτήτως επιτοκίου αναγωγής και διάρκειας ζωής της επένδυσης εγκρίνονται όλες οι προτεινόμενες δράσεις, με ΔΑ κατά πολύ μικρότερη της μονάδας τις περισσότερες περιπτώσεις, με την 1^η δράση να έχει σταθερά τη μικρότερη τιμή ΔΑ.

6.2.4. Κριτήριο του Σταθμισμένου Κόστους Εξοικονομούμενης Ενέργειας – ΣΚΕΕ (Levelized Energy Efficiency Cost – LEEC)

Το κριτήριο του σταθμισμένου κόστους εξοικονομούμενης ενέργειας υπολογίζει το κόστος που απαιτείται για την εξοικονόμηση μιας μονάδας ενέργειας (1 kWh). Το ΣΚΕΕ ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος της μελλοντικής αξίας του κεφαλαίου επένδυσης στη διάρκεια ζωής της επένδυσης προς την εξοικονομούμενη ενέργεια. Το κριτήριο του ΣΚΕΕ υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{ΣΚΕΕ} = \frac{K_0 * \frac{k * (1 + k)^n}{(1 + k)^n - 1} + K_{\text{επένδυσης ετήσιο}}}{E_{\text{ετήσια υφιστάμενη}} - E_{\text{ετήσια επένδυσης}}}$$

όπου:

K_0 : το κεφάλαιο επένδυσης

$K_{\text{επένδυσης ετήσιο}}$: το ετήσιο κόστος λειτουργίας μετά την επένδυση

$E_{\text{επένδυσης ετήσια}}$: η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια μετά την επένδυση

$E_{\text{ετήσια υφιστάμενη}}$: η υφιστάμενη ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια

k : το επιτόκιο αναγωγής ή προεξόφλησης

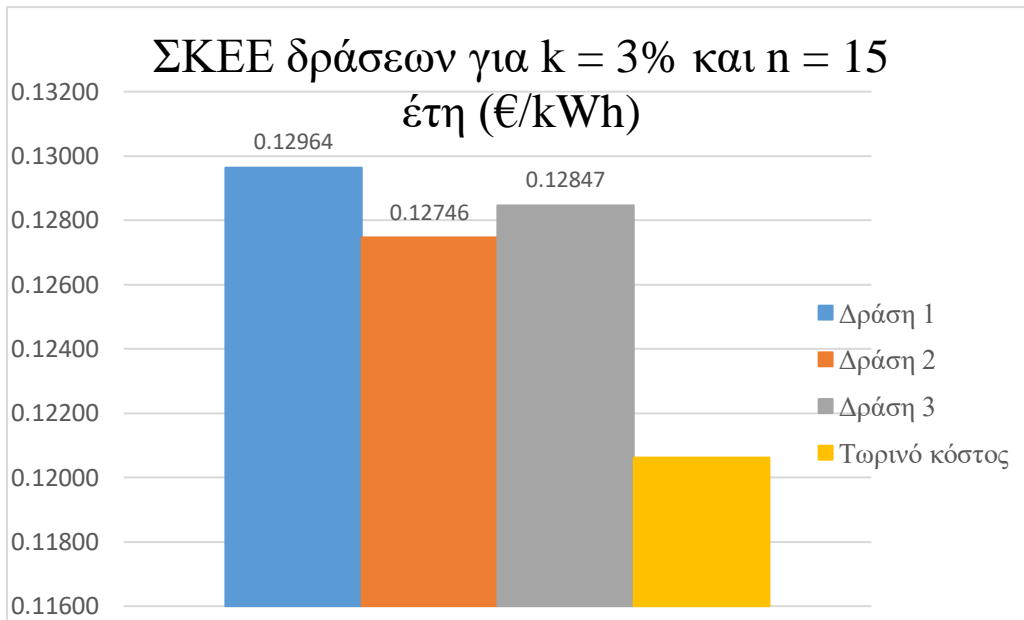
n : η διάρκεια ζωής της επένδυσης

- **Διάρκεια ζωής: 15 έτη**

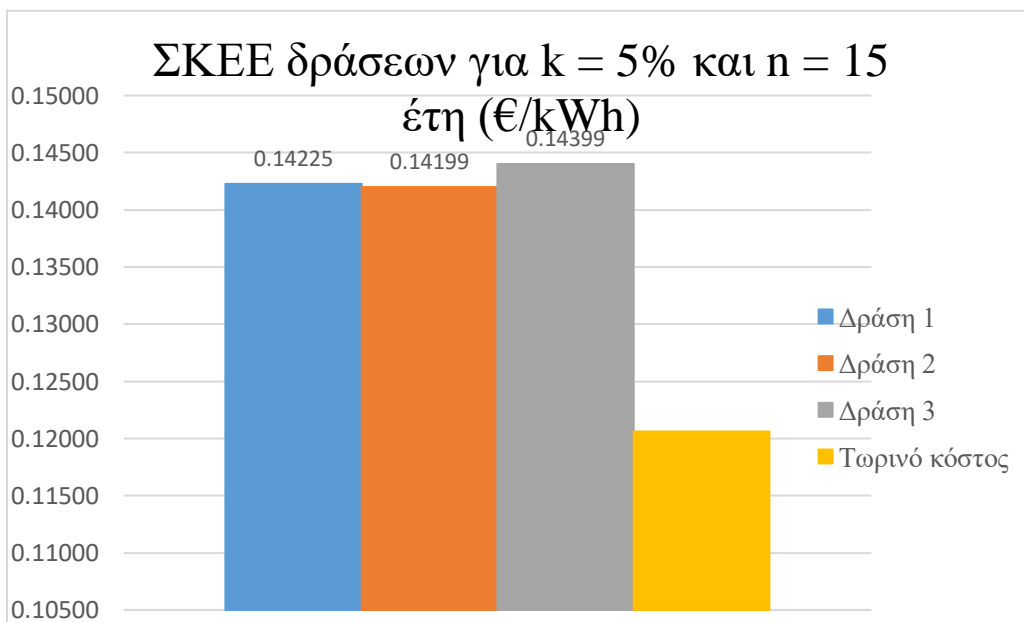
Ο υπολογισμός του ΣΚΕΕ για την κάθε δράση φαίνεται στον «Πίνακα 76».

Πίνακας 78 – ΣΚΕΕ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής 3% και 5% και $n = 15$ έτη

n = 15 έτη	k=3%			k=5%		
	1η	2η	3η	1η	2η	3η
Δράση						
K_0	632.110€	804.711€	885.610€	632.110€	804.711€	885.610€
$K_{\text{επένδυσης ετήσιο}}$	28.773€	21.356€	17.994€	28.773€	21.356€	17.994€
$E_{\text{επένδυσης ετήσια}}$	224.916 kWh	158.872 kWh	137.762 kWh	224.916 kWh	158.872 kWh	137.762 kWh
$E_{\text{ετήσια υφιστάμενη}}$	855.286 kWh					
ΣΚΕΕ (€/kWh)	0,12964	0,12746	0,12847	0,14225	0,14199	0,14399



Εικόνα 61 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 3% και $n = 15$ έτη

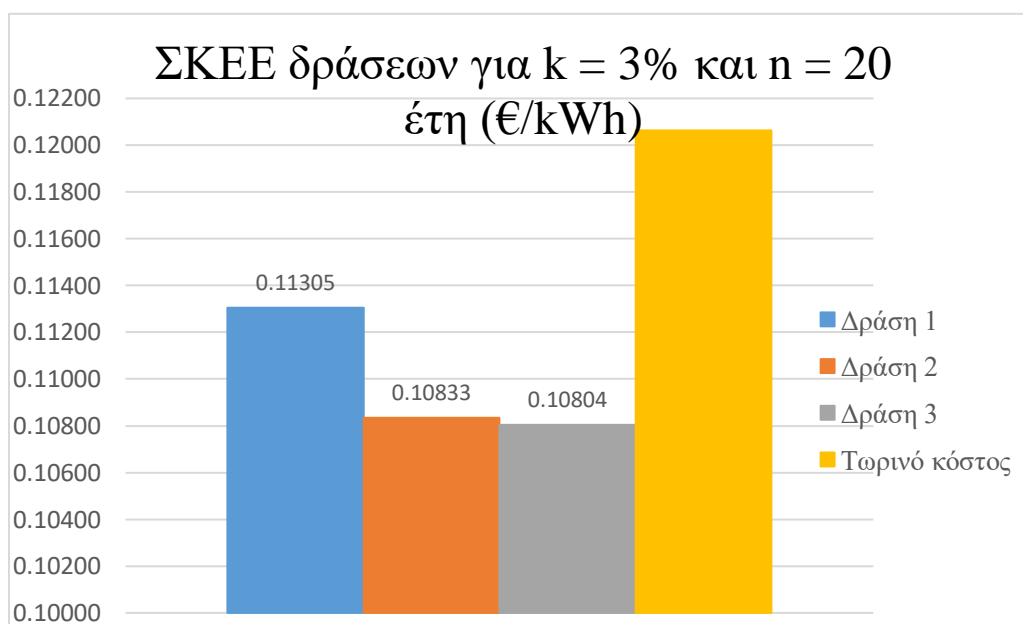


Εικόνα 62 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 5% και $n = 15$ έτη

