



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Συστήματα Τηλεδιαχείρισης Προσαρμοστικού Φωτισμού
στον Οδοφωτισμό**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βαρβάρα Δ. Τσιουρή

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής, Σχολή ΗΜΜΥ, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Συστήματα Τηλεδιαχείρισης Προσαρμοστικού Φωτισμού στον Οδοφωτισμό

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βαρβάρα Δ. Τσιουρή

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Καθηγητής, Σχολή ΗΜΜΥ, Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την.....

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2015

.....
Βαρβάρα Δ. Τσιουρή

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

Copyright © Βαρβάρα Δ. Τσιουρή, 2015

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 του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στον ανιψιό μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Τοπαλή για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα υπό την επίβλεψή του, καθώς και για την εμπιστοσύνη, την άριστη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθειά του κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, τους γονείς και τα αδέρφια μου, τους φίλους και συμφοιτητές μου. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον Δημήτρη Νικολάου της I.L.S. | Innovative LED Lighting Systems, γιατί μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ και στην πράξη με το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά την μελέτη των συστημάτων απομακρυσμένης διαχείρισης εγκαταστάσεων οδικού φωτισμού. Συγκεκριμένα, περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων αυτών και οι τεχνικές εφαρμογής του προσαρμοστικού φωτισμού με βάση τα Ευρωπαϊκά και Διεθνή Πρότυπα.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια αναφορά σε βασικές έννοιες του φωτισμού, αλλά και σε θεμελιώδη μεγέθη του οδοφωτισμού γενικότερα.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται η εισαγωγή στον προσαρμοστικό φωτισμό. Περιγράφονται οι προοπτικές, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Επίσης, αναφέρονται τα Ευρωπαϊκά προγράμματα για την διάδοση της εφαρμογής του.

Το Κεφάλαιο 3 αφορά το φαινόμενο της φωτορύπανσης. Αναλύονται οι επιπτώσεις της οι οποίες είναι δυνατόν να περιοριστούν χάρη στον προσαρμοστικό φωτισμό.

Το Κεφάλαιο 4 αναφέρεται στην επίδραση του οδοφωτισμού στην ασφάλεια των χρηστών του δρόμου. Παρουσιάζονται έρευνες που υποδεικνύουν το θετικό αποτέλεσμα του οδοφωτισμού στον προσανατολισμό των χρηστών, στην μείωση των ατυχημάτων και στην πρόληψη της εγκληματικότητας.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το Ευρωπαϊκό Πρότυπο για τον οδοφωτισμό EN 13201 και η Τεχνική Έκθεση CIE 115-2010. Τα δύο αυτά έγγραφα περιλαμβάνουν οδηγίες για την εφαρμογή του προσαρμοστικού οδοφωτισμού.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων τηλεδιαχείρισης στον οδοφωτισμό. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική των συστημάτων, τα πρωτόκολλα και οι τεχνολογίες για την επικοινωνία των οντοτήτων ενός δικτύου προσαρμοστικού φωτισμού.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται αναφορά σε έργα προσαρμοστικού φωτισμού που έχουν πραγματοποιηθεί στην Ευρώπη και στην Ελλάδα.

Στο Κεφάλαιο 8 παρατίθεται η μελέτη περίπτωσης μιας πιλοτικής εγκατάστασης συστήματος τηλεδιαχείρισης οδοφωτισμού σε ένα τμήμα αυτοκινητόδρομου στην Ελλάδα.

Στο Κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα κυριότερα σημεία της παρούσας εργασίας και επισημαίνονται τα οφέλη και οι προοπτικές του προσαρμοστικού φωτισμού στις «έξυπνες πόλεις» του μέλλοντος.

Λέξεις Κλειδιά

Συστήματα τηλεδιαχείρισης προσαρμοστικού φωτισμού, φωτορύπανση, φωτισμός δρόμων, πρότυπο οδοφωτισμού, LED, πρωτόκολλο επικοινωνίας, μελέτη περίπτωσης

Abstract

The scope of this thesis is to study the remote management systems of street lighting installations. More specifically, the thesis describes the operation of these systems as well as the adaptive lighting operation techniques based on European and International Standards.

The first chapter explains some fundamental lighting and street lighting concepts.

The second chapter is an introduction to adaptive street lighting. The perspectives, the advantages and the disadvantages of this new method are described. Moreover, a reference is made to the European projects that have been realized in order to facilitate its implementation.

The third chapter refers to light pollution. It describes the consequences of the phenomenon that can be limited due to adaptive lighting.

The fourth chapter refers to the effect of street lighting to the safety of road users. Some studies that indicate the positive effect of street lighting in the orientation of road users, the reduction of accidents and the prevention of traffic safety are presented.

The fifth chapter presents the EN 13201 European Standard, as well as the Technical Report CIE 115-2010 regarding street lighting. These documents include guidelines for the implementation of adaptive street lighting.

The sixth chapter describes the operation of the street lighting telemanagement systems. The architecture, the communication protocols and technologies of the entities of an adaptive street lighting network are presented.

The seventh chapter mentions adaptive street lighting projects that have been installed in Europe and in Greece.

The eighth chapter presents the case study of a pilot street lighting remote management installation at a small part of a motorway in Greece.

The ninth chapter summarizes the main points of this thesis. Moreover, it outlines the benefits and the perspectives of adaptive street lighting in the “smart cities” of the future.

Key Words:

Adaptive lighting telemanagement systems, light pollution, street lighting, roadway lighting standard, LED, communication protocol, case study

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	7
Περίληψη.....	9
Abstract	11
Ευρετήριο Εικόνων.....	16
Ευρετήριο Πινάκων.....	18
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή σε Βασικές Έννοιες Φωτισμού.....	21
1.1 Βασικές έννοιες τεχνολογίας φωτισμού	21
1.2 Βασικές έννοιες οδοφωτισμού	23
Κεφάλαιο 2: Γενικά για τον Προσαρμοστικό Φωτισμό.....	27
Κεφάλαιο 3: Φωτορύπανση.....	33
3.1 Τα είδη της φωτορύπανσης	33
3.2 Επιπτώσεις της φωτορύπανσης.....	35
3.2.1 Επιπτώσεις στην αστρονομία.....	35
3.2.2 Περιβαλλοντικές και οικολογικές επιπτώσεις	35
3.2.3 Επιπτώσεις στον άνθρωπο	36
3.3 Φωτορύπανση και ενεργειακές απώλειες.....	37
3.4 Τρόποι αντιμετώπισης της φωτορύπανσης.....	38
Κεφάλαιο 4: Οδοφωτισμός και Ασφάλεια.....	43
4.1 Επίδραση του οδοφωτισμού στα αυτοκινητιστικά ατυχήματα.....	43
4.2 Οδοφωτισμός και εγκληματικότητα	46
Κεφάλαιο 5: Πρότυπα Οδοφωτισμού.....	51
5.1 Το ευρωπαϊκό πρότυπο για τον οδοφωτισμό.....	51
5.1.1 CEN/TR 13201-1/2004: Οδοφωτισμός, Μέρος 1 ^ο : Επιλογή κλάσεων φωτισμού .	51
5.1.2 EN 13201-2/2003: Οδοφωτισμός, Μέρος 2 ^ο : Απαιτήσεις επίδοσης	55
5.1.3 EN 13201-3/2004: Οδοφωτισμός, Μέρος 3 ^ο : Υπολογισμός επίδοσης.....	57
5.1.4 EN 13201-4/2004: Οδοφωτισμός, Μέρος 4 ^ο : Μέθοδοι μέτρησης επίδοσης φωτισμού εγκαταστάσεων.....	57
5.1.5 EN 13201-5/2007 (προσχέδιο): Οδοφωτισμός, Μέρος 5 ^ο : Απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης	57
5.2 Τεχνική Έκθεση CIE 115-2010 : Συστάσεις για το φωτισμό δρόμων για κυκλοφοριακή ροή οχημάτων και πεζών	58
5.2.1 Είδη και επιλογή κλάσεων φωτισμού	59
5.2.2 Παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον οδοφωτισμό	61

5.2.3 Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου του CIE 115-2010 για προσαρμοστικό φωτισμό.....	62
5.3 Το αναθεωρημένο CEN/TR 13201-1/2014	63
5.4 Συγκριτικό παράδειγμα εφαρμογής προσαρμοστικού φωτισμού πριν και μετά την αναθεώρηση του EN 13201-1	67
5.4.1 Εφαρμογή προσαρμοστικού φωτισμού βάσει του CEN/TR 13201-1/2004.....	67
5.4.2 Εφαρμογή προσαρμοστικού φωτισμού βάσει του CEN/TR 13201-1/2014.....	70
5.5 Εφαρμογή του προτύπου για τον οδοφωτισμό στην Ελλάδα και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες	71
Κεφάλαιο 6: Τεχνολογίες Προσαρμοστικού Φωτισμού στον Οδοφωτισμό με Φωτιστικά Τεχνολογίας LED	73
6.1 Εισαγωγή	73
6.2 Φωτιστικά με λαμπτήρες εκκενώσεως	73
6.3 Φωτιστικά τεχνολογίας LED	76
6.4 Μέθοδοι ρύθμισης της φωτεινότητας (dimming)	78
6.4.1 Κλιμακωτή μέθοδος dimming συμβατικών φωτιστικών με μαγνητικά ballast	79
6.4.2 Συνεχής μέθοδος dimming συμβατικών φωτιστικών με μαγνητικά ballast	80
6.4.3 Συνεχής μέθοδος dimming συμβατικών φωτιστικών με ηλεκτρονικά ballast	82
6.4.4 Τεχνικοί περιορισμοί όσον αφορά το dimming των λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής έντασης	84
6.4.5 Μέθοδος PWM για το dimming των LED	85
6.4.6 Αναλογική μέθοδος dimming φωτιστικών LED.....	88
6.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας για τον έλεγχο του φωτισμού	89
6.5.1 Πρωτόκολλο ελέγχου 0-10 Volt DC	89
6.5.2 Πρωτόκολλο ελέγχου DALI	90
6.5.3 Σύγκριση πρωτοκόλλων	93
6.6 Συστήματα τηλεδιαχείρισης προσαρμοστικού φωτισμού	93
6.6.1 Δικτυακές τοπολογίες.....	95
6.6.2 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και τεχνολογίες για το δίκτυο πρόσβασης.....	97
6.6.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και τεχνολογίες στο δίκτυο κορμού	99
6.6.4 Διαλειτουργικότητα.....	100
Κεφάλαιο 7: Εγκατάσταση και Εφαρμογή Συστημάτων Προσαρμοστικού φωτισμού	103
7.1 Εφαρμογή στην Ευρώπη	103
7.2 Εφαρμογές στην Ελλάδα	108

Κεφάλαιο 8: Τεχνοοικονομική Έκθεση Εγκατάστασης Πυλοτικού Συστήματος	
Τηλεδιαχείρισης Φωτισμού στον Α/Κ Ριτσώνας.....	111
8.1 Εισαγωγή	111
8.2 Πρότυπο οδοφωτισμού.....	111
8.3 Κατηγοριοποίηση κατά EN 13201 – 1:2014	112
8.4 Φωτοτεχνικές απαιτήσεις κλάσης φωτισμού M4.....	113
8.5 Υπολογισμός συντελεστή συντήρησης	114
8.6 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τμημάτων της εγκατάστασης.....	114
8.7 Λογισμικό προσομοιώσεων	115
8.8 Προσφερόμενος εξοπλισμός.....	115
8.9 Αποτελέσματα μελέτης	116
8.10 Εξοικονόμηση ενέργειας και οικονομικό όφελος σε σχέση με την προηγούμενη εγκατάσταση	118
8.11 Σενάρια ρύθμισης φωτεινότητας και περαιτέρω προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας.....	120
8.11.1 Σύστημα Διατήρησης της Φωτεινής Ροής.....	120
8.11.2 Προτεινόμενο σενάριο dimming.....	121
8.11.3 Constant Lumen Output σε συνδυασμό με προτεινόμενο σενάριο dimming...	125
8.11.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων	126
8.12 Αξιολόγηση επένδυσης	127
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα και Προοπτικές για τα Συστήματα Διαχείρισης Προσαρμοστικού Φωτισμού	131
Βιβλιογραφία.....	133

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Πλάτος λωρίδας ίσο με 5m	25
Εικόνα 1.2: Πλάτος λωρίδας μικρότερο από 5m γιατί το πλάτος του δρόμου είναι μικρότερο από 10m	25
Εικόνα 1.3: Πλάτος λωρίδας μικρότερο από 5m εξαιτίας εμποδίου.....	25
Εικόνα 2.1: «Έξυπνο» σύστημα διαχείρισης φωτισμού	27
Εικόνα 3.1: Λάμψη νυχτερινού ουρανού στην Κωνσταντινούπολη	34
Εικόνα 3.2: Παράδειγμα χρήσιμου φωτός και φωτορύπανσης από φωτιστικό εξωτερικού χώρου τοποθετημένο σε ιστό.	34
Εικόνα 3.3: Η Ευρώπη την νύχτα.....	37
Εικόνα 3.4: Σωστή τοποθέτηση	39
Εικόνα 3.5: Λάθος τοποθέτηση	39
Εικόνα 4.1: Οδός Rodney, Liverpool, πριν την εγκατάσταση φωτιστικών οδοφωτισμού	46
Εικόνα 4.2: Οδός Rodney, Liverpool, μετά την εγκατάσταση φωτιστικών οδοφωτισμού	46
Εικόνα 4.3: Πείραμα πρώτο - Το σενάριο C κρίθηκε καταλληλότερο με κριτήριο το αίσθημα ασφάλειας	48
Εικόνα 4.4: Πείραμα δεύτερο – Το σενάριο C κρίθηκε καταλληλότερο με κριτήριο το αίσθημα της ασφάλειας.....	48
Εικόνα 5.1: Γράφημα εναλλακτικής επιλογής για τις κλάσεις M και C.....	67
Εικόνα 6.1: Σχηματικό διάγραμμα δομής ενός ηλεκτρονικού ballast	74
Εικόνα 6.2: Διάφοροι τύποι ηλεκτρομαγνητικών ballast-(a)Magnetic Reactor, (b) High Reactance Autotransformer, (c) Constant Wattage Autotransformer, (d) Constant Wattage Isolated, (e) Magnetic Regulator	74
Εικόνα 6.3: LED σε PCB.....	76
Εικόνα 6.4: COB LED	76
Εικόνα 6.5: Απεικόνιση LED και αρχή λειτουργίας του.....	77
Εικόνα 6.6: Μπλοκ διάγραμμα επιλογής κατάλληλης τοπολογίας driver.....	78
Εικόνα 6.7: Κύκλωμα σταθεροποιητή τάσης και ρυθμιστή φωτεινής ροής.....	79
Εικόνα 6.8: Συστήματα Ελέγχου σταθεροποιητή και ρυθμιστή	80
Εικόνα 6.9: Επίπεδα τάσης και καταστάσεις διακοπών	80
Εικόνα 6.10: Κυκλωματικό διάγραμμα εξοπλισμού για συνεχές dimming σε εγκαταστάσεις με μαγνητικά ballast.....	82
Εικόνα 6.11: Σχέση ισχύος λαμπτήρα με κανονικοποιημένη διακοπτική συχνότητα για ballast τύπου LC	83
Εικόνα 6.12: Σχέση ισχύος λαμπτήρα με DC τάση για ballast τύπου LC.....	83
Εικόνα 6.13: Γράφημα ισχύος σε σχέση με την φωτεινή απόδοση για λαμπτήρα MH 400 W	85
Εικόνα 6.14: (α)Κύκλωμα ανορθωτή γέφυρας παράλληλα με πυκνωτή (b) Τάση εξόδου, ρεύμα εξόδου, ρεύμα εισόδου	86
Εικόνα 6.15: Διάγραμμα βαθμίδων τυπικού LED driver	86
Εικόνα 6.16: Ρεύμα οδήγησης των LED σε μορφή τετραγωνικού παλμού με duty cycle 96,50,10,4.3%.....	87
Εικόνα 6.17: DC ρεύμα οδήγησης στο 25% του ονομαστικού ρεύματος οδήγησης των LED	88