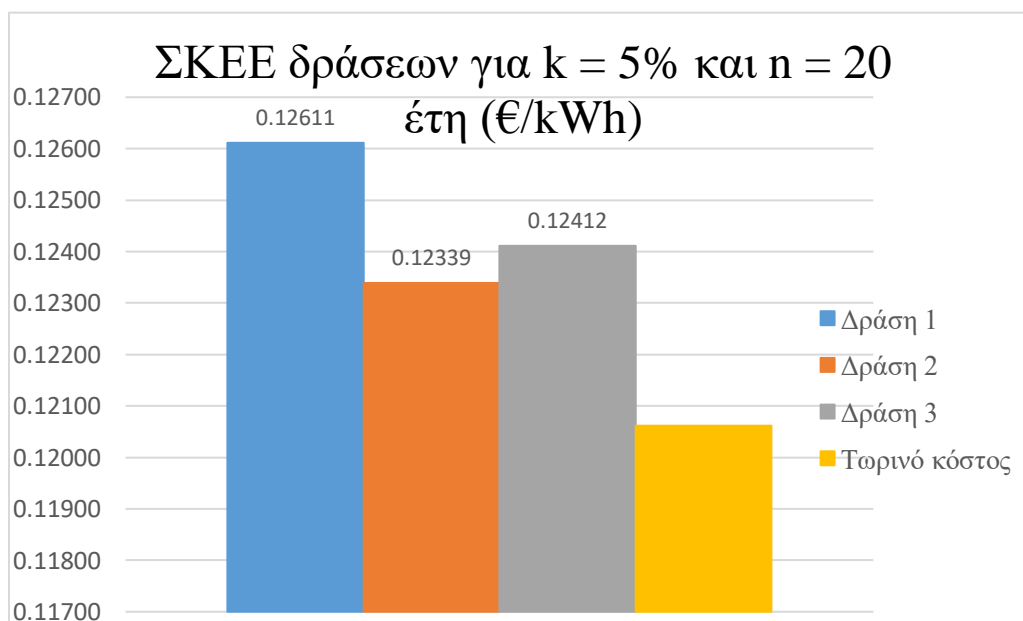
- Διάρκεια ζωής: 20 έτη

Πίνακας 79 – ΣΚΕΕ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής 3% και 5%

n = 20 έτη	k=3%			k=5%		
Δράση	1η	2η	3η	1η	2η	3η
K_0	632.110€	804.711€	885.610€	632.110€	804.711€	885.610€
$K_{\text{επένδυσης ετήσιο}}$	28.773€	21.356€	17.994€	28.773€	21.356€	17.994€
$E_{\text{επένδυσης ετήσια}}$	224.916 kWh	158.872 kWh	137.762 kWh	224.916 kWh	158.872 kWh	137.762 kWh
$E_{\text{υφιστάμενη ετήσια}}$	855.286 kWh					
ΣΚΕΕ (€/kWh)	0,11305	0,10833	0,10804	0,12611	0,12339	0,12412



Εικόνα 63 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 20 έτη



Εικόνα 64 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 20 έτη

Το κριτήριο του ΣΚΕΕ αντίθετα με τα υπόλοιπα κριτήρια που εξετάστηκαν, δεν έχει μια σταθερή τιμή για την απόρριψη ή έγκριση των προς μελέτη επενδύσεων. Ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιεί την τρέχουσα χρέωση της ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh. Εφόσον μια επένδυση έχει τιμή ΣΚΕΕ μικρότερη της χρέωσης αυτής, αυτό σημαίνει πως οδηγεί σε εξοικονόμηση, ενώ αν έχει μεγαλύτερη απορρίπτεται, καθώς οδηγεί σε αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να συνυπολογισθούν όλες οι χρεώσεις όπως ο ΦΠΑ στο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh που χρεώνεται το Ε.Μ.Π., αυτό θα υπολογισθεί διαιρώντας το ετήσιο κόστος λειτουργίας της τρέχουσας εγκατάστασης με την τρέχουσα κατανάλωση ενέργειας.

$$\frac{106.779\text{€}}{885.286 \text{ kWh}} = 0,12062 \text{ €/kWh}$$

Χρησιμοποιώντας την τιμή αυτή ως σημείο αναφοράς, φαίνεται πως στην περίπτωση της διάρκειας ζωής της επένδυσης των 15 ετών, δηλαδή την συντηρητική εκτίμηση που θεωρήθηκε για παν ενδεχόμενο, καμία από τις δράσεις δεν αποφέρει ΣΚΕΕ μικρότερο του τρέχοντος κόστους ανά kWh. Στη πιο ρεαλιστική εκδοχή των 20 ετών, οι τρεις δράσεις εγκρίνονται μαζί, μόνο όμως με επιτόκιο αναγωγής ίσο με 3%, με την 3^η δράση να έχει τη μικρότερη τιμή ΣΚΕΕ. Για επιτόκιο αναγωγής ίσο με 5% δεν εγκρίνεται καμία από τις δράσεις ακόμη και για διάρκεια ζωής της επένδυσης ίση με 20 έτη.

6.3. Σύγκριση δράσεων εξοικονόμησης

Για την αξιολόγηση των δράσεων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα κριτήρια. Η κατάταξη των δράσεων δεν κατέληξε να είναι ίδια για όλα τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν, συνεπώς το να ληφθεί ο μέσος όρος της κατάταξης της κάθε δράσης για να γίνει η συνολική η εκτίμηση θα αποτελούσε λογικό σφάλμα, καθώς δύο δράσεις μπορούν να έχουν παρόμοιες τιμές σε όλους τους δείκτες πέραν ενός που η μια να υπερτερεί σημαντικά και αυτό να μην αναδειχθεί κατάλληλα. Επιπλέον, είναι πιθανό για κάποιο κριτήριο μια επένδυση οριακά να απορρίπτεται, ενώ για τα άλλα να παρουσιάζει πλεονέκτημα σε σχέση με τις υπόλοιπες δράσεις. Για τους λόγους αυτούς θα γίνει προσαρμογή των τιμών πριν γίνει η συνεκτίμηση των κριτηρίων, θεωρώντας ως «1» την τιμή του κριτηρίου της βέλτιστης λύσης και τα υπόλοιπα θα αναγράφονται σε σχέση με αυτό, όπως φαίνεται στους «Πίνακες 81 και 802 για 15 έτη διάρκειας ζωής της επένδυσης και στους «Πίνακες 84 και 85» για 20 έτη διάρκειας ζωής.

- **Διάρκεια ζωής: 15 έτη**

Πίνακας 80 – Τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για n = 15 έτη

Κριτήριο	Δράση 1	Δράση 2	Δράση 3
ROI	1,85	1,59	1,50
ΚΠΑ (k = 3%)	299.121	215.064	174.300
ΚΠΑ (k = 5%)	177.566	81.952	35.948
ΔΑ (k = 3%)	0,679	0,789	0,836
ΔΑ (k = 5%)	0,781	0,908	0,961
ΣΚΕΕ (k = 3%)	0,12964	0,12746	0,12847
ΣΚΕΕ (k = 5%)	0,14225	0,14199	0,14399

Πίνακας 81 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για k=3% για n = 15 έτη

Κριτήριο	Δράση 1	Δράση 2	Δράση 3
ROI	1,00000	0,86020	0,81238
ΚΠΑ (k = 3%)	1,00000	0,71899	0,58271
ΔΑ (k = 3%)	1,00000	0,86020	0,81239
ΣΚΕΕ (k = 3%)	0,98315	1,00000	0,99215
Μ.Ο.	0,99579	0,85985	0,79991

Πίνακας 82 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για k=5% για n = 15 έτη

Κριτήριο	Δράση 1	Δράση 2	Δράση 3
ROI	1,00000	0,86020	0,81238
ΚΠΑ (k = 5%)	1,00000	0,46153	0,20245
ΔΑ (k = 5%)	1,00000	1,05886	0,00000
ΣΚΕΕ (k = 5%)	0,99815	1,00000	0,98611
M.O.	0,99954	0,84515	0,50024

- Διάρκεια ζωής: 20 έτη

Πίνακας 83 – Τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για n = 15 έτη

Κριτήριο	Δράση 1	Δράση 2	Δράση 3
ROI	2,47	2.12	2,01
ΚΠΑ (k = 3%)	528.422	466.189	435.287
ΚΠΑ (k = 5%)	340.071	289.849	220.847
ΔΑ (k = 3%)	0,545	0,633	0,670
ΔΑ (k = 5%)	0,650	0,756	0,879
ΣΚΕΕ (k = 3%)	0,11305	0,10833	0,10804
ΣΚΕΕ (k = 5%)	0,12611	0,12339	0,12412

Πίνακας 84 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για k=3% για n = 20 έτη

Κριτήριο	Δράση 1	Δράση 2	Δράση 3
ROI	1,00000	0,86020	0,81238
ΚΠΑ (k = 3%)	1,00000	0,71899	0,58271
ΔΑ (k = 3%)	0,81239	0,94441	1,00000
ΣΚΕΕ (k = 3%)	0,98315	1,00000	0,99215
M.O.	0,94888	0,88090	0,84681

Πίνακας 85 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για k=5% για n = 20 έτη

Κριτήριο	Δράση 1	Δράση 2	Δράση 3
ROI	1,00000	0,86020	0,81238
ΚΠΑ (k = 5%)	1,00000	0,46153	0,20245
ΔΑ (k = 5%)	0,81238	0,94441	1,00000
ΣΚΕΕ (k = 5%)	0,99815	1,00000	0,98611
M.O.	0,95263	0,81654	0,75024

Η 1^η δράση αποδεικνύεται η πιο συμφέρουσα από κάθε σχεδόν άποψη, πέραν του ΣΚΕΕ. Αυτό οφείλεται στην έμφαση που δίνει του κριτηρίου του ΣΚΕΕ στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, κάτι που η 2^η και η 3^η δράση το κάνουν σε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό από την 1^η. Όσον αφορά το ΣΚΕΕ, η μόνη συνθήκη για τις οποίες οι επενδύσεις εγκρίνονται είναι για επιτόκιο αναγωγής ίσο με 3% και διάρκεια ζωής της επένδυσης 20 έτη. Υπό τις συνθήκες αυτές, η καλύτερη επένδυση είναι η 3^η, με τη 2^η να βρίσκεται εξαιρετικά κοντά. Για όλες τις υπόλοιπες συνθήκες αν και δεν εγκρίνονται οι δράσεις, η 2^η έχει την καλύτερη τιμή ΣΚΕΕ.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα, διότι σε μια εγκατάσταση φωτισμού, η αντικατάσταση των παλαιών φωτιστικών με LED αποτελεί την αλλαγή που θα επιφέρει τη πιο δραστική μείωση στην κατανάλωση και στο κόστος λειτουργίας. Στη συνέχεια οι άλλες δράσεις επιχειρούν τη βελτιστοποίηση μιας ήδη σημαντικά βελτιωμένης εγκατάστασης. Το βασικό κόστος που έδωσε το «προβάδισμα» στην 1^η δράση, είναι το μεγάλο κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος απομακρυσμένης διαχείρισης. Με τις τιμές που επιλέχθηκαν, το κόστος εγκατάστασης αποδείχθηκε τόσο μεγάλο, που το διάστημα απόσβεσης για τη 2^η και την 3^η δράση είναι

μεγαλύτερο της υπολογιζόμενης διάρκειας ζωής της επένδυσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει όμως να αναφερθεί ότι η διάρκεια ζωής της επένδυσης ορίστηκε αυθαίρετα ως τη διάρκεια εντός της οποίας η επένδυση δε θα απαιτούσε αντικατάσταση λαμπτήρων. Εδώ όμως εμπεριέχεται ένα σφάλμα που οφείλεται στην ιδιαιτερότητα ενός έργου φωτισμού από οικονομοτεχνική σκοπιά.

Το σφάλμα αυτό είναι πως όταν η διάρκεια ζωής της επένδυσης λήξει και έρθει η ώρα αντικατάστασης των πλακετών LED και λοιπών εξαρτημάτων, το κόστος της επένδυσης ανανέωσης της διάρκειας ζωής της εγκατάστασης θα είναι σημαντικά μειωμένο. Ενδεικτικά, όταν έρθει η ώρα για αντικατάσταση των πλακετών LED για ένα φωτιστικό αξίας 440 ευρώ, είναι ρεαλιστική η εκτίμηση ότι η πλακέτα για την αντικατάσταση θα κοστίζει περί τα 80 ευρώ. Αυτό συμβαίνει διότι στο κόστος των φωτιστικών εμπεριέχεται και το κόστος εγκατάστασής τους, κόστος το οποίο θα απουσιάζει στο μέλλον, όπου θα απαιτείται μόνο η ανανέωση πλακετών LED. Όσον αφορά την 3^η δράση, η οποία παρουσίασε τα χειρότερα αποτελέσματα, αυτό οφείλεται στις τοπογραφικές ιδιαιτερότητες της Πολυτεχνειούπολης. Λόγω της ύπαρξης μεγάλου αριθμού διασταυρώσεων και θέσεων εισόδου – εξόδου στους δρόμους τους πεζόδρομους και τον ποδηλατόδρομο απαιτείται ιδιαίτερα αυξημένος αριθμός αισθητήρων προκειμένου να μπορεί να λειτουργεί με ασφάλεια το σύστημα φωτισμού. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, εκτιμάται πως αν γινόταν η επιλογή να επεκταθεί το ωράριο εφαρμογής του δυναμικού φωτισμού σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος φωτισμού, είναι πιθανό η εξοικονόμηση ενέργειας να επέφερε επαρκώς έγκαιρη απόσβεση και θα γινόταν αποδεκτή βάσει όλων των κριτηρίων ακόμη και με κριτήριο αναγωγής ίσο με 5%.

Βάσει των παραπάνω, η πιο οικονομικά συμφέρουσα δράση είναι η απλούστερη, δηλαδή η απλή αντικατάσταση των υπαρχόντων φωτιστικών με φωτιστικά LED.

7. Προτεινόμενη λύση και συμπεράσματα

Στα Κεφάλαια 5 και 6, έγινε αξιολόγηση τριών εναλλακτικών δράσεων επί του συστήματος εξωτερικού φωτισμού του Ε.Μ.Π. για να εκτιμηθεί η ετήσια εξοικονόμηση και η βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών του χώρου. Και οι τρεις αυτές δράσεις περιλαμβάνουν την αντικατάσταση των φωτιστικών σωμάτων του Ε.Μ.Π. με νέα φωτιστικά LED, καθώς και τη ρύθμιση της φωτεινής ροής των προβολέων κατά την εγκατάστασή τους ώστε να αποφευχθεί ο υπερφωτισμός. Η αντικατάσταση των φωτιστικών LED εκτιμήθηκε στην ενότητα 5.1.2., όπου έγινε ενεργειακή αξιολόγηση της εγκατάστασης. Η ενεργειακή αξιολόγηση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τελική εγκατάσταση είναι εξαιρετικά επωφελής από ενεργειακή σκοπιά, ενώ παράλληλα οδηγεί σε εξοικονόμηση 70,7% καταναλισκόμενης ενέργειας.

Στις επόμενες ενότητες του Κεφαλαίου 5 έγινε αναλυτική παρουσίαση άλλων δράσεων, δηλαδή της εφαρμογής στατικού και δυναμικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού. Από άποψη ενεργειακής κατανάλωσης, οι δύο αυτές δράσεις επιτυγχάνουν ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με την υφιστάμενη εγκατάσταση, 81,42% και 83,89% αντίστοιχα, η οποία έχει ανάλογο αντίκτυπο στο ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας, αλλά και συντήρησης, τα οποία μειώνονται. Από οικολογικής σκοπιάς, η μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από την εφαρμογή της 3^{ης} λύσης. Επομένως αν το έργο αυτό γίνεται στα πλαίσια εντατικών δράσεων στην Ελλάδα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από δημόσιους φορείς, για να επιτευχθεί μικρότερη κατανάλωση τις νυχτερινές ώρες και μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης της ζήτησης από ΑΠΕ, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η 3^η δράση οδηγεί στα καλύτερα αποτελέσματα και διευκολύνει περισσότερο την επίτευξη των στόχων.

Στο 6^ο Κεφάλαιο έγινε η οικονομική αξιολόγηση των δράσεων με τη χρήση τεσσάρων δημοφιλών κριτηρίων αξιολόγησης επενδύσεων. Η οικονομική αξιολόγηση κατέληξε στην ανάδειξη της πρώτης, μινιμαλιστικής δράσης, ως τη βέλτιστη. Η διαφορά των δράσεων ήταν μικρή σχεδόν με όλα τα κριτήρια αξιολόγησης, ενώ με το κριτήριο του ΣΚΕΕ η 2^η και 3^η δράση παρουσιάζονται ως πιο συμφέρουσες από την 1^η. Οι δράσεις 2 και 3, ενώ καταλήγουν σε σημαντική εξοικονόμηση στο ετήσιο κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης, έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα: το υπερβολικά μεγάλο κόστος του κεφαλαίου επένδυσης. Το κόστος αυτό είναι τόσο μεγάλο, που η απόσβεση έρχεται έπειτα από υπερβολικά μεγάλο χρόνο λειτουργίας. Πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω της αδυναμίας διεξαγωγής ουσιαστικής έρευνας λόγω της απουσίας τιμών στις ιστοσελίδες των διαφόρων παρόχων λύσεων έξυπνου φωτισμού, είναι πιθανό οι δράσεις 2 και 3 να παρουσίασαν χειρότερες οικονομικές επιδόσεις λόγω υπερβολικά υψηλών τιμών. Εφόσον γίνει μια καλύτερη συμφωνία για την αγορά των ελεγκτών των τομέων και των φωτιστικών σωμάτων, αλλά και των αισθητήρων κίνησης, η διαφορά στη τιμή των τεμαχίων είναι εφικτό να καθιστά τις δύο δράσεις βέλτιστες.

Ένα ζήτημα που πρέπει να αναφερθεί σε τέτοιου είδους δράσεις εξοικονόμησης, είναι πως τα οικονομικά τους οφέλη συνεχίζουν να υπάρχουν ακόμη και μετά από το διάστημα που σε άλλους συνηθισμένους οικονομικούς χώρους οι επενδύσεις έχουν κλείσει τον κύκλο ζωής τους. Αν και η μελέτη έγινε θεωρώντας πως ο χρόνος ζωής της επένδυσης (15 και 20 έτη) ισούται με τον χρόνο ζωής των νέων φωτιστικών τύπου LED, εφόσον ο χρόνος ζωής της επένδυσης θεωρείτο 30 ή 40 έτη, θα μπορούσε να ληφθεί υπόψιν και ένας ακόμη κύκλος αντικατάστασης LED chips, κατά τον οποίο οι 3 προτεινόμενες δράσεις θα σημείωναν ακόμη μεγαλύτερες εξοικονομήσεις λόγω του μειωμένου κόστους συντήρησης, το οποίο στην περίπτωση της υφιστάμενης εγκατάστασης θα περιλάμβανε το αυξημένο κόστος αντικατάστασης των υφιστάμενων λαμπτήρων.