Εικόνα 6.18: Σχέση μεταξύ της φωτεινής ροής και του ρεύματος οδήγησης για LED της εταιρείας LUMILEDS.....	88
Εικόνα 6.19: Μεταβολή φωτεινής ροής από ψηφιακό ηλεκτρονικό σύστημα με στοιχεία σύνδεσης DALI.....	91
Εικόνα 6.20: Μήνυμα ελεγκτή σύμφωνα με το πρωτόκολλο DALI.....	92
Εικόνα 6.21: Μήνυμα ECG σύμφωνα με το πρωτόκολλο DALI.....	92
Εικόνα 6.22: Δικτυακές τοπολογίες	97
Εικόνα 6.23: Δίκτυο πρόσβασης mesh τοπολογίας βασισμένο στο πρωτόκολλο ZigBee	98
Εικόνα 6.24: Τρία ετερογενή δίκτυα φωτισμού που επικοινωνούν με τρία CMS.....	100
Εικόνα 7.1: Άποψη του GUI του συστήματος της Ιεράπετρας.....	108
Εικόνα 8.1: Η εγκατάσταση στο λογισμικό Owllet Nightshift.....	111
Εικόνα 8.2 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού	115
Εικόνα 8.3 Φωτιστικό Ampere	115
Εικόνα 8.4: Γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ φωτεινής ροής και ισχύος.....	117
Εικόνα 8.5: Γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ φωτεινής ροής και ρεύματος οδήγησης.....	117
Εικόνα 8.6: Εξοικονόμηση Ενέργειας με Σύστημα CLO.....	120
Εικόνα 8.7: Ημερήσιο προφίλ ρύθμισης της φωτεινής ροής κατά την χειμερινή περίοδο.	123
Εικόνα 8.8: Ημερήσιο προφίλ ρύθμισης της φωτεινής ροής κατά την θερινή περίοδο	124
Εικόνα 8.9: Γραφική αναπαράσταση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά Φ/Σ σε κάθε περίπτωση	126
Εικόνα 8.10: Γραφική αναπαράσταση του ποσοστού εξοικονόμησης ανά Φ/Σ σε κάθε περίπτωση	126
Εικόνα 8.11: Γραφική αναπαράσταση του ετήσιου οικονομικού οφ ανά Φ/Σ σε κάθε περίπτωση	127
Εικόνα 8.12: Καμπύλη ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 1.....	129

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες χρώματος	21
Πίνακας 3.1: Κατηγορίες φωτιστικών με βάση τον βαθμό αποκοπής	38
Πίνακας 3.2: Επιτρεπόμενα όρια διαφεύγοντος προς τον ουρανό φωτός ανά περιβαλλοντική ζώνη	40
Πίνακας 3.3: Επιτρεπόμενα όρια έντασης φωτισμού ανά περιβαλλοντική ζώνη	40
Πίνακας 3.4: Περιορισμός φωτεινής έντασης φωτεινών πηγών ανά περιβαλλοντική ζώνη .	41
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα σχετικά με την πρόβλεψη των οδηγών	44
Πίνακας 5.1: Ομαδοποίηση καταστάσεων φωτισμού	52
Πίνακας 5.2: Προτεινόμενο εύρος κλάσεων φωτισμού	53
Πίνακας 5.3: Προτεινόμενη επιλογή από το διαθέσιμο εύρος	54
Πίνακας 5.4: Απαιτήσεις κλάσεων ΜΕ	55
Πίνακας 5.5 Κλάσεις φωτεινής έντασης για τον έλεγχο της θάμβωσης.....	56
Πίνακας 5.6: Κλάσεις θάμβωσης ενόχλησης	57
Πίνακας 5.7: Παράμετροι για την επιλογή κλάσεων φωτισμού Μ	59
Πίνακας 5.8: Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού Μ	60
Πίνακας 5.9: Αντιστοιχία κλάσεων φωτισμού Μ και C για διάφορους τύπους οδοστρώματος	60
Πίνακας 5.10: Αποτίμηση παραμέτρων με βάση το CIE 115-2010.....	62
Πίνακας 5.11: Κλάσεις φωτισμού δρόμου ανά χρονική περίοδο.....	63
Πίνακας 5.12: Παράμετροι για την επιλογή κλάσεων φωτισμού Μ	64
Πίνακας 5.13: Εναλλακτική μέθοδος επιλογής για τις κλάσεις Μ και C [32]	66
Πίνακας 5.14: Παράμετροι για την επιλογή κατάστασης φωτισμού	68
Πίνακας 5.15: Προτεινόμενο εύρος κλάσεων φωτισμού (κατάσταση φωτισμού Β1)	68
Πίνακας 5.16: Προτεινόμενη επιλογή από το διαθέσιμο εύρος (κατάσταση φωτισμού Β1)	68
Πίνακας 5.17: Αποτίμηση παραμέτρων για την λεωφόρο Αλεξάνδρας	68
Πίνακας 5.18: Κυκλοφοριακή ροή και κλάση λεωφόρου Αλεξάνδρας ανά χρονική περίοδο	69
Πίνακας 5.19: Κλάσεις φωτισμού δρόμου ανά χρονική περίοδο.....	69
Πίνακας 5.20: Παράμετροι για την επιλογή κλάσεων φωτισμού Μ για την λεωφόρο Αλεξάνδρας	70
Πίνακας 5.21: Κλάσεις φωτισμού δρόμου ανά χρονική περίοδο.....	70
Πίνακας 6.1: Συγκριτικός πίνακας συστημάτων dimming με ηλεκτρονικό και ηλεκτρομαγνητικό ballast	75
Πίνακας 6.2: Πίνακας ισχύος και αντίστοιχης απόδοσης για λαμπτήρα ΜΗ 400 W	84
Πίνακας 6.3: Απόσταση μετάδοσης συναρτήσεως της διατομής του αγωγού.....	91
Πίνακας 6.4: Πίνακας περιγραφής πεδίων μηνύματος ελεγκτή DALI	92
Πίνακας 8.1 : Πίνακας αποτίμησης παραμέτρων κλάσης Μ για το Τμήμα 1	112
Πίνακας 8.2 : Πίνακας αποτίμησης παραμέτρων κλάσης Μ για το Τμήμα 2	113
Πίνακας 8.3: Απαιτήσεις κλάσης Μ4 κατά CIE 115-2010	113
Πίνακας 8.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτοτεχνική μελέτη του Τμήματος 1	114
Πίνακας 8.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτοτεχνική μελέτη του Τμήματος 2	114
Πίνακας 8.6: Χαρακτηριστικά φωτιστικού	115

Πίνακας 8.7: Περίληψη αποτελεσμάτων για το Τμήμα 1	116
Πίνακας 8.8: Περίληψη αποτελεσμάτων για το τμήμα 2	116
Πίνακας 8.9: Κόστη συντήρησης ανά είδος εργασίας Φ/Σ σύμφωνα με Γ.Γ.Δ.Ε.	118
Πίνακας 8.10: Εξοικονόμηση ενέργειας και ετήσιο οικονομικό όφελος ανά Φ/Σ και ανά τμήμα.....	119
Πίνακας 8.11: Συγκριτικός πίνακας για φωτιστικά με και χωρίς λειτουργία CLO	120
Πίνακας 8.12: Επιλογή κλάσης για κάθε χρονική περίοδο για το Τμήμα 1	121
Πίνακας 8.13: Απαιτήσεις κλάσεων και αποτελέσματα προσομοίωσης για το Τμήμα 1.....	122
Πίνακας 8.14: Επιλογή κλάσης για κάθε χρονική περίοδο για το Τμήμα 2	122
Πίνακας 8.15: Απαιτήσεις κλάσεων και αποτελέσματα προσομοίωσης για το Τμήμα 2.....	123
Πίνακας 8.16: Πίνακας υπολογισμού ετήσιας κατανάλωσής ανά Φ/Σ με dimming	124
Πίνακας 8.17: Συγκριτικός πίνακας για φωτιστικά με και χωρίς λειτουργία dimming	125
Πίνακας 8.18: Συγκριτικός πίνακας για φωτιστικά με και χωρίς συνδυαστική λειτουργία dimming και CLO	125
Πίνακας 8.19: Ετήσια μείωση κόστους ενέργειας και ετήσια κόστη συντήρησης ανά μονάδα Φ/Σ και ανά ορισμένη περιοχή	128
Πίνακας 8.20: ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) το έτος n σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 1	129
Πίνακας 8.21: ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) το έτος n σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 2	130

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή σε Βασικές Έννοιες Φωτισμού

1.1 Βασικές έννοιες τεχνολογίας φωτισμού

Θερμοκρασία Χρώματος (Color Temperature): Η θερμοκρασία χρώματος είναι το μέγεθος που περιγράφει την απόχρωση των φωτεινών πηγών. Μετριέται σε βαθμούς Kelvin (K) και ισούται με την θερμοκρασία στην οποία όταν βρεθεί το μέλαν σώμα του Planck θα παράγει φως του ίδιου χρώματος. Το μέλαν σώμα είναι ένα θεωρητικό μοντέλο, το οποίο έχει την δυνατότητα να απορροφά όλα τα μήκη κύματος ακτινοβολίας, δεν ανακλά τίποτα και εκπέμπει την μέγιστη δυνατή ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και σε όλες τις διευθύνσεις.

Επιπλέον, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο ψυχρότερη είναι η απόχρωση της φωτεινής πηγής. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες χρώματος [1]:

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες χρώματος

Θερμοκρασία	Απόχρωση
Κάτω από 3300 K	Ζεστή
Από 3300 έως 5300 K	Ουδέτερη
Πάνω από 5300 K	Ψυχρή

Δείκτης Χρωματικής Απόδοσης (Color Rendering Index-CRI/R_a): Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης R_a ή CRI όπως συμβολίζεται στις Η.Π.Α. είναι το μέγεθος που καθορίζει την ποιότητα του χρώματος της φωτεινής πηγής. Εκφράζει, δηλαδή, την ικανότητα της πηγής να αποδίδει ρεαλιστικά τα χρώματα. Πρόκειται για αδιάστατο μέγεθος που παίρνει τιμές από το μηδέν έως το εκατό. Όσο πιο μεγάλο R_a έχει μια φωτεινή πηγή τόσο πιο καλά αναπαράγει τα χρώματα [1].

Φωτεινή Ροή (Luminous Flux): Η φωτεινή ροή Φ είναι το πηλίκο της φωτεινής ενέργειας Q που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή στην μονάδα του χρόνου. Η φωτεινή ενέργεια Q είναι το μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στην ζώνη φάσματος του ορατού φωτός (380nm-780nm), όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Η φωτεινή ροή μετράται σε lumen (lm) [1].

Φωτεινή Ένταση (Luminous Intensity): Η φωτεινή ένταση ή ένταση φωτεινής πηγής I είναι το διανυσματικό μέγεθος που εκφράζει το ποσό της φωτεινής ροής Φ που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή προς κάθε κατεύθυνση του χώρου. Ορίζεται ως ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής dΦ που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία dω προς την γωνία αυτή:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Μετράται σε lm/sr (lumen/sterad) [1].

Ένταση φωτισμού (Illuminance): Η ένταση φωτισμού ή φωτισμός επιφάνειας E είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Η ένταση φωτισμού ως μέγεθος περιγράφει το αποτέλεσμα μιας φωτεινής πηγής, σε αντίθεση με τα παραπάνω μεγέθη που περιγράφουν ιδιότητες της. Μετράται σε lux ($lx=lm/m^2$) [1].

Στον οδοφωτισμό, η επιφάνεια S μπορεί να είναι:

- Οριζόντια: Όταν θέλουμε να υπολογίσουμε την μέση ένταση φωτισμού του δρόμου επιλέγουμε μια οριζόντια επιφάνεια παράλληλη στην επιφάνεια του δρόμου.
- Κάθετη: Σε περιπτώσεις κυκλοφοριακών κόμβων ή διοδίων μας ενδιαφέρει η μέση ένταση φωτισμού κάθετων επιφανειών.
- Ημισφαιρική: Για την μέτρηση της έντασης φωτισμού σε ένα σημείο της επιφάνειας του δρόμου υπολογίζεται η φωτεινή ροή που προσπίπτει σε ένα μικρό ημισφαίριο με κέντρο το σημείο και με οριζόντια βάση προς την επιφάνεια του ημισφαιρίου.
- Ημικυλινδρική: Σε περιπτώσεις που είναι σημαντική η αναγνώριση προσώπων, όπως οι δρόμοι κατοικημένων περιοχών, επιλέγεται ημικυλινδρική επιφάνεια μέτρησης.