Είναι κρίσιμο να σημειωθεί ότι, σε όλα τα στάδια της μελέτης, όπου δεν υπήρχαν επαρκή στοιχεία θεωρήθηκε η χείριστη δυνατή περίπτωση. Είναι απίθανο σε όλα αυτά τα στάδια οι χείριστες να είναι οι πραγματικές συνθήκες στην περίπτωση εγκατάστασης ενός έξυπνου συστήματος φωτισμού, οπότε οι εξοικονομήσεις, τα κόστη και οικονομικοί δείκτες που υπολογίστηκαν, έχουν τις λιγότερο ευνοϊκές τιμές που θα μπορούσαν να έχουν. Ακόμη, στην περίπτωση των ωρολογίων προγραμμάτων φωτισμού, επίσης λόγω έλλειψης δεδομένων, επιλέχθηκαν κλάσεις φωτισμού τέτοιες, ώστε δίχως πρότερη μελέτη, να μην υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης υποφωτισμού. Σε περίπτωση εφαρμογής ενός τέτοιου προγράμματος φωτισμού προτείνεται η πρότερη συλλογή δεδομένων προσέλευσης ανθρώπων στο Ε.Μ.Π. καθώς και της κίνησής τους σε κομβικά σημεία της Πολυτεχνειούπολης, για να είναι εφικτή η διεξαγωγή στατιστικής μελέτης για την ακριβέστερη εκτίμηση των κλάσεων φωτισμού ανά ώρα λειτουργίας.

Στην περίπτωση της 3^{ου} σεναρίου, λόγω της έλλειψης μιας τέτοιας στατιστικής μελέτης, οι αισθητήρες επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν μόνο στο διάστημα 1:00 π.μ. – 5:00 π.μ., που μέχρι πρότινος είχαν χαρακτηριστεί ως ζώνες χαμηλής κυκλοφορίας. Συνεπώς, η εξοικονόμηση από τους αισθητήρες επιτυγχάνεται επί ωρών λειτουργίας όπου η κατανάλωση είναι ήδη εξαιρετικά μειωμένη. Έχοντας επαρκή δεδομένα για την κίνηση εντός του Ε.Μ.Π. καθόλη τη διάρκεια της πολιτικής νύκτας, είναι εφικτή η επέκταση του προγράμματος δυναμικού φωτισμού σε όλες τις ώρες λειτουργίας. Εκεί, η εξοικονόμηση θα είναι θεαματικά μεγαλύτερη, λόγω της μείωσης της κατανάλωσης σε ώρες ονομαστικής ή αυξημένης λειτουργίας των φωτιστικών, συνεπώς η υποβάθμιση των φωτιστικών σε κατώτερη κλάση φωτισμού θα έχει πολύ σημαντικότερη επίπτωση από τη μείωση από ζώνη χαμηλής σε ζώνη ελάχιστης κυκλοφορίας. Τέλος, επιλέχθηκε συχνότητα ενεργοποίησης των αισθητήρων στο Ε.Μ.Π. 20% της συνολικής λειτουργίας του προγράμματος δυναμικού φωτισμού, η οποία είναι μια εξαιρετικά ασφαλής εκτίμηση και έγινε για να μη διακινδυνευθεί η ασφάλεια των χρηστών του Ε.Μ.Π. από αστοχία στην εκτίμηση αυτή. Μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση είναι 10%, η οποία θα οδηγούσε και σε αντίστοιχη εξοικονόμηση με το πρόγραμμα λειτουργίας που περιεγράφηκε στην ενότητα 5.3.1.

Βάσει όλων των παραπάνω, η δράση που προτείνεται, είναι η χρήση στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού (ιδανικά με πρότερη στατιστική ανάλυση της κίνησης των χρηστών εντός του Ε.Μ.Π.). Όπως προβλέπεται, η δράση αυτή παρέχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με την υπάρχουσα εγκατάσταση και την απλή αντικατάσταση των φωτιστικών με LED, χωρίς να αυξάνει τόσο δραματικά το κόστος κεφαλαίου όσο η 3^η δράση. Πέραν της ενεργειακής σκοπιάς και της οικονομικής σκοπιάς υπάρχει άλλος ένας λόγος εφαρμογής της 2^{ης} δράσης, έναντι της 1^{ης}. Αυτός είναι η πληθώρα δυνατοτήτων που επιτρέπει η εγκατάσταση ενός δικτύου IoT βασισμένου στο Zigbee σε έναν κόμβο επιστημονικών καινοτομιών όπως είναι το Ε.Μ.Π. Όπως έχει αναφερθεί, η εγκατάσταση ενός δικτύου IoT απομακρυσμένης διαχείρισης φωτισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η βάση για τη δημιουργία IoT δικτύων άλλων εφαρμογών. Ενδεικτικά, μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες πίεσης σε κάδους για τον εντοπισμό των γεμάτων κάδων, αισθητήρες απεικόνισης για τη δημιουργία εφαρμογών έξυπνης στάθμευσης, αλλά και εξελιγμένα συστήματα ασφαλείας μέσω IoT, τα οποία θα κάνουν περιττή την ανάγκη ύπαρξης μεγάλου αριθμού προσωπικού ασφαλείας. Οι δυνατότητες είναι αμέτρητες, ειδικά λαμβάνοντας υπόψιν ότι δεν απαιτείται να γίνουν μόνο μέσω της χρηματοδότησής τους από το Ε.Μ.Π., αλλά και μέσω ερευνητικών έργων και διπλωματικών εργασιών φοιτητών. Οι προοπτικές της ύπαρξης υποδομών δικτύου IoT συνδυαζόμενες με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προκρίνουν τη 2^η δράση ως προτεινόμενη για την αναβάθμιση του συστήματος εξωτερικού φωτισμού του Ε.Μ.Π., ενώ εφόσον υπάρξει μείωση στο κόστος αισθητήρων κίνησης, επιτρέπει με μικρής κλίμακας παρέμβασης να εφαρμοσθεί το μοντέλο του 3^{ου} σεναρίου και να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

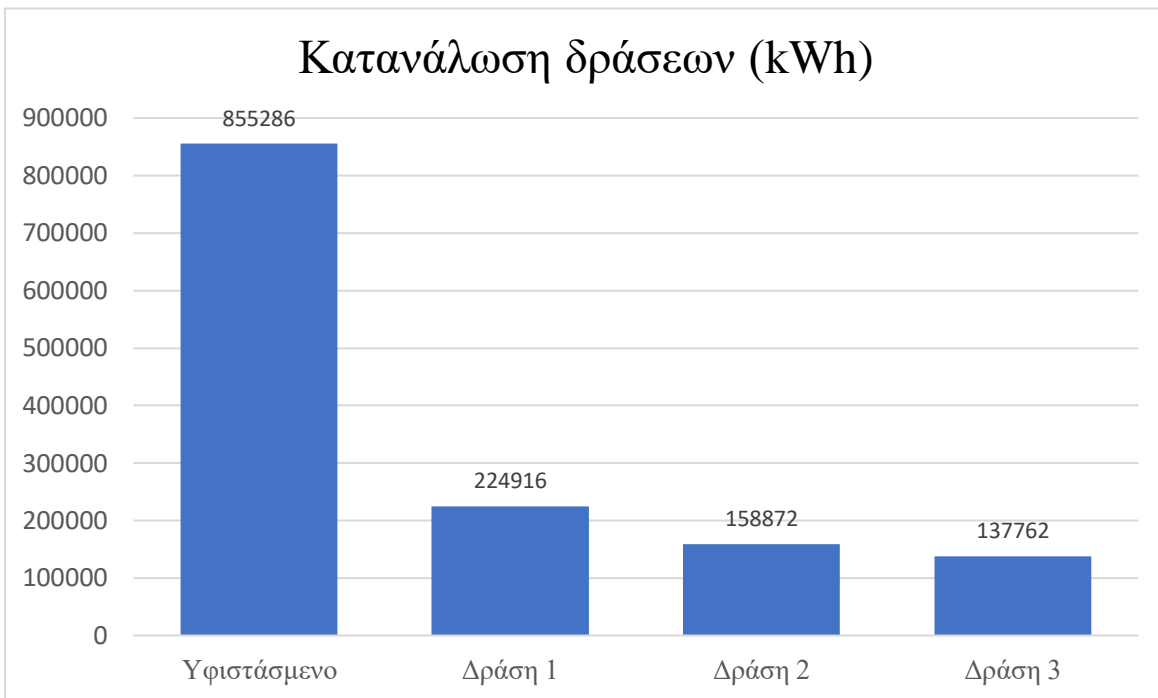
Για λόγους ευκρίνειας παρατίθενται συγκεντρωτικά τα κεφάλαια επένδυσης ξανά, μαζί με το ετήσιο κόστος λειτουργίας που επιφέρουν οι δράσεις και την καταναλισκόμενη ενέργεια. Επισημαίνεται ξανά ότι οι δράσεις που μελετήθηκαν θεωρούν την προηγούμενη ως απαραίτητη, και για αυτό υπολογίστηκε το συνολικό κόστος κάθε δράσης, αντί για το επιπλέον κόστος που κάθε μια απαιτεί σε σχέση με την προηγούμενη. Δηλαδή η πρώτη δράση αποτελεί τη βάση όλης της μελέτης, καθώς με αντικατάσταση των φωτιστικών με φωτιστικά LED δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σύστημα προσαρμοστικού προγραμματισμού. Ομοίως, το πρόγραμμα δυναμικού προσαρμοστικού φωτισμού δεν μπορεί να υπάρξει δίχως τη δυνατότητα εφαρμογής στατικού προγράμματος προσαρμοστικού φωτισμού, καθώς η μόνη διαφορά του είναι η εγκατάσταση ελεγκτών για τους προβολείς και αισθητήρων.