Φωτεινή Απόδοση (Luminous Efficiency): Η έννοια της φωτεινής απόδοσης εκφράζει την ποσότητα των παραγόμενων lumen ανά καταναλισκόμενο Watt και είναι πολύ σημαντικό μέγεθος της αξιολόγησης της απόδοσης μιας φωτεινής πηγής. Μετράται σε lm/W [1].

Λαμπρότητα (Luminance): Η λαμπρότητα L ορίζεται ως το πηλίκο της έντασης σε μια δεδομένη κατεύθυνση προς μια προβαλλόμενη περιοχή, όπως φαίνεται από τον παρατηρητή. Η προβαλλόμενη επιφάνεια μπορεί να αντιστοιχεί είτε σε μια συσκευή φωτισμού, είτε σε μια επιφάνεια που ανακλά το φως που προσπίπτει πάνω της (ετερόφωτη επιφάνεια).

$$L = \frac{I}{S_{\text{προβ.}}}$$

Η λαμπρότητα, δηλαδή, είναι ένα υποκειμενικό μέγεθος, καθώς ανάλογα με την θέση του παρατηρητή μεταβάλλεται και η προβαλλόμενη επιφάνεια. Επιπροσθέτως, χαρακτηρίζει την φωτεινότητα της επιφάνειας και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάκλαση της. Η μονάδα της είναι η candela ανά τετραγωνικό μέτρο (cd/m^2) [1].

Στον οδοφωτισμό υπολογίζεται η μέση λαμπρότητα οδοστρώματος L_{av} ή \bar{L} με την διαδικασία που ορίζει το Ευρωπαϊκό πρότυπο για τον οδοφωτισμό EN 13201-3 «Calculation of performance», το οποίο βασίστηκε στην τεχνική έκθεση CIE 140-2000 «Road Lighting Calculations» [2],[26].

Ομοιομορφία (Uniformity): Η ομοιομορφία U είναι ένα μέγεθος που καθορίζει και εκφράζει την ποιότητα του φωτεινού αποτελέσματός. Στον οδοφωτισμό εξετάζονται δύο είδη ομοιομορφίας, η συνολική και η διαμήκης.

Η συνολική ομοιομορφία (overall uniformity- U_o) είναι το πηλίκο της ελάχιστης τιμής της λαμπρότητας στην μετρούμενη επιφάνεια του δρόμου προς την μέση λαμπρότητα. Το κριτήριο αυτό είναι σημαντικό για τον έλεγχο της ελάχιστης ορατότητας στον δρόμο.

Η διαμήκης ομοιομορφία (longitudinal uniformity- U_l) είναι το πηλίκο της ελάχιστης προς την μέγιστη τιμή της λαμπρότητας κατά μήκος της γραμμής στο μέσο της λωρίδας κυκλοφορίας. Πρόκειται κυρίως για ένα κριτήριο αναφορικά με την οπτική άνεση και ο σκοπός του είναι η αποφυγή ενός επαναλαμβανόμενου μοτίβου από ζώνες πολύ χαμηλής και υψηλής λαμπρότητας στον δρόμο. Αυτό το μέγεθος έχει εφαρμογή σε τμήματα δρόμου μεγάλου μήκους που φωτίζονται σε όλο το μήκος τους. Τόσο η συνολική όσο και η διαμήκης ομοιομορφία υπολογίζονται με βάση το πρότυπο EN 13201-3 και την τεχνική έκθεση CIE 140-2000 [2],[26].

1.2 Βασικές έννοιες οδοφωτισμού

Αντίθεση (Contrast): Ως αντίθεση ορίζεται είναι η διαφορά στην λαμπρότητα ενός αντικειμένου με τον παρακείμενο χώρο του που καθορίζει τον βαθμό που αυτό γίνεται αντιληπτό. Για τον υπολογισμό της αντίθεσης έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι. Για την περίπτωση μικρών αντικειμένων σε μεγάλο ομοιόμορφο φόντο χρησιμοποιείται ο τύπος του Weber (Weber Contrast):

$$\text{Αντίθεση} = \frac{L_{\text{αντικειμένου}} - L_{\text{παρακείμενου χώρου}}}{L_{\text{παρακείμενου χώρου}}}$$

Συνεπώς, η αντίθεση ενός αντικειμένου μπορεί να είναι αρνητική, όταν αυτό είναι πιο σκούρο από το περιβάλλον του, ή θετική στην αντίθετη περίπτωση.

Το πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η αντίθεση ώστε ένα αντικείμενο να γίνεται αντιληπτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η ηλικία του παρατηρητή, η θάμβωση κ.α. Το ελάχιστο ποσό αντίθεσης που απαιτείται ονομάζεται κατώφλι αντίθεσης (threshold contrast) και βασίζεται στην ικανότητα διάκρισης ενός αντικειμένου τουλάχιστον τις μισές φορές παρατήρησης.

Επιπλέον, η αντίθεση εξαρτάται και από την διαφορά του χρώματος ενός αντικειμένου με το περιβάλλον του. Βέβαια, η επίδραση του χρώματος εξαρτάται

τόσο από το χρώμα των αντικειμένων όσο και από την ποιότητα απόδοσης των χρωμάτων του συστήματος φωτισμού.

Θάμβωση (Glare): Η θάμβωση σύμφωνα με την IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) είναι «η αίσθηση που προκαλείται από φωτεινές πηγές μέσα στο οπτικό πεδίο του ανθρώπου, για την οποία ο οφθαλμός δεν είναι προσαρμοσμένος και προκαλείται δυσφορία, ενόχληση ή απώλεια της δυνατότητας της όρασης.» Αποτελεί κύρια μορφή φωτορύπανσης, οπότε θα αναλυθεί διεξοδικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

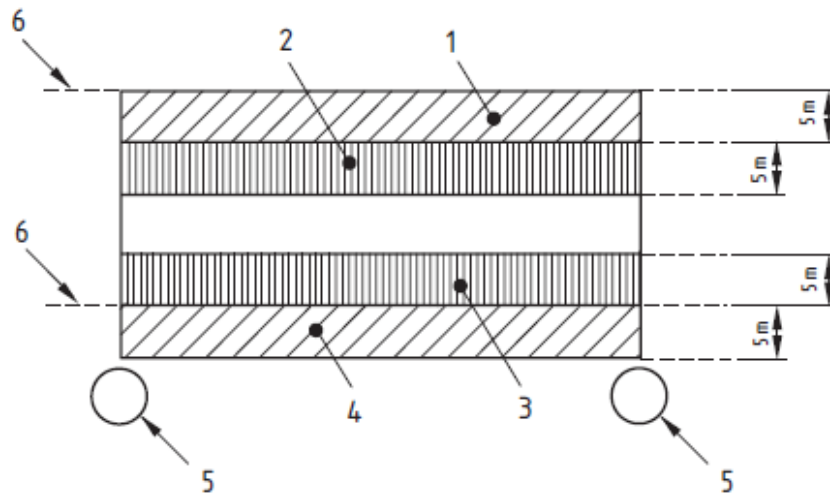
Κατώφλι Προσαύξησης (Threshold Increment-TI): Ο δείκτης TI είναι ένα μέγεθος για την μέτρηση της θάμβωσης. Γενικά, όταν ένα αντικείμενο είναι οριακά ορατό χωρίς να υπάρχει θάμβωση, παύει να είναι με την παρουσία της. Ο δείκτης TI εκφράζει το ποσοστό που πρέπει να αυξηθεί η αντίθεση ώστε το αντικείμενο να είναι ορατό με πιθανότητα 50%. Ο τρόπος υπολογισμού του TI περιγράφεται στο CIE 140-2000 και στο EN 13201-3 [2],[26].

Δείκτης Λαμπρότητας Περιβάλλοντος χώρου (Surround Ratio-SR): Ένας από τους κυριότερους στόχους του οδοφωτισμού είναι η διαμόρφωση μιας φωτεινής επιφάνειας δρόμου, ώστε το κάθε αντικείμενο να είναι ορατό. Ωστόσο, για παράδειγμα τα άνω τμήματα ψηλών αντικειμένων στην άκρη και κατά μήκος του δρόμου δεν διακρίνονται ιδιαίτερα εύκολα, ειδικά στα σημεία του δρόμου όπου υπάρχουν στροφές. Επομένως, επαρκής φωτισμός στον παρακείμενο χώρο αριστερά και δεξιά του δρόμου θα μπορούσε να διευκολύνει τους οδηγούς οχημάτων να αντιληφθούν καλύτερα το περιβάλλον και να προσαρμόζουν εγκαίρως την ταχύτητα τους όταν χρειάζεται.

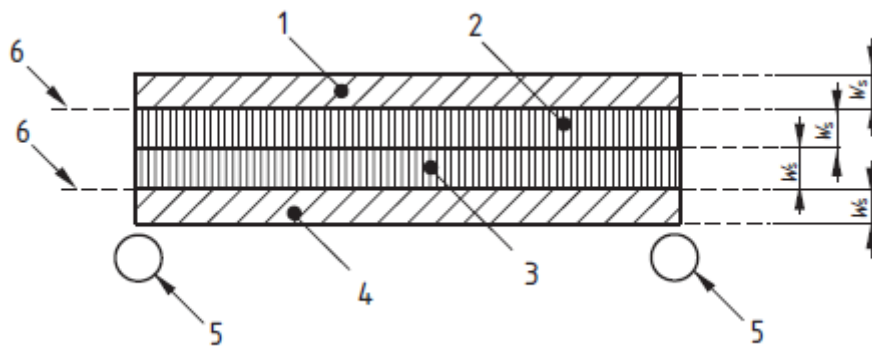
Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο δείκτης SR. Πρόκειται για ένα μέγεθος που εκφράζει την μέση οριζόντια ένταση φωτισμού στις παρακείμενες λωρίδες αριστερά και δεξιά του δρόμου και εκτός αυτού προς την μέση οριζόντια ένταση φωτισμού σε λωρίδες εφαπτόμενες στο ρείθρο του δρόμου στο εσωτερικό του. Η σχέση υπολογισμού είναι:

$$SR = \frac{\text{Μέση ένταση φωτισμού στην λωρίδα 1} + \text{Μέση ένταση φωτισμού στην λωρίδα 4}}{\text{Μέση ένταση φωτισμού στην λωρίδα 2} + \text{Μέση ένταση φωτισμού στην λωρίδα 3}}$$

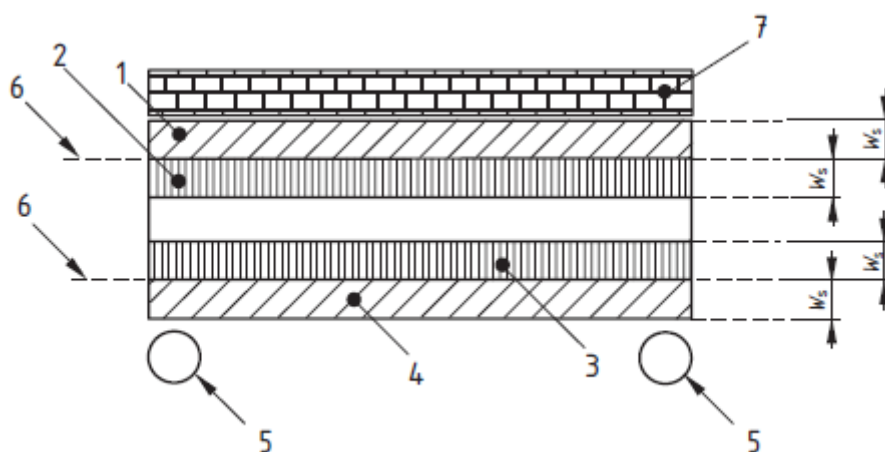
Το πλάτος των λωρίδων πρέπει να είναι 5m ή το μισό του δρόμου όταν το πλάτος του δρόμου είναι μικρότερο από 10m ή, όταν εκτός του δρόμου παρεμβάλλονται εμπόδια σε απόσταση μικρότερη από 5m, ίσο με την μικρότερη απόσταση από τον δρόμο έως το εμπόδιο. Οι περιπτώσεις αυτές απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 1.1: Πλάτος λωρίδας ίσο με 5m
 Πηγή: EN 13201-3 [27]



Εικόνα 1.2: Πλάτος λωρίδας μικρότερο από 5m γιατί το πλάτος του δρόμου είναι μικρότερο από 10m
 Πηγή: EN 13201-3 [27]



Εικόνα 1.3: Πλάτος λωρίδας μικρότερο από 5m εξαιτίας εμποδίου
 Πηγή: EN 13201-3 [27]

Ο ρόλος του δείκτη SR είναι να διασφαλίζει ότι το φως που κατευθύνεται στον παρακείμενο χώρο του δρόμου είναι επαρκές για την διάκριση αντικειμένων. Σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται επιπλέον φωτιστικά σώματα για τον φωτισμό του χώρου αυτού, δεν γίνεται χρήση του δείκτη SR [27].

Χρόνος αντίληψης και αντίδρασης (Perception time and reaction time): Ο χρόνος που κάνει ένας οδηγός για να αντιληφθεί μια αλλαγή μπροστά του εξαρτάται από παράγοντες όπως το αναμενόμενο του συμβάντος, η συναισθηματική φόρτιση, η ηλικία και άλλοι. Ο Green κατηγοριοποιεί τον χρόνο αντίδρασης με βάση το αναμενόμενο του συμβάντος, ως εξής:

- Αναμενόμενο συμβάν: Ο οδηγός είναι σε εγρήγορση και γνωρίζει ότι υπάρχει πιθανότητα να φρενάρει. Ο χρόνος αντίδρασης του είναι 0.7 δευτερόλεπτα, από τα οποία τα 0.5 είναι αντίληψη και τα 0.2 είναι χρόνος δράσης.
- Μη αναμενόμενο συμβάν: Ο οδηγός φρενάρει απότομα. Ο χρόνος τότε είναι 1.25 δευτερόλεπτα με τον χρόνο δράσης να παραμένει ο ίδιος.
- Παντελώς ξαφνικό συμβάν: Οι χρόνοι τότε αυξάνονται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Ο χρόνος δράσης αυξάνεται και αυτός σε 0.3 δευτερόλεπτα.

Η ύπαρξη ενός σωστά σχεδιασμένου συστήματος φωτισμού που αυξάνει την αντίθεση και συνεπώς την ορατότητα βοηθά τον οδηγό να μειώσει τους χρόνους αντίληψης του απροσδόκητου φαινομένου [3].

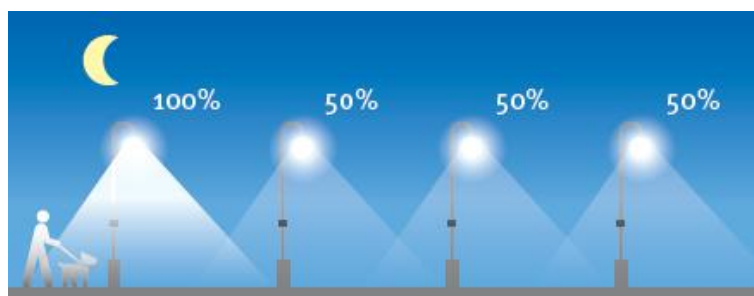
Κεφάλαιο 2: Γενικά για τον Προσαρμοστικό Φωτισμό

Υπάρχει μια γενικότερη τάση των αρχών στις περισσότερες χώρες, είτε πρόκειται για δημοτικές είτε για εθνικές αρχές, να θέτουν εκτός λειτουργίας τα φωτιστικά σε μερικούς δρόμους όταν η κίνηση πεζών και οχημάτων είναι σημαντικά μειωμένη, δηλαδή κατά τις πιο προχωρημένες ώρες της νύχτας, ώστε να μειωθούν οι ενεργειακές δαπάνες.

Ωστόσο, σήμερα, με την εφαρμογή νέων τεχνολογιών σε όλα τα επίπεδα του φωτισμού, από τα φωτιστικά και τα οπτικά συστήματα έως τα συστήματα ελέγχου, οι δρόμοι μπορούν να παραμένουν φωτισμένοι για όλη την διάρκεια της νύχτας. Με τις διαθέσιμες τεχνολογίες μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η ασφάλεια των πεζών και των οχημάτων.

Αυτό είναι εφικτό, καθώς οι νέες αυτές τεχνολογίες υποστηρίζουν την δυνατότητα του προσαρμοστικού φωτισμού. Ο όρος προσαρμοστικός φωτισμός (adaptive lighting), ή αλλιώς δυναμικός φωτισμός (dynamic lighting) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την δυνατότητα προσαρμογής των επιπέδων φωτεινότητας των φωτιστικών στα επίπεδα νυχτερινής δραστηριότητας και επιτυγχάνεται με την βοήθεια ειδικού εξοπλισμού ηλεκτρονικού ελέγχου. Η παροχή της κατάλληλης ποσότητας φωτισμού ανάλογα με την πυκνότητα της κυκλοφοριακής ροής, το είδος του δρόμου και τις καιρικές συνθήκες όπου και όταν χρειάζεται είναι προτιμότερη πρακτική από το να τεθούν τα φωτιστικά εκτός λειτουργίας. Ο προσαρμοστικός φωτισμός μπορεί να έχει εφαρμογή εκτός από των φωτισμό δρόμων και σε άλλους χώρους, όπως είναι οι χώροι στάθμευσης, τα πάρκα κλπ.

Τα συστήματα προσαρμοστικού φωτισμού μπορεί να είναι αυτόνομα και να ρυθμίζουν το επίπεδο φωτεινότητας με βάση σήματα από αισθητήρες ή προ-ρυθμισμένα σενάρια ρύθμισης της φωτεινής ροής ή να επικοινωνούν με ένα κεντρικό σύστημα τηλεδιαχείρισης. Τα τελευταία πέρα από την εξοικονόμηση ενέργειας δίνουν την δυνατότητα συνολικής επίβλεψης της εγκατάστασης. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες, η δομή και η λειτουργία των συστημάτων απομακρυσμένου ελέγχου για εγκαταστάσεις οδοφωτισμού αναλύονται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 6.



Εικόνα 2.1: «Εξυπνο» σύστημα διαχείρισης φωτισμού
Πηγή: www.schreder.com

Ο προσαρμοστικός φωτισμός, εξασφαλίζει πολλαπλά οφέλη, τα σημαντικότερα από τα οποία θα αναλυθούν εκτενέστερα σε επόμενα κεφάλαια:

- Μεγιστοποίηση εξοικονόμησης ενέργειας, αφού η μείωση της φωτεινής ροής των φωτιστικών αντιστοιχεί σε σχεδόν γραμμική μείωση της ισχύος κατανάλωσης.
- Συνολική επίβλεψη και διαχείριση της εγκατάστασης φωτισμού. Από την οθόνη ενός υπολογιστή μπορεί κανείς να έχει πρόσβαση σε μεγέθη που σχετίζονται με την λειτουργία κάθε φωτιστικού, όπως η θερμοκρασία του και η κατανάλωση του, να μεταβάλλει τα επίπεδα φωτεινότητας των φωτιστικών μεμονωμένα, συνολικά ή σε ομάδες, να εντοπίζει άμεσα τυχόν αστοχίες.
- «Έξυπνη» διαχείριση της εγκατάστασης φωτισμού. Με την χρήση κατάλληλων αισθητήρων τα φωτιστικά σε ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού μπορούν να λειτουργούν παράλληλα και ως όργανα μέτρησης καταγράφοντας μεγέθη όπως η υγρασία, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η ρύπανση, τα επίπεδα ρύπανσης, ηχορύπανσης και υπερϊώδους ακτινοβολίας. Επίσης, με την χρήση αισθητήρων κίνησης μπορούν να ανιχνεύουν την διέλευση πεζών και οχημάτων και να προσαρμόζουν την λειτουργία τους αυτόματα.
- Μείωση της φωτορύπανσης. Ο ενοχλητικός φωτισμός εδώ και δεκαετίες απασχολεί τους επιστήμονες πολλών κλάδων, αφού έχει επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, στον άνθρωπο, στις αστρονομικές παρατηρήσεις. Για τον λόγο αυτό πολλές περιβαλλοντικές οργανώσεις ενθαρρύνουν την χρήση τεχνολογιών προσαρμοστικού φωτισμού.
- Δυνατότητα παροχής φωτισμού υψηλής ποιότητας και ομοιομορφίας που διατηρεί το αίσθημα της άνεσης στους χρήστες του δρόμου.
- Αυξημένη διάρκεια ζωής των φωτιστικών, χάρη στο γεγονός ότι δεν λειτουργούν στο 100% καθ' όλη την διάρκεια της νύχτας.
- Μειωμένα έξοδα συντήρησης. Στις συμβατικές εγκαταστάσεις φωτισμού, γίνονται από την αρμόδια αρχή επιθεωρήσεις με αυτοκίνητο ανά τακτά χρονικά διαστήματα για τον έλεγχο της λειτουργίας των φωτιστικών. Κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο στην περίπτωση ενός συστήματος προσαρμοστικού φωτισμού αφού, όπως αναφέρθηκε, η επίβλεψη της συνολικής εγκατάστασης μπορεί να πραγματοποιηθεί από την οθόνη ενός υπολογιστή. Επιπλέον, χάρη στην αυξημένη διάρκεια ζωής των φωτιστικών απαιτείται λιγότερο συχνά η αντικατάστασή τους.
- Σημαντικά οικονομικά οφέλη από την εξοικονόμηση ενέργειας. Το ρεύμα που καταναλώνεται για τον φωτισμό των δρόμων είναι ένα μικρό ποσοστό

της συνολικής κατανάλωσης ρεύματος αλλά μπορεί να αποτελέσει το 60% του προϋπολογισμού ενός δήμου.

- Μείωση των εκπομπών Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂). Τα συστήματα προσαρμοστικού φωτισμού αποτελούν μια βιώσιμη λύση που μειώνει δραστικά το ανθρακικό αποτύπωμα με την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Βέβαια, όπως κάθε καινοτόμα τεχνολογία, ο προσαρμοστικός φωτισμός παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Πρώτον, οι εγκαταστάσεις προσαρμοστικού φωτισμού, παρόλο που εγγυώνται εξοικονόμηση έχουν σχετικά υψηλό κόστος κτήσης. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη περίοδο αποπληρωμής, η οποία υπολογίζεται περίπου στα 7 έως 8 χρόνια, όπως αναφέρεται στα αποτελέσματα του προγράμματος ESOLi. Το γεγονός αυτό αποθαρρύνει την ζήτηση για τέτοια συστήματα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την χρήση χρηματοδοτικών εργαλείων όπως, για παράδειγμα με ανάπτυξη συμβάσεων Σύμπραξης Ιδιωτικού και Δημοσίου Τομέα (ΣΔΙΤ), με χρηματοδότηση από Επιχειρήσεις Ενεργειακών Υπηρεσιών (EEX/Energy Service Companies-ESCOs) ή, για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με την χρηματοδότηση του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ).

Επιπλέον, το προσωπικό των δήμων που είναι υπεύθυνο για την λειτουργία και συντήρηση του αστικού φωτισμού δεν είναι εξοικειωμένο με αυτήν την τεχνολογία. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο η κάθε δημοτική αρχή που σκοπεύει να προχωρήσει σε αναβάθμιση του δικτύου φωτισμού της σε δίκτυο προσαρμοστικού φωτισμού να φροντίσει για την εκπαίδευση του προσωπικού της σχετικά με την χρήση του λογισμικού διαχείρισης του συστήματος. Για τον σκοπό αυτό μπορεί να απευθυνθεί είτε στην κατασκευάστρια εταιρεία αν προμηθεύεται από αυτήν απευθείας τον εξοπλισμό, είτε στην ανάδοχη εταιρεία που θα αναλάβει να φέρει εις πέρας το έργο. Όσον αφορά τις εργασίες συντήρησης, αυτές μπορεί να τις αναλάβει είτε ο ανάδοχος είτε το προσωπικό του δήμου αφού λάβει επαρκή εκπαίδευση. Στην Ελλάδα, για παράδειγμα, τέτοιου είδους έργα αναλαμβάνουν συνήθως ανάδοχοι εταιρείες μέσω ανοικτού διαγωνισμού. Σχεδόν πάντα αποτελεί προαπαιτούμενο για την ανάθεση του έργου η δέσμευση του αναδόχου ότι θα αναλάβει τις εργασίες συντήρησης για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, καθώς και την εκπαίδευση του προσωπικού του δήμου.

Τέλος, με τον προσαρμοστικό φωτισμό τίθεται ένα πολύ σημαντικό θέμα, αυτό της ασφάλειας των χρηστών του δρόμου. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες που δείχνουν την συσχέτιση μεταξύ του επιπέδου φωτισμού και του αριθμού ατυχημάτων, ειδικότερα αυτών που εμπλέκουν πεζούς. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα που θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο. Αναμφισβήτητα, πάντως, ο φωτισμός των δρόμων ενός χώρου, έστω

και με μικρότερη ένταση, είναι περισσότερο ασφαλής για τους πεζούς και τα οχήματα από την παντελή έλλειψη φωταγωγησης. Επίσης, δεν τίθεται τέτοιο θέμα όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις έξυπνου προσαρμοστικού φωτισμού, αφού σε αυτήν την περίπτωση η διέλευση πεζών και οχημάτων ανιχνεύεται και η ένταση των φωτιστικών σωμάτων φτάνει διαδοχικά στο 100%. Επομένως, περισσότερο ενισχύεται παρά μειώνεται το αίσθημα ασφάλειας των ανθρώπων.

Παρά τα όποια μειονεκτήματα, είναι τόσο σημαντικά τα οικολογικά και οικονομικά οφέλη που προσφέρει αυτή η νέα τεχνολογία με αποτέλεσμα στην Ευρώπη μόνο να έχουν πραγματοποιηθεί και πραγματοποιούνται μέχρι σήμερα πολυάριθμα ερευνητικά προγράμματα τα οποία αποσκοπούν στην συσσώρευση γνώσης για «έξυπνα» και μη συστήματα τηλεδιαχείρισης και στην διάδοση της.

Το πρώτο μεγάλο ευρωπαϊκό ερευνητικό σχέδιο προς αυτήν την κατεύθυνση είναι το e-street project για το οποίο συνεργάστηκαν εκπρόσωποι της βιομηχανίας φωτισμού, εθνικοί οργανισμοί ενέργειας αλλά και ορισμένοι ευρωπαϊκοί δήμοι. Οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος είναι διαφωτιστικές και τα αποτελέσματα ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Εκτιμάται ότι η Ευρώπη μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 38 TWh ετησίως με την αντικατάσταση παλιών εγκαταστάσεων φωτισμού με φωτιστικά νέας τεχνολογίας που υποστηρίζουν σύγχρονα συστήματα διαχείρισης, ποσό που μεταφράζεται σε ποσοστό 63.7% της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας για τον οδοφωτισμό. Ένα ακόμα σημαντικό αποτέλεσμα του e-street project είναι ότι η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de L'Éclairage, CIE) ξεκίνησε να προετοιμάζει την τεχνική έκθεση για την δημιουργία ενός νέου προτύπου για τον προσαρμοστικό οδοφωτισμό [4].

Το e-street διαδέχτηκε ένα ακόμα πιο μεγάλο ερευνητικό σχέδιο, το ESOLi. Για το ESOLi project συνεργάστηκαν εκπρόσωποι των ίδιων χώρων, δηλαδή της βιομηχανίας φωτισμού, των εθνικών οργανισμών ενέργειας και των δημοτικών αρχών. Οι στόχοι και αυτού του ερευνητικού προγράμματος ήταν παρόμοιοι, δηλαδή, η προώθηση της εκσυγχρόνισης του δημόσιου δικτύου φωτισμού με ιδιαίτερη έμφαση στον προσαρμοστικό φωτισμό και στον έξυπνο έλεγχο, η υποστήριξη τοπικών κοινωνιών που ενδιαφέρονται για μια τέτοιου είδους εκσυγχρόνιση και η ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης σχετικά με τις υπάρχουσες δυνατότητες μείωσης των λειτουργικών εξόδων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μιας εγκατάστασης φωτισμού εξωτερικού χώρου. Χρηματοδοτήθηκε από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Intelligent Energy Europe, το οποίο στοχεύει στην εκπλήρωση των δεσμεύσεων της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την μείωση των αερίων θερμοκηπίου μέχρι το 2020. Ολοκληρώθηκε με επιτυχία το 2013 [5].

Εκτός από τα δύο παραπάνω μεγάλα προγράμματα, έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα πολλά ακόμα μικρότερης κλίμακας στην Ευρώπη και στον υπόλοιπο κόσμο.