Πίνακας 86 – Εξοικονόμηση στις δράσεις 1-3 με την εφαρμογή της δράσης 4 (ρύθμιση φωτεινής ροής προβολέων κατά την εγκατάστασή τους)

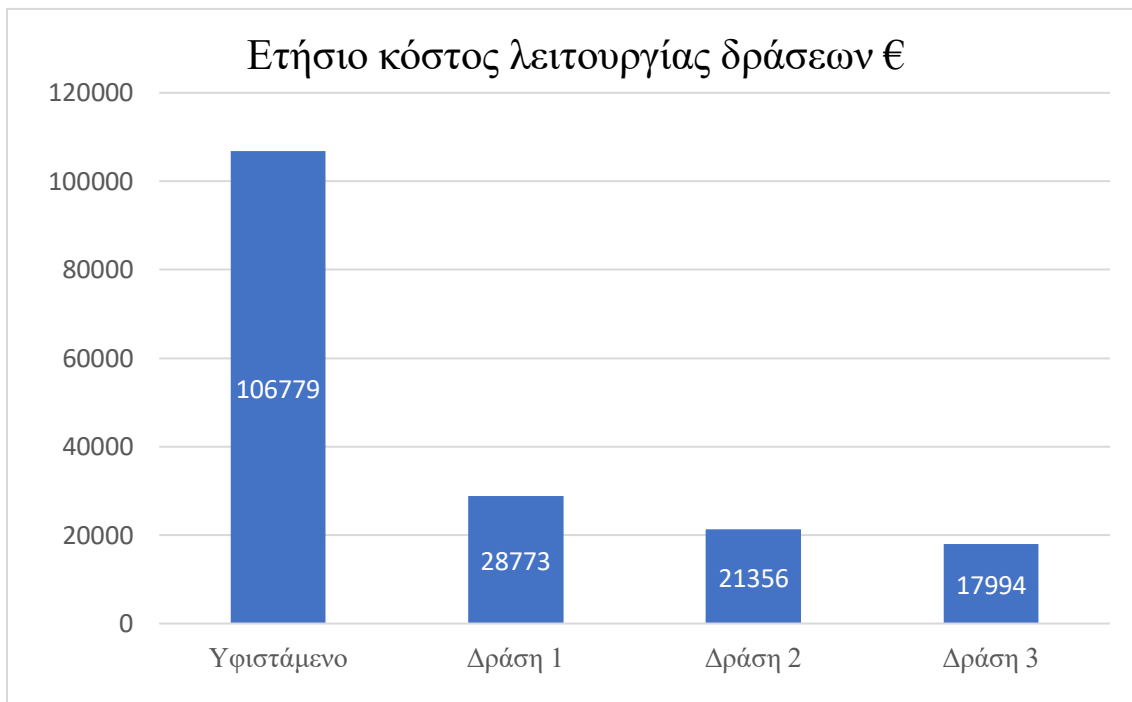
Δράση		Αρχική συνολική κατανάλωση ενέργειας	Τελική συνολική κατανάλωση ενέργειας	Εξοικονόμηση Ενέργειας	Αρχικό κόστος λειτουργίας	Τελικό κόστος λειτουργίας	Εξοικονόμηση κόστους λειτουργίας
1	Αντικατάσταση φωτιστικών	275.270 kWh	224.916 kWh	18,29%	31.682€	28.773€	9,18%
2	Στατικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού	197.813 kWh	158.872 kWh	19,67%	23.972€	21.356€	10,91%
3	Δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού	152.464 kWh	137.762 kWh	9,64%	19.896€	17.994€	9,56%

Πίνακας 87 – Κεφάλαιο επένδυσης για κάθε μια από τις δράσεις

Δράση		Πλήθος			Κόστος		
Προϊόν	Κόστος	1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Φωτιστικό δρόμου LED 78W	440€	304			133.760€		
Φωτιστικό δρόμου LED 15,4W	330€	475			156.750€		
Φωτιστικό κορυφής LED 20,5 W	550€	308			169.400€		
Προβολέας LED 111W	600€	287			172.200€		
LuCo	150€	-	1.052	1.374	-	157.800€	206.100€
SeCo	1.600€	-	8	10	-	12.800€	16.000€
Bobby/w	100€	-	-	294	-	-	29.400€
Λογισμικό Κεντρικής Διαχείρισης	2.000€	-	1	1	-	2.000€	2.000€
Σύνολο					632.110€	804.710€	885.610€



Εικόνα 65 – Κατανάλωση των δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας με εφαρμογή της δράσης 4



Εικόνα 66 – Ετήσιο συνολικό κόστος των δράσεων (με εφαρμογή της Δράσης 4)

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1 – Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών λαμπτήρων	16
Πίνακας 2 – Κατηγοριοποίηση των ζωνών συχνοτήτων	25
Πίνακας 3 – Σύγκριση αδειοδοτημένου και μη αδειοδοτημένου φάσματος.....	27
Πίνακας 4 – Υπάρχοντα φωτιστικά στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου	52
Πίνακας 5 – Κωδικοποίηση τύπων φωτιστικών	53
Πίνακας 6 – Εγκατεστημένη ισχύς υπαρχόντων φωτιστικών	53
Πίνακας 7 – Κατανάλωση ενέργειας υπαρχόντων φωτιστικών	53
Πίνακας 8 – Τιμολογιακές τιμές χρέωσης ενέργειας.....	53
Πίνακας 9 – Τιμολογιακές τιμές χρέωσης Ισχύος.....	53
Πίνακας 10 – Τιμολογιακές τιμές ρυθμιζόμενων χρεώσεων	54
Πίνακας 11 – Αντιστοιχία ωρών λειτουργίας σε ζώνες λειτουργίας.....	54
Πίνακας 12 – Χρέωση ενέργειας ανά ζώνη λειτουργίας	54
Πίνακας 13 – Χρέωση Ισχύος.....	54
Πίνακας 14 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας	55
Πίνακας 15 – Κόστος αγοράς νέων λαμπτήρων	56
Πίνακας 16 – Κόστος εργατοωρών	56
Πίνακας 17 – Χαρακτηριστικά οδών και πεζόδρομων.....	57
Πίνακας 18 – Χαρακτηριστικά οδών Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.....	58
Πίνακας 19 – Προεξοχές και κλίσεις φωτιστικών δρόμων.....	60
Πίνακας 20 - Χαρακτηριστικά πεζόδρομων Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου	61
Πίνακας 21 – Προεξοχές και κλίσεις φωτιστικών πεζόδρομων.....	65
Πίνακας 22 – Χαρακτηριστικά εναλλακτικών φωτιστικών.....	66
Πίνακας 23 – Τιμές συντελεστών αξιολόγησης δρόμων	69
Πίνακας 24 – Τιμές συντελεστών αξιολόγησης πεζόδρομων	69
Πίνακας 25 – Εγκατεστημένη ισχύς νέων φωτιστικών	71
Πίνακας 26 – Κατανάλωση ενέργειας νέων φωτιστικών	71
Πίνακας 27 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας	72
Πίνακας 28 – Μη μεταβλητά χαρακτηριστικά δρόμων και πεζόδρομων Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου	75
Πίνακας 29 – Κλάσεις φωτισμού συναρτήσει του κυκλοφοριακού φόρτου	75
Πίνακας 30 – Ωράρια εφαρμογής ζωνών κυκλοφορίας	75
Πίνακας 31 – Ημέρες εντασόμενες στο πρόγραμμα των Σαββατοκύριακων	76
Πίνακας 32 – Ωρολόγια προγράμματα στατικού προσαρμοστικού φωτισμού	77
Πίνακας 33 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος δρόμων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσει της ζώνης κυκλοφορίας	78
Πίνακας 34 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος πεζόδρομων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσει της ζώνης κυκλοφορίας	78
Πίνακας 35 – Αντιστοιχία ωρών λειτουργίας σε ζώνες κυκλοφορίας.....	78
Πίνακας 36 – Κατανάλωση ενέργειας στατικού προγράμματος φωτισμού.....	79
Πίνακας 37 – Αργίες του 2020.....	79
Πίνακας 38 – Ωρες λειτουργίας ανά ζώνη κυκλοφορίας και ζώνη χρέωσης.....	80
Πίνακας 39 – Κατανάλωση ενέργειας με στατικό πρόγραμμα φωτισμού ανά ζώνη χρέωσης	80
Πίνακας 40 – Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας ελεγκτών στατικού προσαρμοστικού φωτισμού	80
Πίνακας 41 – Κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας ελεγκτών στατικού προσαρμοστικού φωτισμού.....	80
Πίνακας 42 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας στατικού προγράμματος φωτισμού	81
Πίνακας 43 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 15 ετών.....	81
Πίνακας 44 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 20 ετών.....	82