Κεφάλαιο 3: Φωτορύπανση

3.1 Τα είδη της φωτορύπανσης

Ο τεχνητός φωτισμός αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα του ανθρώπινου πολιτισμού, καθώς και χρήσιμο και αναπόσπαστο κομμάτι του, αφού με την χρήση του επεκτείνονται οι ανθρώπινες δραστηριότητες κατά την διάρκεια της νύχτας ή πραγματοποιούνται σε χώρους στους οποίους το ηλιακό φως είναι ανεπαρκές. Η αλόγιστη και ακατάλληλη χρήση του, ωστόσο, προκαλεί το πρόβλημα της φωτορύπανσης.

Φωτορύπανση ή φωτεινή όχληση, σε γενικές γραμμές, ονομάζεται ο πλεονάζων ή/και λανθασμένα προσανατολισμένος ενοχλητικός τεχνητός φωτισμός [6]. Ειδικότερα, οι κυριότερες μορφές της φωτορύπανσης είναι οι ακόλουθες [7]:

- **Θάμβωση(Glare):** Με κριτήριο τον βαθμό ενόχλησης που προκαλεί, η θάμβωση διακρίνεται σε δύο είδη [8]:
 - **Θάμβωση ενόχλησης(Discomfort Glare):** Η θάμβωση αυτού του είδους μπορεί να προκαλέσει ενόχληση αλλά όχι απώλεια της όρασης. Μπορεί να προκαλέσει δάκρυα και να αυξήσει τον ρυθμό που ανοιγοκλείνουμε τα μάτια μας (blink rate).
 - **Θάμβωση ανικανότητας διάκρισης(Disability Glare):** Το επίπεδο της θάμβωσης είναι τόσο μεγάλο που εμποδίζει τον παρατηρητή από το να βλέπει επαρκώς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του φαινομένου είναι η ενόχληση που προκαλείται από τα φώτα των διερχόμενων αυτοκινήτων.

Η αντίληψη της θάμβωσης ποικίλει σε μεγάλο βαθμό και εξαρτάται από το μέγεθος, την θέση, την φωτεινότητα της πηγής, αλλά και από την θέση του παρατηρητή και από τα επίπεδα φωτεινότητας στα οποία είναι συνηθισμένος. Παρόλα αυτά, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι υπολογισμού της σε εγκαταστάσεις τόσο εσωτερικού χώρου (μέθοδος UGR – Unified Glare Rating), όσο και εξωτερικού (υπολογισμός δείκτη TI – Threshold Increment στον οδοφωτισμό).

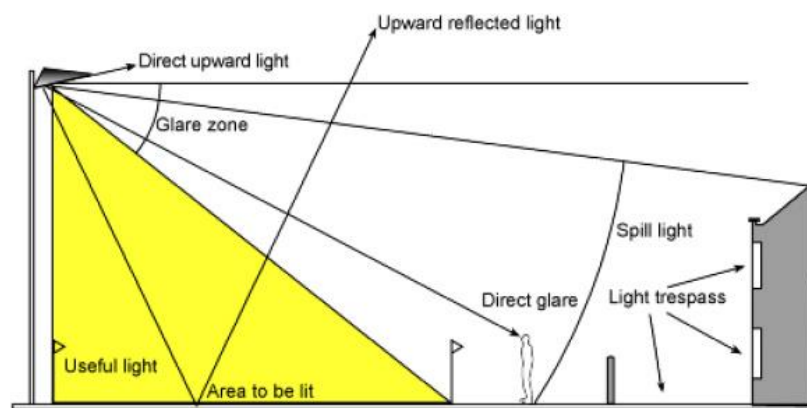
Η θάμβωση οφείλεται σε κακό σχεδιασμό του φωτιστικού ή της εγκατάστασης φωτισμού και περιορίζεται με τον έλεγχο της φωτεινής δέσμης ώστε να μην διαφεύγει πάνω από τις 75°.

- **Διαφεύγων Φωτισμός(Spill Light):** Το φως που διαφεύγει πέρα από τα όρια της περιοχής που πρέπει να φωτιστεί. Ο διαφεύγων φωτισμός είναι εύκολο να μετρηθεί.
- **Λάμψη νυχτερινού ουρανού(Sky Glow):** Το μέρος της φωτεινής δέσμης ενός φωτιστικού που διαφεύγει προς τα πάνω σε γωνία μεγαλύτερη των 90°,

καθώς και το φως που ανακλάται από το οδόστρωμα ή άλλες φωτιζόμενες επιφάνειες και διαχέεται στην ατμόσφαιρα προκαλούν το φαινόμενο της λάμψης νυκτερινού ουρανού, το οποίο δημιουργεί πρόβλημα στις αστρονομικές παρατηρήσεις.



Εικόνα 3.1: Λάμψη νυκτερινού ουρανού στην Κωνσταντινούπολη
Πηγή: blog.nus.edu.sg



Light pollution is often caused by the way light is emitted from lighting equipment. Choosing proper equipment and carefully mounting and aiming it can make a significant difference.

Εικόνα 3.2: Παράδειγμα χρήσιμου φωτός και φωτορύπανσης από φωτιστικό εξωτερικού χώρου τοποθετημένο σε ιστό.
Πηγή: www.lrc.rpi.edu

Από τα παραπάνω είδη φωτεινής ρύπανσης, το φαινόμενο της θάμβωσης διαθέτει τις πιο άμεσα αντιληπτές συνέπειες. Ωστόσο, και τα άλλα δυο φαινόμενα έχει παρατηρηθεί ότι έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

3.2 Επιπτώσεις της φωτορύπανσης

3.2.1 Επιπτώσεις στην αστρονομία

Το πρόβλημα της λάμψης του νυχτερινού ουρανού εμφανίστηκε ήδη πολλές δεκαετίες πριν όταν οι αστρονόμοι παρατήρησαν ότι η νυχτερινή εικόνα του ουρανού έχει υποβαθμιστεί σημαντικά λόγω έλλειψης φωτεινής αντιπαράθεσης δημιουργώντας πρόβλημα στις αστρονομικές παρατηρήσεις. Οι πρώτες επιπτώσεις από τον υπερφωτισμένο νυχτερινό ουρανό παρατηρήθηκαν το 1930 στο αστεροσκοπείο του Όρους Γουίλσον, 13 χιλιόμετρα περίπου από την πόλη Πασαντίνα των ΗΠΑ. Η δυσχέρεια στις αστρονομικές παρατηρήσεις ανάγκασε τους αστρονόμους να μεταφέρουν το αστεροσκοπείο σε μεγαλύτερη απόσταση από την πόλη. Τα επόμενα χρόνια, και άλλα αστρονομικά παρατηρητήρια που βρίσκονταν σχετικά κοντά σε αστικά κέντρα αναγκάστηκαν είτε να περιορίσουν τις δραστηριότητες τους, είτε να μεταφερθούν. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται τα αστεροσκοπεία της Καλιφόρνια και της Αριζόνα, τα οποία την εποχή της ιδρύσεως τους ήταν ανάμεσα στα κορυφαία παγκοσμίως [9].

Καθώς οι επιπτώσεις του ενοχλητικού φωτισμού άρχισαν να πληθαίνουν έγινε επιτακτική η ανάγκη σύστασης μιας οργάνωσης για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Έτσι συγκροτήθηκε το 1988 η οργάνωση IDA (International Dark-Sky Association) μέλη της οποίας είναι αστρονόμοι και άλλοι επιστήμονες, καθώς επίσης και κατασκευαστές, επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται στον χώρο του φωτισμού, οργανισμοί, ακόμα και ευαισθητοποιημένοι πολίτες.

3.2.2 Περιβαλλοντικές και οικολογικές επιπτώσεις

Πέρα από τις αστρονομικές παρατηρήσεις, το μη ελεγχόμενο διάχυτο φως μπορεί να προκαλέσει σοβαρά οικολογικά και εξελικτικά προβλήματα σε πληθυσμούς ζώων και φυτών, αφού όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί ρυθμίζουν την συμπεριφορά τους με βάση το φυσικό φως.

Όσον αφορά την χλωρίδα για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί ότι το τεχνητό φως μπορεί να επηρεάσει την προσαρμογή των δέντρων στις εποχιακές μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να προκαλέσει πρόωρη πτώση φύλλων και παρατεταμένες περιόδους ανθοφορίας [10]. Έτσι, επηρεάζονται έμμεσα και όλοι εκείνοι οι ζωντανοί οργανισμοί που έχουν τα δέντρα ως φυσικό περιβάλλον, όπως τα έντομα και τα πουλιά.

Βέβαια, η πανίδα επηρεάζεται από το τεχνητό φως και άμεσα. Περίπου το 30% των σπονδυλωτών και το 60% των ασπόνδυλων ζώων στον κόσμο είναι νυκτόβια. Καθώς ο νυχτερινός φωτισμός γίνεται ολοένα και πιο έντονος και επεκτείνεται σε απομακρυσμένες αγροτικές και παράκτιες περιοχές, η διάκριση μεταξύ μέρας και νύχτας γίνεται όλο και πιο θολή. Η κατανόηση μας όσον αφορά τις αρνητικές

συνέπειες της φωτορύπανσης είναι ακόμα σχετικά ασαφής, αφού βασίζεται κατά κύριο λόγο στην παρατήρηση μελετών περίπτωσης. Είναι, ωστόσο, βέβαιο ότι ο τεχνητός φωτισμός μεταβάλλει την φυσιολογία, συμπεριλαμβανομένης της ορμονικής ισορροπίας, καθώς και την συμπεριφορά, τον προσανατολισμό και την φυσική κατάσταση πολλών ζώων. Προκαλεί, επίσης, διαταραχές στην τροφική αλυσίδα και επηρεάζει την συνδεσιμότητα μεταξύ των βιοτόπων, επηρεάζοντας την μετανάστευση πολλών ειδών, όπως έντομα, αμφίβια, πτηνά, ψάρια, νυχτερίδες κ.α. [11].

Μεγάλο κίνδυνο, για παράδειγμα, αντιμετωπίζουν τα μεταναστευτικά πτηνά. Περίπου 200 είδη πτηνών ακολουθούν μεταναστευτική πορεία που διέρχεται από την Βόρεια Αμερική κατά την διάρκεια της νύχτας και πολλές φορές εν μέσω άσχημων καιρικών συνθηκών. Τα πουλιά πολύ συχνά αποπροσανατολίζονται από τους φωτισμένους ψηλούς πύργους των αστικών κέντρων από τα οποία διέρχονται [12].

Οι φωτεινές ηλεκτρικές πηγές επηρεάζουν και την συμπεριφορά των θαλάσσιων χελωνών. Οι νεοσσοί καταφέρνουν να προσανατολιστούν προς την θάλασσα κατευθυνόμενοι μακριά από την σκοτεινή σιλουέτα της ξηράς. Η ύπαρξη φωτός στην παραλία, τους αποπροσανατολίζει, οδηγώντας τους προς την φωτεινή πηγή, με κίνδυνο να μην βρουν ποτέ την θάλασσα. Επιπλέον, η αποπροσανατολισμένη παραπλάνηση προκαλεί στους νεοσσούς αφυδάτωση και εξάντληση, με αποτέλεσμα ακόμα και όσοι καταφέρνουν να φτάσουν στην θάλασσα, να έχουν μειωμένες ικανότητες επιβίωσης [12].

3.2.3 Επιπτώσεις στον άνθρωπο

Οι επιπτώσεις της φωτορύπανσης στην υγεία του ανθρώπου δεν είναι εξίσου καλά ορισμένες σε σχέση με τις επιπτώσεις στο φυσικό του περιβάλλον. Παρόλα αυτά, υπάρχει πληθώρα επιδημιολογικών στοιχείων που υποδεικνύουν μια σύνδεση μεταξύ της έκθεσης σε εσωτερικό τεχνητό φωτισμό και την απόκτηση προβλημάτων υγείας. Όπως όλα δείχνουν, η πηγή των προβλημάτων είναι η διατάραξη του εσωτερικού κρκαδιανού συστήματος του ανθρώπου ή κοινώς, του βιολογικού ρολογιού. Το βιολογικό ρολόι επηρεάζει τις φυσιολογικές διαδικασίες όλων σχεδόν των οργανισμών. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν εγκεφαλικές λειτουργίες, λειτουργίες των κυττάρων, τον έλεγχο του 10-15% των γονιδίων καθώς και την παραγωγή ορμονών, όπως της μελατονίνης, μιας ορμόνης που παράγεται κατά την διάρκεια της νύχτας, απουσία φωτός, και συμβάλλει στην διεκπεραίωση πολλών καθημερινών διαδικασιών του οργανισμού [12].

Επιπλέον, πολλές έρευνες σχετίζουν τον αποσυγχρονισμό των εσωτερικών βιορυθμών του ανθρώπου με διαταραχές του ύπνου. Οι διαταραχές αυτές με την

σειρά τους συνδέονται με μειωμένες διανοητικές ικανότητες, αύξηση βάρους, στρές, ακόμα και με την εμφάνιση διαβήτη [12].

Η επιστημονική κοινότητα συνεχίζει να μελετάει το εύρος και την πολυπλοκότητα της διαταραχής του κρκαδιανού συστήματος και τον ρόλο της έλλειψης μελατονίνης εξαιτίας της υπερβολικής έκθεσης σε τεχνητό φως κατά την διάρκεια της νύχτας. Είναι πλέον αδιαμφισβήτητη η σχέση της καλής υγείας και του καλού ύπνου. Επίσης, αναγνωρίζεται η σημασία της έκθεσης στο φως κατά την διάρκεια της ημέρας και στο σκοτάδι κατά την διάρκεια της νύχτας για την διατήρηση του βιορυθμού. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας πλέον κατατάσσει την διαταραχή του βιολογικού ρολογιού στους πιθανούς καρκινογενείς παράγοντες.

3.3 Φωτορύπανση και ενεργειακές απώλειες

Η ενέργεια που καταναλώνεται στον φωτισμό, εξωτερικό και εσωτερικό, σε παγκόσμιο επίπεδο δεν είναι με ακρίβεια γνωστή. Μια έρευνα του Μη Κερδοσκοπικού Οργανισμού Earth Policy εκτιμά ότι το 2005 αποτελούσε το 19% της παγκόσμιας κατανάλωσης, με τον οδοφωτισμό να αποτελεί το 1.6% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Στην Ευρώπη, το ποσοστό αυτό είναι ελαφρώς μικρότερο (14%). Η κατανάλωση αυτή ισοδυναμεί με εκπομπές CO₂ 1900 Mt [13]. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ για το 2008, η κατανάλωση ενέργειας για τον οδοφωτισμό ισούται με 870 GWh.