Πίνακας 45 – Ωρολόγια προγράμματα δυναμικού προσαρμοστικού φωτισμού.....	88
Πίνακας 46 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος πεζόδρομων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσε της ζώνης κυκλοφορίας	89
Πίνακας 47 – Ποσοστό κατανάλωσης ισχύος δρόμων σε σχέση με την ονομαστική συναρτήσε της ζώνης κυκλοφορίας	89
Πίνακας 48 – Αντιστοιχία ωρών λειτουργίας σε ζώνες κυκλοφορίας.....	89
Πίνακας 49 – Ωρες λειτουργίας ανά ζώνη κυκλοφορίας και ζώνη χρέωσης.....	89
Πίνακας 50 – Κατανάλωση ενέργειας με δυναμικό πρόγραμμα φωτισμού ανά ζώνη χρέωσης.....	90
Πίνακας 51 – Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας προβολέων	90
Πίνακας 52 – Κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας ελεγκτών προβολέων	90
Πίνακας 53 – Κόστος κατανάλωσης δυναμικού προγράμματος φωτισμού.....	91
Πίνακας 54 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 15 ετών.....	91
Πίνακας 55 – Υπολογισμός κόστους αγοράς ελεγκτών φωτιστικών και τομέων προς αντικατάσταση για διάρκεια ζωής 20 ετών.....	92
Πίνακας 56 – Ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς για τους εγκαθιστάμενους προβολείς	94
Πίνακας 57 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων	94
Πίνακας 58 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους	94
Πίνακας 59 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με CLO – στατικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού	95
Πίνακας 60 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους με CLO – στατικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού.....	95
Πίνακας 61 – Κατανάλωση ενέργειας από τους προβολείς με το δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού χωρίς τη ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους.....	96
Πίνακας 62 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού χωρίς τη ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους	96
Πίνακας 63 – Κατανάλωση ενέργειας από τους προβολείς ανά ζώνη χρέωσης.....	96
Πίνακας 64 – Ετήσιο κόστος λειτουργίας προβολέων με δυναμικό πρόγραμμα προσαρμοστικού φωτισμού με ρύθμιση της φωτεινής ροής τους κατά την εγκατάστασή τους.....	97
Πίνακας 65 – Εξοικονόμηση στις δράσεις 1-3 με την εφαρμογή της δράσης 4 (ρύθμιση φωτεινής ροής προβολέων κατά την εγκατάστασή τους)	97
Πίνακας 66 – Κεφάλαιο επένδυσης για κάθε μια από τις δράσεις.....	100
Πίνακας 67 – Εξοικονόμηση πόρων από κάθε δράση.....	101
Πίνακας 68 – Απόδοση Επένδυσης για τις τρεις επενδυτικές δράσεις.....	101
Πίνακας 69 – Απόδοση Επένδυσης για τις τρεις επενδυτικές δράσεις.....	102
Πίνακας 70 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 3\%$ και $n = 15$ έτη	103
Πίνακας 71 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 5\%$ και $n = 15$ έτη	104
Πίνακας 72 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 3\%$ και $n = 20$ έτη	106
Πίνακας 73 – ΚΠΑ για τις τρεις επενδυτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 5\%$ και $n = 20$ έτη	106
Πίνακας 74 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 3\%$ και $n = 15$ έτη.....	109
Πίνακας 75 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 5\%$ και $n = 15$ έτη.....	110
Πίνακας 76 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 3\%$ και $n = 15$ έτη.....	110
Πίνακας 77 – ΔΑ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής $k = 5\%$ και $n = 15$ έτη.....	110
Πίνακας 78 – ΣΚΕΕ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής 3% και 5% και $n = 15$ έτη	112
Πίνακας 79 – ΣΚΕΕ για τις τρεις εναλλακτικές δράσεις με επιτόκιο αναγωγής 3% και 5%	114
Πίνακας 80 – Τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για $n = 15$ έτη	115
Πίνακας 81 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για $k=3\%$ για $n = 15$ έτη... ..	115
Πίνακας 82 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για $k=5\%$ για $n = 15$ έτη... ..	116
Πίνακας 83 – Τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για $n = 15$ έτη	116

Πίνακας 84 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για $k=3\%$ για $n = 20$ έτη...	116
Πίνακας 85 – Κανονικοποιημένες τιμές των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης για $k=5\%$ για $n = 20$ έτη...	116
Πίνακας 65 – Εξοικονόμηση στις δράσεις 1-3 με την εφαρμογή της δράσης 4 (ρύθμιση φωτεινής ροής προβολέων κατά την εγκατάστασή τους)	120
Πίνακας 66 – Κεφάλαιο επένδυσης για κάθε μια από τις δράσεις.....	120

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 – Αναπαράσταση συστήματος ελέγχου φωτισμού με φωτοαντίσταση CdS	19
Εικόνα 2 – Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	23
Εικόνα 3 – Το λογότυπο του Wi-Fi	28
Εικόνα 4 – Το λογότυπο του Bluetooth	29
Εικόνα 5 – Το λογότυπο του Z-Wave	30
Εικόνα 6 – Το λογότυπο του Zigbee	31
Εικόνα 7 – Το λογότυπο του LoWPAN	32
Εικόνα 8 – Το λογότυπο του Thread	33
Εικόνα 9 – Το λογότυπο του RFID	34
Εικόνα 10 – Το λογότυπο του GSM	35
Εικόνα 11 – Το λογότυπο του LoRaWAN	39
Εικόνα 12 – Το λογότυπο της Sigfox	40
Εικόνα 13 – Το λογότυπο του Weightless	41
Εικόνα 14 – Το λογότυπο του Ingenu	42
Εικόνα 15 – Το λογότυπο της Zhaga	43
Εικόνα 16 – Το λογότυπο του NEMA	43
Εικόνα 17 – Το λογότυπο της DiiA	44
Εικόνα 18 – Το λογότυπο του D4i	44
Εικόνα 19 – Το λογότυπο της Zhaga-D4i	45
Εικόνα 20 – Παροχή ισχύος σε controller NEMA ANSI C136.41	45
Εικόνα 21 – Παροχή ισχύος σε controller Zhaga-D4i	45
Εικόνα 22 – Φωτιστικά με λαμπτήρες ατμών υψηλής πίεσης στο Ε.Μ.Π.	50
Εικόνα 23– Φωτιστικά με λαμπτήρες ατμών χαμηλής πίεσης στο Ε.Μ.Π.	51
Εικόνα 24 – Φωτιστικά με συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού στο Ε.Μ.Π.	51
Εικόνα 25 – Φωτιστικά με λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων στο Ε.Μ.Π.	52
Εικόνα 26 – Φωτιστικό TECEO S 5140 της εταιρείας Schreder	58
Εικόνα 27– Πολικό διάγραμμα φωτιστικού TECEO S 5140	59
Εικόνα 28 – Προσομοίωση δρόμου A/A 1	59
Εικόνα 29 – Προσομοίωση δρόμου A/A 2	60
Εικόνα 30 – Αποτελέσματα A/A 1	60
Εικόνα 31 – Αποτελέσματα A/A 2	60
Εικόνα 32 – Φωτιστικό TECEO S 5249 της εταιρείας Schreder	62
Εικόνα 33 – Πολικό διάγραμμα φωτιστικού TECEO S 5249	62
Εικόνα 34 – Φωτιστικό PIZEO 5121 της εταιρείας Schreder	63
Εικόνα 35 – Πολικό διάγραμμα φωτιστικού PIZEO 5121	63
Εικόνα 36 – Προσομοίωση πεζόδρομου A/A 3	64
Εικόνα 37 – Προσομοίωση πεζόδρομων A/A 4	64
Εικόνα 38 – Προσομοίωση πεζόδρομων A/A 5	64
Εικόνα 39 – Αποτελέσματα A/A 3	65
Εικόνα 40– Αποτελέσματα A/A 4	65
Εικόνα 41 – Αποτελέσματα A/A 5	65
Εικόνα 42 – Σύγκριση διάρκειας ζωής LED chips και λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων	70
Εικόνα 43 – Φωτιστικό OMNIstar 72-XP της εταιρείας Schreder	71
Εικόνα 44 – Αισθητήρες κίνησης στο Ε.Μ.Π.	85
Εικόνα 45 – Αισθητήρας Bobby/w της εταιρείας Lince	86
Εικόνα 46 – Αρχή λειτουργίας αισθητήρα κίνησης Bobby/w	86
Εικόνα 47 – Κάτω PIR ρυθμισμένο στη θέση Α για απόσταση ανίχνευσης 3 m	87
Εικόνα 48 – Κάτω PIR ρυθμισμένο στη θέση Ε για απόσταση ανίχνευσης 12 m	87

Εικόνα 49 – Κατανάλωση των δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας	98
Εικόνα 50 – Ετήσιο συνολικό κόστος των δράσεων (με εφαρμογή της δράσης 4)	98
Εικόνα 51 – Γραφική αναπαράσταση της απόδοσης επενδύσεων των δράσεων για n = 15 έτη	102
Εικόνα 52 - Γραφική αναπαράσταση της απόδοσης επενδύσεων των δράσεων για n = 20 έτη	102
Εικόνα 53 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 15 έτη.....	105
Εικόνα 54 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 15 έτη.....	105
Εικόνα 55 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 20 έτη.....	108
Εικόνα 56 – Γραφική αναπαράσταση της ΚΠΑ των δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 20 έτη.....	108
Εικόνα 57 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 15 έτη.....	110
Εικόνα 58 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 15 έτη.....	110
Εικόνα 59 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 20 έτη.....	111
Εικόνα 60 – ΔΑ δράσεων για επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 20 έτη.....	111
Εικόνα 61 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 15 έτη	113
Εικόνα 62 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 15 έτη	113
Εικόνα 63 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 3% και n = 20 έτη	114
Εικόνα 64 – Γραφική αναπαράσταση του ΣΚΕΕ των δράσεων με επιτόκιο αναγωγής 5% και n = 20 έτη	114
Εικόνα 49 – Κατανάλωση των δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας με εφαρμογή της δράσης 4	121
Εικόνα 50 – Ετήσιο συνολικό κόστος των δράσεων (με εφαρμογή της Δράσης 4).....	121