Εικόνα 3.3: Η Ευρώπη την νύχτα
Πηγή: NASA

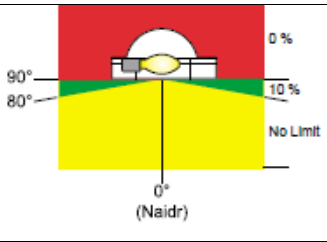
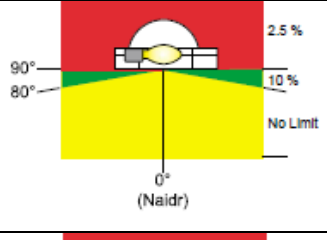
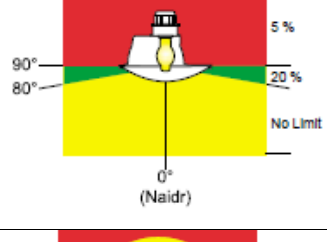
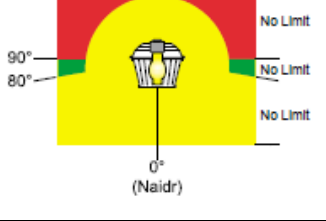
Όσον αφορά τις απώλειες φωτεινής ενέργειας, υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη απροσδιοριστία. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχει ακριβής μέθοδος για την μέτρηση τους. Μπορεί να γίνει μόνο μια εκτίμηση των απωλειών αυτών με την βοήθεια της τεχνολογίας των δορυφορικών επισκοπήσεων. Το βέβαιο είναι,

ωστόσο, ότι η φωτορύπανση εκτός από ενοχλητική και επιβλαβής για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, είναι και οικονομικά επιζήμιο φαινόμενο.

3.4 Τρόποι αντιμετώπισης της φωτορύπανσης

Για όλους τους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω η φωτορύπανση αποτελεί πολύ σημαντικό πρόβλημα των σύγχρονων κοινωνιών. Για την βιομηχανία φωτισμού αποτελεί πρόκληση η διατήρηση μιας ισορροπίας μεταξύ της μείωσης του διαφεύγοντος φωτός και της αποδοτικότητας μιας εγκατάστασης φωτισμού. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μια μεγάλη ποικιλία φωτιστικών και οπτικών συστημάτων. Τα οπτικά συστήματα των φωτιστικών με βάση τον βαθμό αποκοπής της φωτεινής δέσμης πάνω από το επίπεδο της φωτεινής πηγής διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.1.

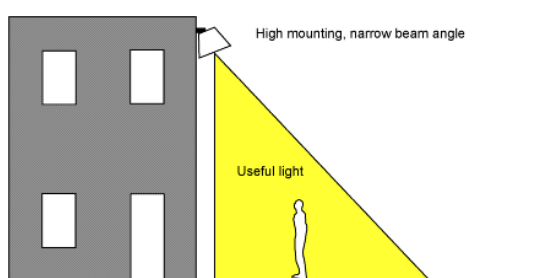
Πίνακας 3.1: Κατηγορίες φωτιστικών με βάση τον βαθμό αποκοπής

	<p>Πλήρους αποκοπής (Full-cutoff): Καθόλου φως δεν διαφεύγει πάνω από τις 90°, ενώ λιγότερο από το 10% της φωτεινής κατανομής εκπέμπεται μεταξύ 80° και 90°.</p>
	<p>Αποκοπής (Cutoff): Λιγότερο από το 2,5% των lumen του φωτιστικού εκπέμπονται στην κατεύθυνση των 90° και πάνω, ενώ λιγότερο το 10% της φωτεινής κατανομής εκπέμπεται μεταξύ 80° και 90°.</p>
	<p>Ημι-αποκοπής (Semi-cutoff): Λιγότερο από το 5% των lumen του φωτιστικού εκπέμπονται στην κατεύθυνση των 90° και πάνω, ενώ λιγότερο το 20% της φωτεινής κατανομής εκπέμπεται μεταξύ 80° και 90°.</p>
	<p>Μη αποκοπής (Non-cutoff): Δεν υπάρχει κανένας περιορισμός για την ποσότητα του φωτός πάνω από τις 90°.</p>

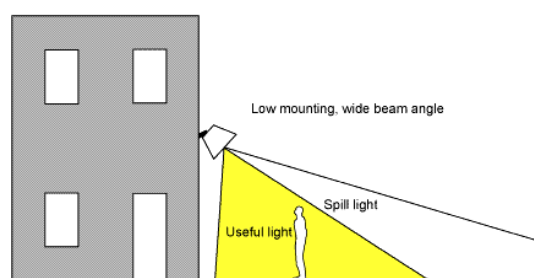
Για την αντιμετώπιση της φωτορύπανσης οι κατηγορίες ημι-αποκοπής και μη αποκοπής συνίσταται να αποφεύγονται. Οι κατηγορίες αυτές θα πρέπει να αποφεύγονται ειδικά στον οδοφωτισμό, όπου οι απαιτήσεις σε φωτεινή ισχύ είναι ιδιαίτερα μεγάλες.

Εκτός από τις κατηγορίες αποκοπής, υπάρχει σήμερα διαθέσιμη μια τεράστια ποικιλία φακών (στην περίπτωση των φωτιστικών LED) και ανακλαστήρων (στην περίπτωση φωτιστικών Μεταλλικών Αλογονιδίων, Υψηλής Πίεσης Ατμών Νατρίου κλπ) με φωτεινές κατανομές κατάλληλες ώστε να φωτίζεται επαρκώς σε κάθε εφαρμογή η επιφάνεια που πρέπει ελαχιστοποιώντας τις απώλειες.

Πέρα από τους κατασκευαστές, και οι μελετητές μιας εγκατάστασης φωτισμού μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση του διαφεύγοντος φωτισμού αλλά και της θάμβωσης με σωστή μελέτη και σχεδιασμό. Ο συνιστώμενος σχεδιασμός μιας εγκατάστασης περιλαμβάνει την επιλογή του κατάλληλου φωτιστικού με βάση το πολικό διάγραμμα και την φωτεινή απόδοση του, αλλά και την σωστή τοποθέτηση του όσον αφορά το ύψος και τον προσανατολισμό [14].



Εικόνα 3.4: Σωστή τοποθέτηση
Πηγή: www.lrc.rpi.edu



Εικόνα 3.5: Λάθος τοποθέτηση
Πηγή: www.lrc.rpi.edu

Σε επίπεδο παγκόσμιων οργανισμών και οργανισμών ενώσεων κρατών έχουν γίνει συντονισμένες προσπάθειες για την αντιμετώπιση της φωτορύπανσης. Παρόλο που ο στόχος ιδανικά θα ήταν η εξάλειψη της φωτορύπανσης, πρακτικά αυτό δεν είναι εφικτό. Είναι δυνατόν, όμως, τα επίπεδα του διαφεύγοντος φωτισμού να περιοριστούν σε κάποιες περιοχές περισσότερο από ότι σε άλλες, ανάλογα με το πόσο καταστροφικές μπορεί να είναι οι επιπτώσεις της φωτορύπανσης. Με βάση αυτό η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού (CIE) με την τεχνική έκθεση CIE 126:1997 «Guidelines for minimizing sky glow» [15] έχει θεσπίσει τέσσερις κατηγορίες περιοχών (περιβαλλοντικές ζώνες):

- **Ζώνη E1:** Περιοχές με εγγενώς σκοτεινά τοπία. Παραδείγματα αποτελούν τα εθνικά πάρκα, περιοχές απaráμιλλης φυσικής ομορφιάς, περιοχές γύρω από αστρονομικά παρατηρητήρια ή ακόμα και κατοικημένες περιοχές των οποίων οι κάτοικοι έχουν εκφράσει έντονη επιθυμία για μείωση του ενοχλητικού φωτισμού και οι αρχές έχουν θεσπίσει αυστηρούς περιορισμούς.
- **Ζώνη E2:** Περιοχές με χαμηλό περιβαλλοντικό φωτισμό. Αυτές μπορεί να είναι ημιαστικές ή αγροτικές κατοικημένες περιοχές. Ο οδοφωτισμός μπορεί να γίνει με βάση τα τυπικά πρότυπα της περιοχής.

- **Ζώνη E3:** Περιοχές με μέτρια φωτεινότητα περιβάλλοντος. Μπορεί να είναι αστικές οικιστικές περιοχές. Ο οδοφωτισμός γίνεται με βάση τα τυπικά πρότυπα.
- **Ζώνη E4:** Περιοχές με υψηλή φωτεινότητα περιβάλλοντος. Συνήθως, σ' αυτήν την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές με οικιστική και εμπορική χρήση και υψηλά επίπεδα νυχτερινής δραστηριότητας.

Ο οργανισμός IESNA ή IES (Illuminating Engineering Society Of North America) με τα τεύχη IESNA TM-11 «Lighting Trespass: Research, Results and Recommendations» και IESNA RP-33-99 «Lighting for Exterior Environments» και το Ινστιτούτο Μηχανικών Φωτισμού (Institution of Lighting Engineers - ILE) καθιέρωσαν ανώτατα επιτρεπτά επίπεδα για τον διαφεύγον φωτισμό για κάθε μια από τις τέσσερις περιβαλλοντικές ζώνες που θέσπισε η CIE. Οι προτεινόμενες ανώτατες τιμές διαφοροποιούνται μετά από μια ώρα που θεωρείται λήξη της περιόδου αιχμής και έναρξη της περιόδου μειωμένης δραστηριότητας (pre-curfew και post-curfew όρια). Η ώρα αυτή συνήθως ορίζεται να είναι στις 23:00 (IESNA 1999). Οι συνιστώμενες τιμές που παρέχονται ανά ζώνη αφορούν την ουράνια λάμψη, το ανεπιθύμητο φως και την θάμβωση.

Πίνακας 3.2: Επιτρεπόμενα όρια διαφεύγοντος προς τον ουρανό φωτός ανά περιβαλλοντική ζώνη

Περιβαλλοντική Ζώνη	Λάμψη νυχτερινού ουρανού – ULR* (max %)
E1	0.0
E2	2.5
E3	5.0
E4	15.0

*Το ULR (Upward Light Ratio) μιας εγκατάστασης είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό της φωτεινής ροής της συνολικής εγκατάστασης που κατευθύνεται απευθείας προς τον ουρανό.

Πίνακας 3.3: Επιτρεπόμενα όρια έντασης φωτισμού ανά περιβαλλοντική ζώνη

Περιβαλλοντική Ζώνη	Φώς που διέρχεται από παράθυρα, κάθετη ένταση φωτισμού (lux)	
	Pre-curfew	Post-curfew
E1	2	1*
E2	5	1
E3	10	2
E4	25	5

*Αποδεκτό για εγκαταστάσεις δημόσιου οδικού φωτισμού μόνο

Ειδικά για την θάμβωση το μέγεθος που μετράται είναι η φωτεινότητα της φωτεινής πηγής σε πιθανώς ενοχλητική κατεύθυνση εκτός των ορίων της περιοχής που πρόκειται να φωτιστεί.

Πίνακας 3.4: Περιορισμός φωτεινής έντασης φωτεινών πηγών ανά περιβαλλοντική ζώνη

Περιβαλλοντική Ζώνη	Ένταση φωτεινής πηγής (kilocandela)	
	Pre-curfew	Post-curfew
E1	0	0.0
E2	20	0.5
E3	30	1.0
E4	30	2.5

Τα μεγέθη που θέσπισε η IESNA και η ILE για τον έλεγχο της φωτορύπανσης, όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες είναι το ποσοστό της προς τα άνω εκπεμπόμενης φωτεινής ισχύος, η ένταση φωτισμού μετρούμενη σε κάθετο επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια των παραθύρων των κτιρίων της περιοχής και η φωτεινή ένταση της πηγής σε κατεύθυνση εκτός των επιθυμητών ορίων που είναι πιθανόν να προκαλεί ενόχληση. Με τον προσαρμοστικό φωτισμό και τα τρία αυτά μεγέθη μειώνονται, αφού μειώνεται η φωτεινή ροή της πηγής. Έτσι, είναι δυνατόν να επιτευχθούν τα χαμηλότερα όρια που πρέπει να τηρηθούν για το διάστημα από τις 11:00 μμ μέχρι την ανατολή του ηλίου.

Οι οδηγίες της IESNA, της CIE και του ILE μπορούν να θεωρηθούν σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη ειδικής νομοθεσίας για τον περιορισμό της φωτορύπανσης. Στην πολιτεία της Καλιφόρνια υπάρχει περιβαλλοντική νομοθεσία που λαμβάνει υπόψη τις τέσσερις περιβαλλοντικές ζώνες και τα προτεινόμενα όρια. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο δεν υπάρχει κάποια νομοθεσία ειδικά για την φωτορύπανση. Μερικές προσπάθειες σε μεμονωμένες χώρες έχουν αποδώσει καρπούς με πρώτο παράδειγμα την Σλοβενία, την Ισπανία (Ανδαλουσία) και την Ιταλία (τοπικός νόμος της Λομβαρδίας). Στην Αγγλία και στην Ουαλία, θεωρείται από το 2005 εκ νόμου θεσπισμένη όχληση, όπως η ηχορύπανση. Το παράδειγμά τους αναμένεται να ακολουθήσει και η Σκωτία, η οποία στο πλαίσιο του προγράμματος Smarter Scotland εξέδωσε μια σειρά οδηγιών για τον έλεγχο της φωτορύπανσης και την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Κεφάλαιο 4: Οδοφωτισμός και Ασφάλεια

4.1 Επίδραση του οδοφωτισμού στα αυτοκινητιστικά ατυχήματα

Τα τροχαία ατυχήματα αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα παγκοσμίως, ειδικά στις χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος. Ο αριθμός των ατυχημάτων και ο δείκτης σοβαρότητας, που καθορίζεται με βάση τους σοβαρούς τραυματισμούς και τους θανάτους που προκλήθηκαν, είναι σύμφωνα με έρευνες από 2 έως 3 φορές υψηλότερος κατά την διάρκεια της νύχτας, παρόλο που η νυχτερινή κυκλοφοριακή ροή είναι περίπου το 20% της ροής κατά την διάρκεια της ημέρας [16],[17].