Βιβλιογραφία

Παραπομπές

- [1] G. Cacciatore, C. Fiandrino, D. Kliazovich, F. Granelli, and P. Bouvry, (2017), “Cost analysis of smart lighting solutions for smart cities,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, doi: 10.1109/ICC.2017.7996886.
- [2] Wojnicki, I., Ernst, S. and Kotulski, L. (2016), “Economic impact of intelligent dynamic control in urban outdoor lighting”, *Energies*, 9(5), pp. 1–14. doi: 10.3390/en9050314
- [3] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2019), “Εθνικό σχέδιο για την ενέργεια και το κλίμα”
- [4] Action Services Group, (2020), “*High-Pressure Sodium Lights vs. LED*”, Πηγή: <https://www.actionservicesgroup.com/blog/high-pressure-sodium-lights-vs-led/>
- [5] Liu, L., Keoleian, G. A. and Saitou, K. (2017), “Replacement policy of residential lighting optimized for cost, energy, and greenhouse gas emissions”, *Environmental Research Letters*, 12(11). doi: 10.1088/1748-9326/aa9447
- [6] StouchLighting, (2016), “*Lighting Comparison: LED vs High Pressure Sodium/Low Pressure Sodium*”, Πηγή: <https://www.stouchlighting.com/blog/led-vs-hps-lps-high-and-low-pressure-sodium>
- [7] Yoomak, S. *et al.* (2018), “Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system”, *Energy and Buildings*, 159, pp. 542–557. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.060. Commission, E. (2013) *Lighting the Cities. Accelerating the Deployment of Innovative Lighting in European Cities*
- [8] Δ. Τ. Νικολάου (2016) “Συστήματα τηλεδιαχείρισης οδικού φωτισμού. Τα πρώτα Smart Grids. Παραδείγματα Εφαρμογών”, ILS
- [9] K. L. Lueth (2014), “*Why is the Internet of Things called Internet of Things: Definition, history, disambiguation*”, IoT Analytics, Πηγή: <https://iot-analytics.com/internet-of-things-definition/>
- [10] i-SCOOP, (2017), “*Internet of Things (IoT) in healthcare: benefits, use cases and evolutions*”, Πηγή: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/internet-things-healthcare/#7--the-internet-of-things-in-healthcare-use-cases-and-major-evolutions->
- [11] A. Chalimov, (2020), “IoT in agriculture: 8 technology use case for smart farming (and challenges to consider)”, Πηγή: <https://easternpeak.com/blog/iot-in-agriculture-technology-use-cases-for-smart-farming-and-challenges-to-consider/>
- [12] A. Khanna and R. Anand, “IoT based smart parking system”, (2016), *2016 Int. Conf. Internet Things Appl. IOTA 2016*, no. January 2016, pp. 266–270, 2016, doi: 10.1109/IOTA.2016.7562735
- [13] Leasing Options, (2018), “*The Race to Driverless Technology*”, Πηγή: <https://www.leasingoptions.co.uk/driverless-cars/index.html#investments>
- [14] K. Gyarmathy, (2020), “*Comprehensive Guide to IoT Statistics You Need to Know in 2020*”, VXCNGE, Πηγή: <https://www.vxchnge.com/blog/iot-statistics>
- [15] P. Newman, (2020), “*THE INTERNET OF THINGS 2020: Here's what over 400 IoT decision-makers say about the future of enterprise connectivity and how IoT companies can use it to grow revenue*”, Business Insider, Πηγή: <https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report?IR=T>
- [16] N. Duggal, (2021), “*Top 9 New Technology Trends for 2021*”, Simplilearn, Πηγή: <https://www.simplilearn.com/top-technology-trends-and-jobs-article>
- [17] Δ. Τ. Νικολάου, (2016), “Αστικός Φωτισμός”, ILS
- [18] howstuffworks, (2020), “*How do the streetlights turn on automatically at night?*”, Πηγή: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/question363.html>
- [19] Silver Spring (2013) ‘The Business Case for Smart Street Lights’, p. 6.
- [20] Wojnicki, I., Ernst, S. and Kotulski, L., (2016), “Economic impact of intelligent dynamic control in urban outdoor lighting”, *Energies*, 9(5), pp. 1–14. doi: 10.3390/en9050314.
- [21] Embedded Computing Design, (2014), “*Integrating wired and wireless outdoor lighting control in smart cities*”, Πηγή: <https://www.embeddedcomputing.com/application/misc/integrating-wired-and-wireless-outdoor-lighting-control-in-smart-cities>

- [22] Wikipedia, “0-10 V lighting control”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/0-10_V_lighting_control
- [23] CMD, “0–10V, DALI and other lighting control system protocols”, Πηγή: <https://www.cmd-ltd.com/advice-centre/lighting-control-systems/0-10v-dali-and-other-lighting-control-system-protocols-compared/>
- [24] Tridonic, (2020), “DALI Manual”
- [25] Wikipedia, “Power-line communication”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/0-10_V_lighting_control
- [26] Eetimes, (2011) “What is Power Line Communication?”, Πηγή: <https://www.eetimes.com/what-is-power-line-communication/?v=f214a7d42e0d>
- [27] B. White, (2018), “Power Line Communications vs. Radio Frequency Communications”, CIMCON Lighting, Πηγή: <https://www.cimconlighting.com/en/cimcon-blog/power-line-communications-vs.-radio-frequency-communications>
- [28] A. Mannan, D. K. Saxena, and M. Banday, “A Study on Power Line Communication,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 4, no. 7, pp. 7–10, 2014.
- [29] Wikipedia, “Radio Spectrum”, Πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum
- [30] D. Lowe, (2016), “Radio Electronics: Transmitters and Receivers”, dummies, Πηγή: <https://www.dummies.com/programming/electronics/components/radio-electronics-transmitters-and-receivers/>
- [31] D. Pfeiffer, (2018), “How Wireless Communication Works”, Science Journal, Πηγή: <https://medium.com/science-journal/how-wireless-communication-works-a839fc5d41f7#:~:text=Today%20electromagnetic%20waves%20can%20carry%20virtually%20any%20type%20of%20data.&text=We%20can%20then%20send%20this,and%20the%20original%20information%20obtained.>
- [32] A. Campbell, (2018), “What are the spectrum band designators and bandwidths?”, NASA, Πηγή: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_band_designators.html
- [33] Wikipedia, “Ionizing Radiation”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation
- [34] Wikipedia, “ISM band”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band#History
- [35] TNUDA, (2014), “Table of Use of Frequencies”, Πηγή: <https://www.tnuda.org.il/en/table-use-frequencies>
- [36] P. McNeil, (2018), “What are the ISM Bands, and What Are They Used For?”, Πηγή: <https://blog.pasternack.com/uncategorized/what-are-the-ism-bands-and-what-are-they-used-for/>
- [37] P. Kar, (2018), “Licensed vs Unlicensed Spectrum”, LinkedIn, Πηγή: <https://www.linkedin.com/pulse/licensed-vs-unlicensed-spectrum-parag-kar>
- [38] A. Paril, (2012), “Licensed and Unlicensed Frequency Band Wireless Communication & Security”, Πηγή: <https://www.authorstream.com/Presentation/Akshaypati-1406509-licensed-and-unlicensed-wirelesscommunication/>
- [39] Motorola, (2017), “Licensed Versus Unlicensed Wireless”
- [40] A. Justice, (2010), “900 Mhz: The Wireless Workhorse”, gridconnect, Πηγή: <https://blog.gridconnect.com/blog/general/900-mhz-the-wireless-workhorse>
- [41] disk91, (2017), “All what you need to know about regulation on RF 868MHz for LPWAN”, Πηγή: <https://www.disk91.com/2017/technology/sigfox/all-what-you-need-to-know-about-regulation-on-rf-868mhz-for-lpwan/>
- [42] J. Herman, (2010), “Why Everything Wireless <https://www.wired.com/2010/09/wireless-explainer/is-2.4-GHz>”, WIRED, Πηγή:
- [43] L-com, (no date), “What are the Advantages and Disadvantages of ISM Band Frequencies?”, Πηγή: <https://www.l-com.com/frequently-asked-questions/advantages-and-disadvantages-of-ism-band-frequencies>
- [44] Wikipedia, “Wi-Fi”, Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
- [45] J.Turley, (2020), “Wi-Fi HaLow close to making it’s debut”, Electronic Engineering Journal, Πηγή: <https://www.eejournal.com/article/wi-fi-halow-close-to-making-its-debut/>
- [46] Wikipedia, “Bluetooth Low Energy”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Low_Energy
- [47] B. Ray, (2015), “Bluetooth Vs. Bluetooth Low Energy: What’s The Difference?”, Link Labs, Πηγή: <https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy>
- [48] Wikipedia, “Z-Wave”, Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Z-Wave>
- [49] S. Al-sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, (2017), “Internet of Thing (IoT) Communication Protocols: Review”, pp. 685–690.
- [50] Wikipedia, “IEEE 802.15.4”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4
- [51] Wikipedia, “Zigbee”, Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>

- [52] Digi International, “Demystifying 802.15.4 and ZigBee,” *Zoonoses Public Health*, vol. 54, no. 1, p. 66, 2007, [Online]. Available: http://www.mouser.com/pdfdocs/digi-wp_zigbee.pdf.
- [53] J. Lin, X. Jin, and Q. Mao, “Wireless monitoring system of street lamps based on ZigBee,” *Proc. - 5th Int. Conf. Wirel. Commun. Netw. Mob. Comput. WiCOM 2009*, pp. 2–4, 2009, doi: 10.1109/WICOM.2009.5303291.
- [54] A. K. Sikder, A. Acar, H. Aksu, A. S. Uluagac, K. Akkaya, and M. Conti, (2018), “IoT-enabled smart lighting systems for smart cities,” *2018 IEEE 8th Annu. Comput. Commun. Work. Conf. CCWC 2018*, vol. 2018-January, pp. 639–645, 2018, doi: 10.1109/CCWC.2018.8301744.
- [55] I. Thread Group, “Thread 1.2 Base Features,” no. June, pp. 1–16, 2019.
- [56] C. Tardi, (2020), “*Near-Field Communication (NFC)*”, Investopedia, Πηγή: <https://www.investopedia.com/terms/n/near-field-communication-nfc.asp>
- [57] Wikipedia, “*Radio-frequency identification*”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification
- [58] A. Hayes, (2020), “*Radio Frequency Identification (RFID)*”, Investopedia, Πηγή: <https://www.investopedia.com/terms/r/radio-frequency-identification-rfid.asp>
- [59] S. Tabbane, (2019), “IoT systems overview – CoE on Traffic engineering and advanced wireless network planning,” ITU
- [60] C. McClelland, (2016), “*What is LPWAN? - A Helpful Analogy for the Non-Technical*”, IoTforall, Πηγή: <https://www.iotforall.com/what-is-lpwan>
- [61] GSMA, (2017), “*Extended Coverage – GSM – Internet of Things (EC-GSM-IoT)*”, Πηγή: <https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-technology-ec-gsm-iot/>
- [62] everythingRF, (2017), “*What is EC-GSM-IoT?*”, Πηγή: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-ec-gsm-iot>
- [63] Y. D. Beyene, R. Jantii, O. Tirkkonen, K. Ruttik, S. Iraj, A. Larmo, T. Tirronen and J. Torsner, (2017), “NB-IoT Technology overview and experience from Cloud-Ran implementation”, IEEE
- [64] M. Lauridsen, H. Nguyen, B. Vejlgaard, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen, “Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km Area,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2017-June, pp. 2–6, 2017, doi: 10.1109/VTCSpring.2017.8108182.
- [65] i-SCOOP, (2019), “*NB-IoT explained: a complete guide to Narrowband-IoT*”, Πηγή: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/lpwan/nb-iot-narrowband-iot/>
- [66] Y. Hwang, (2020), “*Cellular IoT Explained - NB-IoT vs. LTE-M vs. 5G and More*”, IoTforall, Πηγή: <https://www.iotforall.com/cellular-iot-explained-nb-iot-vs-lte-m>
- [67] C. McClelland, (2016), “*Comparison of LPWAN Technologies - Which is Best for Me?*”, IoTforall, Πηγή: <https://www.iotforall.com/comparison-of-lpwan-technologies>
- [68] M. Lauridsen, B. Vejlgaard, I. Z. Kovacs, H. Nguyen, and P. Mogensen, “Interference measurements in the European 868 MHz ISM band with focus on LoRa and SigFox,” *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC*, 2017, doi: 10.1109/WCNC.2017.7925650.
- [69] Wikipedia, “*Weightless (wireless communications)*”, Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Weightless_\(wireless_communications\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Weightless_(wireless_communications))
- [70] Ubiik, “*LPWAN Comparison*”, Πηγή: <https://www.ubiik.com/lpwan-comparisons>
- [71] Wikipedia, “*Ingenu*”, Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ingenu>
- [72] Ingenu, Πηγή: <https://www.ingenu.com/>
- [73] U.S. D. of Energy, (2014), “Control system interoperability : can we talk ?”
- [74] J. Brodrick, (2017), “*Interoperability Is Key To Connected Lighting Systems*”, Fierce Electronics, Πηγή: <https://www.fierceelectronics.com/components/interoperability-key-to-connected-lighting-systems>
- [75] Wikipedia, “*Zhaga Consortium*”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/Zhaga_Consortium
- [76] A. Baschnagel, (2020), “*Zhaga enables IoT-upgradeable outdoor LED lighting fixtures*”, Business Insider, Πηγή: <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/zhaga-enables-iot-upgradeable-outdoor-led-lighting-fixtures-1014991520>
- [77] Zhaga, Book 18: Smart interface between outdoor luminaires and sensing / communication modules, Πηγή: <https://www.zhagastandard.org/books/overview/smart-interface-between-outdoor-luminaires-and-sensing-communication-modules-18.html>
- [78] C. DiLouie, (2013), “*LEDs' New Standard: Zhaga Consortium*”, Electrical Contractor, Πηγή: <https://www.ecmag.com/section/lighting/leds-new-standard-zhaga-consortium>

- [79] Wikipedia, “*National Electrical Manufacturers Association*”, Πηγή: https://en.wikipedia.org/wiki/National_Electrical_Manufacturers_Association
- [80] R. Kauffman and K. Consulting, (2012), “ANSI C136 Standards Update Presented by American National Standards for Street and Area Lighting Equipment.”
- [81] E. Yilmaz and A. Portali, (2018), “*What is NEMA socket?*”, Πηγή: <http://lightingequipmentsales.com/what-is-nema-socket.html>
- [82] DiiA, Πηγή: <https://www.dali-alliance.org/>
- [83] DiiA, “*D4i – the DALI standard for intelligent, IoT-ready luminaires*”, Πηγή: <https://www.dali-alliance.org/d4i/>
- [84] DiiA, (2019), “*Zhaga-D4i certification moves several steps closer*”, Πηγή: <https://www.dali-alliance.org/news/194/zhaga-d4i-certification-moves-several-steps-closer>
- [85] LED professional, (2019), “*Zhaga-D4i Certification Signals Plug-and-Play Interoperability*”, Πηγή: <https://www.led-professional.com/resources-1/standardization/zhaga-d4i-certification-signals-plug-and-play-interoperability>
- [86] Fagerhult, (2020), “*Zhaga/Nema*”, Πηγή: <https://www.fagerhult.com/knowledge-hub/LED/zhaganema/>
- [87] Schreder, (2020), “*Zhaga-D4i White paper*”
- [88] R. Sharma, (2015), “*Top 15 Sensor Types Being Used Most By IoT Application Development Companies*”, Finoit, Πηγή: <https://www.finoit.com/blog/top-15-sensor-types-used-iot/>
- [89] BehrTech, (2019), “*Top 10 IoT Sensor Types*”, Πηγή: <https://behrtech.com/blog/top-10-iot-sensor-types/#:~:text=The%20IoT%20and%20its%20counterpart,%2C%20temperature%2C%20motion%20and%20pressure.>
- [90] C. Peterson, (2020), “*LED vs Metal Halide Lighting: 9 Reasons LED Wins (Especially No. 3)*”, LED Lighting Supply, Πηγή: <https://www.ledlightingsupply.com/blog-led-vs-metal-halide-lighting>
- [91] “Rick R.”, (2016), “*How many lumens for a 400 Watt metal halide and what is the LED equivalent? 1000 Watt metal halide?*”, LEDLightExpert, Πηγή: https://www.ledlightexpert.com/How-many-Lumens-for-a-400-watt-Metal-Halide-and-what-is-the-LED-equivalent-1000-watt-Metal-Halide_b_10.html
- [92] Schreder, (2016), “*Owlet IoT – The next generation of city management*”
- [93] Κ. Α. Μπουρούσης, Δ. Τ. Νικολάου και Φ. Β. Τοπαλής, (2018), «*Μεθοδολογία διεξαγωγής μετρήσεων φωτοτεχνικών και ηλεκτροτεχνικών μεγεθών φωτιστικών σωμάτων LED για τη βελτιστοποίηση έργων οδοφωτισμού*», 7^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα
- [94] LEDs Magazine, (2013), “*Understand compatibility, performance, and dimming issues in LED lighting*”, Πηγή: <https://www.ledsmagazine.com/home/article/16700777/understand-compatibility-performance-and-dimming-issues-in-led-lighting-magazine>

Επιπρόσθετη Βιβλιογραφία

1. Φ.Β. Τοπαλής, Λ. Οικονόμου και Σ. Κουρτέση, *Φωτοτεχνία*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
2. Π. Κάπρος και Κ. Ντελκής, *Οικονομική Ανάλυση Επιχειρήσεων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2007
3. Κ. Δ. Κόνιαρης, *Μελέτη σκοπιμότητας για την εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων στο φωτισμό εξωτερικών χώρων του συγκροτήματος Ζωγράφου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*, 2015
4. Ε. Αθήνη, Α. Τσιγάρα και Σ. Μελέτη, *Σχεδιασμός και Έλεγχος Εγκαταστάσεων Οδοφωτισμού*, ΤΕΕ, 2018