Ο οδοφωτισμός έχει αποδειχθεί ως ένα αποτελεσματικό μέτρο προστασίας για την πρόληψη των τροχαίων τόσο σε αγροτικές όσο και σε αστικές περιοχές. Μια μεγάλη έρευνα βασισμένη σε 48 έρευνες που διεξήχθησαν σε 13 χώρες αποτίμησε τις συνέπειες της παροχής φωτισμού σε δρόμους που δεν φωτιζόνταν προηγουμένως. Τα συνολικά αποτελέσματα για κάθε είδους ατυχήματα, χρήστες του δρόμου και δρόμους δείχνουν μια μείωση των θανατηφόρων ατυχημάτων και τραυματισμών έως 60% καθώς και 15% μείωση των ατυχημάτων με υλικές βλάβες μετά την εγκατάσταση του συστήματος φωτισμού [18].

Η CIE πραγματοποίησε το 1992 μια μετα-ανάλυση 62 ερευνών σε 15 χώρες σχετικά με την επίδραση του φωτισμού στα ατυχήματα. Τα αποτελέσματα σε ποσοστό 85% υποδεικνύουν το ίδιο, την αποτελεσματικότητα δηλαδή του οδοφωτισμού ως μέτρο προστασίας έναντι ατυχημάτων. Με βάση την κλάση του δρόμου και την κατηγορία ατυχήματος τα αποτελέσματα δείχνουν μείωση από 13 έως 75%, με μία κατά μέσο όρο μείωση της τάξης των 30% [19].

Μερικά χρόνια αργότερα, και αφού ακολούθησαν και νέες έρευνες, το Εθνικό Κέντρο Επιστημονικής Έρευνας της Γαλλίας (National Centre for Scientific Research - CNRS) για λογαριασμό της Επιτροπής Φωτισμού της Γαλλίας (French Lighting Agency - AFE) ανέλαβε να διεξάγει μια έρευνα που διήρκεσε συνολικά 4 έτη (1998-2009). Η συγκεκριμένη έρευνα διαφέρει από τις προηγούμενες, αφού δεν λαμβάνει υπόψη δεδομένα που αφορούν τον δρόμο, αλλά μόνο τις αντιδράσεις των οδηγών στα οχήματά τους. Οι συνθήκες οδήγησης και περιβάλλοντος (καιρικές συνθήκες, κατάσταση οδοστρώματος, κούραση κ.λπ.) αποτελούν ελεγχόμενα και μετρήσιμα μεγέθη [20].

Αυτό το πείραμα έγινε σε προσομοιωτή. Με αυτόν τον τρόπο αφαιρέθηκαν παράγοντες που επηρεάζουν και αλλοιώνουν τα στατιστικά μεγέθη και παράλληλα η ασφάλεια των συμμετεχόντων στο πείραμα παρέμεινε διασφαλισμένη. Μέσω αυτών των δοκιμών, οι ερευνητές κατάφεραν να επιβεβαιώσουν την σημασία του φωτισμού των δρόμων. Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια των πειραμάτων,

παρατηρήθηκαν οι αντιδράσεις των συμμετεχόντων σε συνθήκες που πιθανώς θα οδηγούσαν σε ατύχημα, καθώς και τα αποτελέσματα των ενεργειών τους [20].

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα σχετικά με την πρόβλεψη των οδηγών

	Καλή πρόβλεψη	Ατύχημα
Μη φωτισμένος δρόμος	4 οδηγοί	4 οδηγοί
Φωτισμένος δρόμος	10 οδηγοί	2 οδηγοί

Από την έρευνα της AFE προέκυψαν και άλλα ενδιαφέροντα αποτελέσματα:

- Οι μετρήσεις στον προσομοιωτή έδειξαν ότι με τον φωτισμό μειώνεται αισθητά το αίσθημα της υπνηλίας.
- Προέκυψε ένας συσχετισμός μεταξύ του κινδύνου που αντιλαμβάνεται ο οδηγός και τον αριθμό των ατυχημάτων. Αυτό έχει να κάνει με την θεωρία της αντιστάθμισης κινδύνου. Σύμφωνα με αυτήν, όσο λιγότερο αντιλαμβάνεται τον κίνδυνο κάποιος, τόσο περισσότερο ασφαλής αισθάνεται, και συνεπώς είναι λιγότερο προσεκτικός. Με την έλλειψη φωτισμού, η αντίληψη του κινδύνου μειώνεται και το ποσοστό των ατυχημάτων αυξάνεται. Για παράδειγμα, αν ο βαθμός αντίληψης του κινδύνου είναι υψηλότερος από τον πραγματικό κίνδυνο, η κυκλοφοριακή ροή μειώνεται και συνεπώς αυξάνεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση. Αντίθετα, αν ο βαθμός αντίληψης κινδύνου είναι χαμηλότερος τα ατυχήματα είναι περισσότερα.
- Η εξοικονόμηση ενέργειας δεν πρέπει να είναι ο μοναδικός παράγοντας για να αποφασίσουν οι αρμόδιες αρχές αν τα φωτιστικά θα πρέπει να παραμείνουν σβηστά ή αν θα πρέπει απλά να μειώσουν την φωτεινότητά τους. Προτεραιότητα θα πρέπει να αποτελεί η ασφάλεια.
- Το 70% των πληροφοριών που αντιλαμβάνεται ο οδηγός προέρχεται από την όραση και παίζει μεγάλο ρόλο η ικανότητα του να τις αναλύει.
- Ο ποιοτικός φωτισμός δίνει την δυνατότητα στους χρήστες του δρόμου να είναι προετοιμασμένοι και να μπορέσουν να αντιδράσουν έγκαιρα. Συνεπώς, η εξίσωση Άνεση = Πολυτέλεια είναι άστοχη στην περίπτωση του φωτισμού δρόμων.

Μία από τις σημαντικότερες μελέτες των τελευταίων ετών είναι και η διδακτορική διατριβή του P.O. Wanvik. Η εν λόγω διατριβή επικεντρώνεται, επεξεργάζεται και συσχετίζει 4 σημαντικές έρευνες πάνω στον φωτισμό και την ασφάλεια. Τα συμπεράσμα που προκύπτει είναι ότι με τον φωτισμό μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των ατυχημάτων στον δρόμο.

Πιο αναλυτικά, συγκρίνοντας ένα συγκεκριμένο τμήμα δρόμου πριν και μετά την εγκατάσταση συστήματος φωτισμού, το παρατηρούμενο αποτέλεσμα ήταν μια 28% μείωση των ατυχημάτων με τραυματισμούς μετά την εγκατάσταση του συστήματος. Το ποσοστό αυτό ήταν ακόμα πιο αυξημένο σε δρόμους όπου τα οχήματα κινούνταν με μεγαλύτερη ταχύτητα, αλλά μειωνόταν σε δρόμους με μέσο ημερήσιο όγκο οχημάτων >8000 [21].

Το κύριο αποτέλεσμα του οδοφωτισμού ήταν μια μείωση των ατυχημάτων που προκάλεσαν τραυματισμούς σε ποσοστό 50% σε δρόμους της Ολλανδίας, όπως υποδεικνύει ένα από τα άρθρα της διατριβής. Στους περιφερειακούς δρόμους η μείωση ήταν 54%. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η μείωση στα ατυχήματα που εμπλέκουν πεζούς και ποδηλάτες ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με αυτά των αυτοκινήτων και των μοτοσικλετών. Τέλος, η θετική επίδραση του φωτισμού ήταν ελαφρώς υψηλότερη στα θανατηφόρα τροχαία σε σχέση με τα υπόλοιπα [21].

Οι περιοχές εμπλοκής (conflict zones), όπως είναι οι κυκλικές διασταυρώσεις, οι έξοδοι αυτοκινητοδρόμων, οι διασταυρώσεις, οι ανισόπεδοι κόμβοι είναι περιοχές με μεγάλο ποσοστό ατυχημάτων και συνεπώς μας ενδιαφέρει η επίδραση του φωτισμού. Μια πρόσφατη έρευνα ανέλυσε τα ατυχήματα κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύκτας σε φωτισμένες και μη φωτισμένες διασταυρώσεις. Διάφοροι τύποι διασταυρώσεων μελετήθηκαν:

- Σε αστικούς και ημιαστικούς δρόμους
- Σε αγροτικούς δρόμους
- Με ή χωρίς σήμανση
- Με ή χωρίς φωτισμό

Η μελέτη διαφόρων διασταυρώσεων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο φωτισμός σε συνδυασμό με την σήμανση προκαλούν μείωση στα ατυχήματα έως 13%. Ο συγγραφέας του άρθρου προχώρησε και στην σύγκριση της ορατότητας σε διαφορετικές περιπτώσεις. Είναι κατανοητό ότι αντικείμενα με μεγάλη ανακλαστικότητα, καθώς και τα διερχόμενα αυτοκίνητα χάρη στα φώτα τους διακρίνονται εύκολα μες στη νύχτα. Ωστόσο, η νυχτερινή οδήγηση απαιτεί πολύ καλύτερη ορατότητα. Ένας οδηγός θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει την σχετική ταχύτητα, την κατεύθυνση της κίνησης, τα στοιχεία που συνθέτουν το περιβάλλον οδήγησης. Οτιδήποτε μπορεί να βελτιώσει την κρίση ενός οδηγού, την ανακλαστικότητα των αντικειμένων και να του προσφέρει οπτική καθοδήγηση είναι εξαιρετικά σημαντικό για την ασφάλεια. Ο εξωτερικός φωτισμός παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε αυτόν τον τομέα [22].

4.2 Οδοφωτισμός και εγκληματικότητα

Ο οδοφωτισμός στους δρόμους κατοικημένων περιοχών παίζει σπουδαίο ρόλο για ένα ακόμα πολύ βασικό λόγο. Εκτός από την πρόληψη των τροχαίων ατυχημάτων, που αναφέρθηκε παραπάνω, διευκολύνει τον προσανατολισμό των πεζών, την αποφυγή εμποδίων, την αναγνώριση προσώπων και κυρίως είναι σημαντικός για την πρόληψη της εγκληματικότητας και για την παροχή μιας γενικής αίσθησης ασφάλειας στους χρήστες του δρόμου. Χάρη σε αυτήν την ιδιότητα, ο εξωτερικός φωτισμός υποστηρίζει την νυχτερινή δραστηριότητα των πόλεων.



Εικόνα 4.1: Οδός Rodney, Liverpool, πριν την εγκατάσταση φωτιστικών οδοφωτισμού
Πηγή: www.schreder.com



Εικόνα 4.2: Οδός Rodney, Liverpool, μετά την εγκατάσταση φωτιστικών οδοφωτισμού
Πηγή: www.schreder.com

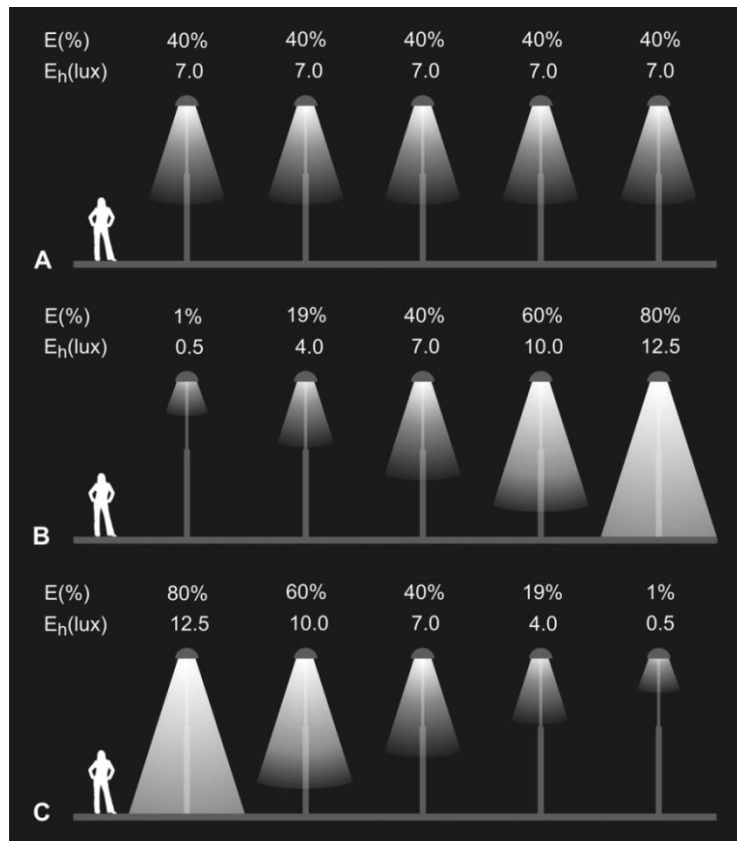
Μπορούμε να ορίσουμε την αντιληπτή προσωπική ασφάλεια ενός ατόμου ως την άμεση αίσθηση σιγουριάς σε συνδυασμό με την έλλειψη του άγχους να πέσει θύμα μιας πιθανής επίθεσης, καθώς διέρχεται από ένα περιβάλλον. Το αίσθημα ασφάλειας των πεζών εξαρτάται από χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος αυτού [23].

Ο φωτισμός ενός χώρου θεωρείται ως ο παράγοντας που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό το αίσθημα ασφάλειας ενός ατόμου στον χώρο αυτόν όπως τεκμηριώνεται από πολλές έρευνες (Lowen, Steel & Suedfeld, 1993, Nasar, Fisher & Grannis, 1993, Nasar & Jones 1997). Η ποσότητα και η ομοιομορφία και ίσως και το φάσμα του φωτός υπάρχουν ενδείξεις πως επηρεάζουν το αίσθημα σιγουριάς και ασφάλειας των ανθρώπων (Boyce, Eklund, Hamilton & Bruno 2000, Knight 2009). Ο φωτισμός των δρόμων, ωστόσο, δεν επηρεάζει μόνο την ψυχολογία των περαστικών. Πολλά επιστημονικά άρθρα και έρευνες στηρίζουν την άποψη ότι συμβάλλει έμπρακτα στην μείωση της εγκληματικότητας, όπως το άρθρο του K. Pease το 1999 και η μετα-ανάλυση των D.P. Farrington και B.C. Welsh το 2008 [24], [25]

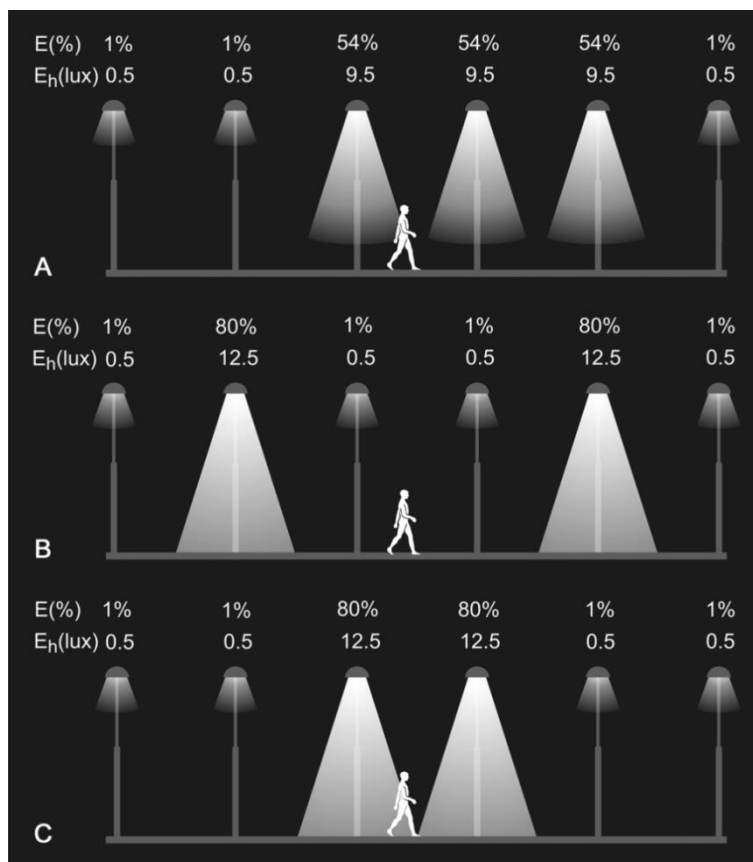
Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι ο φωτισμός αποτελεί εχέγγυο της ασφάλειας των δρόμων. Από την άλλη πλευρά, έχει βλαβερές συνέπειες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, ενώ είναι επιτακτική η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της μείωσης των ενεργειακών πόρων και για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Επομένως, υπάρχει μια ξεκάθαρη και επείγουσα ανάγκη να αναθεωρήσουμε τον τρόπο που φωτίζουμε τους δρόμους την νύχτα. Οι τεχνολογίες φωτισμού που βασίζονται στις Φωτο-εκπέμπουσες Διόδους (LEDs) είναι πολλά υποσχόμενες στην κατεύθυνση αυτή. Η απόδοση τους αυξάνεται σταθερά με τα χρόνια, ενώ επίσης προσφέρουν μεγαλύτερο έλεγχο όσον αφορά το φωτιστικό αποτέλεσμα. Επίσης, η τεχνολογία των LED παρέχει νέες δυνατότητες ρύθμισης της φωτεινότητας (dimming) σε χρονικές περιόδους με μειωμένη κίνηση ή και προσαρμογής της φωτεινότητας ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Σε συνδυασμό με την κατάλληλη τεχνολογία αισθητήρων που θα είναι ικανή να αναγνωρίζει τον αριθμό, το είδος και την τοποθεσία των διερχόμενων χρηστών του δρόμου, η τεχνολογία των LED προσφέρει επίσης την δυνατότητα εφαρμογής έξυπνων κατ' απαίτηση σεναρίων φωτισμού. Αυτού του είδους ο δυναμικός έξυπνος φωτισμός που προσαρμόζεται στις ανάγκες των χρηστών του δρόμου μπορεί να παρέχει φως όπου και όποτε χρειάζεται περισσότερο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να μειωθούν οι ενεργειακές δαπάνες και η φωτορύπανση χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργικότητα.

Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικές οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν αναφορικά με το πως μπορεί να εφαρμοστεί ο δυναμικός προσαρμοστικός φωτισμός. Πότε και πού, για παράδειγμα, επωφελούνται περισσότερο οι χρήστες του δρόμου από τον οδοφωτισμό; Είναι προτιμότερο να φωτίζεται το άμεσο περιβάλλον τους ή το τμήμα του δρόμου που προηγείται; Θέματα όπως αυτά αποτελούν μεγάλη πρόκληση για τον προσαρμοστικό φωτισμό.

Την απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα όσον αφορά τους πεζούς συγκεκριμένα επιχείρησαν να δώσουν οι Haans και de Kort διεξάγοντας δύο πειράματα σε δρόμο της Πανεπιστημιούπολης του Eindhoven. Στο πρώτο οι συμμετέχοντες στέκονταν σε κάποιο σημείο του δρόμου. Στο δεύτερο περπάτησαν κατά μήκος του δρόμου. Και στα δύο πειράματα δοκιμάστηκαν 3 διαφορετικά σενάρια dimming. Στο δεύτερο πείραμα, όπου οι συμμετέχοντες κινούνταν ο φωτισμός προσαρμοζόταν με βάση την θέση τους. Το συμπέρασμα που προέκυψε και από τα δύο ήταν το ίδιο. Η αντιληπτή προσωπική ασφάλεια των συμμετεχόντων ήταν μεγαλύτερη όταν φως έπεφτε στο άμεσο περιβάλλον τους, παρά στον δρόμο μπροστά τους [23].



Εικόνα 4.3: Πείραμα πρώτο - Το σενάριο C κρίθηκε καταλληλότερο με κριτήριο το αίσθημα ασφάλειας



Εικόνα 4.4: Πείραμα δεύτερο – Το σενάριο C κρίθηκε καταλληλότερο με κριτήριο το αίσθημα της ασφάλειας

Βέβαια, η συγκεκριμένη μελέτη μας δίνει μια εικόνα για το πώς επηρεάζει ο φωτισμός το αίσθημα ασφάλειας των πεζών. Αυτό δεν αρκεί για να κρίνει κανείς το κατάλληλο σενάριο dimming. Θα πρέπει να διεξαχθεί επιπλέον έρευνα για να καθοριστεί με ποιο τρόπο επηρεάζει η κατανομή του φωτός και άλλους χρήστες του δρόμου, όπως είναι τα οχήματα, καθώς και άλλες λειτουργίες όπως είναι ο προσανατολισμός.

Κεφάλαιο 5: Πρότυπα Οδοφωτισμού

5.1 Το ευρωπαϊκό πρότυπο για τον οδοφωτισμό

Στις ευρωπαϊκές χώρες το πρότυπο για τον οδοφωτισμό είναι το EN 13201, το οποίο συντάχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Προτυποποίησης CEN (Comité Européen de Normalisation). Το EN 13201 αποτελείται από τέσσερα μέρη και ένα πέμπτο προσχέδιο, το οποίο δεν έχει οριστικοποιηθεί ακόμη. Τα έγγραφα αυτά καθορίζουν αναλυτικά τις κλάσεις φωτισμού των δρόμων, τις απαιτήσεις κάθε κλάσης, την μέθοδο υπολογισμού των φωτομετρικών μεγεθών που επηρεάζουν την ποιότητα του φωτισμού.

Το πρώτο μέρος είναι Τεχνική Έκθεση και αποτελεί οδηγία, δηλαδή δεν έχει υποχρεωτική εφαρμογή. Το EN 13201-1 εκδόθηκε αρχικά το 2004, μαζί με τα υπόλοιπα 3 μέρη. Ορίζει τα διάφορα είδη κλάσεων φωτισμού και προτείνει την διαδικασία επιλογής τους με βάση τα χαρακτηριστικά του δρόμου. Με την ανάπτυξη και την όλο και μεγαλύτερη ενσωμάτωση των συστημάτων δυναμικής διαχείρισης οδοφωτισμού στα χρόνια που ακολούθησαν, κρίθηκε αναγκαία η αναθεώρηση του, καθώς δεν καθόριζε σαφώς μια τεχνική εφαρμογής του προσαρμοστικού φωτισμού. Έτσι, τον Δεκέμβριο του 2014 εκδόθηκε από την επιτροπή CEN το νέο EN 13201-1, ενώ εκκρεμεί και η έκδοση του αναθεωρημένου δεύτερου μέρους.

Στο EN 13201-1/2014 οι κλάσεις καθώς και η διαδικασία επιλογής τους έχουν αλλάξει. Βασίζονται στην Τεχνική Έκθεση 115 της CIE που εκδόθηκε το 2010. Ωστόσο, τα όρια των απαιτήσεων του EN 13201-2/2004 που είναι σε ισχύ αντιστοιχούν στις προηγούμενες κλάσεις. Επομένως, μέχρι την έκδοση του αναθεωρημένου EN 13201-2 υπάρχει, δυστυχώς, ένα θέμα ασυμβατότητας μεταξύ των δύο μερών.

Παρακάτω, αναλύονται το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 13201 και η Τεχνική Έκθεση CIE 115:2010. Για το πρώτο μέρος του Προτύπου περιγράφεται η πρώτη (2004) και η δεύτερη έκδοση (2014) για λόγους πληρότητας.

5.1.1 CEN/TR 13201-1/2004: Οδοφωτισμός, Μέρος 1^ο : Επιλογή κλάσεων φωτισμού

Το συγκεκριμένο έγγραφο περιέχει μια σειρά από οδηγίες για την βήμα προς βήμα επιλογή της κατάλληλης κλάσης φωτισμού ενός δρόμου. Για να γίνει αυτό, αρχικά πρέπει να επιλεγθεί η αντίστοιχη κατάσταση φωτισμού. Η κατάσταση φωτισμού εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Ταχύτητα κύριου χρήστη του δρόμου

- Τύπος κύριου χρήστη του δρόμου, επιπλέον επιτρεπόμενος/οι χρήστης/ες, αποκλειόμενος τύπος χρήστη

Γενικά, χρήστες ενός δρόμου μπορεί να είναι μηχανοκίνητα οχήματα, οχήματα βραδείας κίνησης, ποδηλάτες και πεζοί. Η επιλογή της κατάστασης φωτισμού γίνεται με την βοήθεια του Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Ομαδοποίηση καταστάσεων φωτισμού

Τυπική ταχύτητα κύριου χρήστη km/h	Χρήστες δρόμου στην ίδια σχετική περιοχή			Ομάδες καταστάσεων φωτισμού
	Κύριος χρήστης	Άλλοι επιτρεπόμενοι χρήστες	Αποκλειόμενος χρήστης	
>60	Μηχανοκίνητα οχήματα		Οχήματα βραδείας κίνησης Ποδηλάτες Πεζοί	A1
		Οχήματα βραδείας κίνησης	Ποδηλάτες Πεζοί	A2
		Οχήματα βραδείας κίνησης Ποδηλάτες Πεζοί		A3
>30 και ≤60	Μηχανοκίνητα οχήματα Οχήματα βραδείας κίνησης	Ποδηλάτες Πεζοί		B1
	Μηχανοκίνητα οχήματα Οχήματα βραδείας κίνησης Ποδηλάτες	Πεζοί		B2
	Ποδηλάτες	Πεζοί	Μηχανοκίνητα οχήματα Οχήματα βραδείας κίνησης	C1
>5 και ≤30	Μηχανοκίνητα οχήματα Πεζοί		Οχήματα βραδείας κίνησης Ποδηλάτες	D1
		Οχήματα βραδείας κίνησης Ποδηλάτες		D2
	Μηχανοκίνητα οχήματα Οχήματα βραδείας κίνησης			D3
Ταχύτητα βάρδισης	Ποδηλάτες Πεζοί			D4
	Πεζοί		Μηχανοκίνητα οχήματα Οχήματα βραδείας κίνησης Ποδηλάτες	E1
		Μηχανοκίνητα οχήματα Οχήματα βραδείας κίνησης Ποδηλάτες		

Στη συνέχεια ακολουθεί η επιλογή της κλάσης ή κατηγορίας φωτισμού του δρόμου. Η κλάση φωτισμού του δρόμου καθορίζεται από τα εξής:

- Καιρικές συνθήκες
- Ύπαρξη διαζώματος
- Απόσταση μεταξύ ανισόπεδων κόμβων και διασταυρώσεων
- Κυκλοφοριακή ροή οχημάτων/ημέρα
- Ύπαρξη περιοχής εμπλοκής (conflict zone). Περιοχή εμπλοκής θεωρείται μια περιοχή όπου διασταυρώνονται κυκλοφοριακά ρεύματα
- Πολυπλοκότητα οπτικού πεδίου. Αφορά την ύπαρξη στοιχείων στο οπτικό πεδίο του χρήστη του δρόμου που είναι δυνατόν να τον αποπροσανατολίσουν και να του αποσπάσουν την προσοχή με αποτέλεσμα να μην διακρίνει εγκαίρως φωτεινούς σηματοδότες, πινακίδες ή την αλλαγή κατεύθυνσης άλλων χρηστών. Αυτά τα αντικείμενα μπορεί να είναι διαφημίσεις, φωτεινές στήλες, φωτισμένα κτίρια κ.α.
- Δυσκολίες στην οδήγηση. Έχει να κάνει με τον βαθμό της απαιτούμενης προσπάθειας από τον χρήστη του δρόμου να επιλέξει πορεία και λωρίδα και για να διατηρήσει ή να αλλάξει ταχύτητα και θέση στον αυτοκινητόδρομο.
- Φωτεινότητα του περιβάλλοντος

Σε κάθε κατάσταση φωτισμού αντιστοιχούν δύο πίνακες με την βοήθεια των οποίων γίνεται η επιλογή της κατάλληλης κλάσης. Ενδεικτικά για την κατάσταση φωτισμού A1 ακολουθούν οι Πίνακες 5.2 και 5.3.

Πίνακας 5.2: Προτεινόμενο εύρος κλάσεων φωτισμού

Κύριες καιρικές συνθήκες	Διάζωμα	Τύπος συμβολής		Κυκλοφοριακή ροή οχημάτων ανά ημέρα								
		Ανισόπεδοι κόμβοι	Διασταυρώσεις	<15.000			15.000 έως 25.000			>25.000		
				←	0	→	←	0	→	←	0	→
Ξηρός	Ναι	>3	πυκνότητα διασταυρώσεις/km	ME5	ME4a	ME3a	ME4a	ME3a	ME2	ME4a	ME3a	ME2
		≤3		ME4a	ME3a	ME2	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1
			<3	ME5	ME4a	ME3a	ME5	ME4a	ME3a	ME4a	ME3a	ME2
			≥3	ME4a	ME4a	ME3a	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1
	Όχι	>3		ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1	ME3a	ME2	ME1
		≤3		ME3a	ME2	ME1	ME3a	ME2	ME1	ME2	ME2	ME1
			<3	ME4a	ME4a	ME3a	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1
			≥3	ME4a	ME3a	ME2	ME3a	ME2	ME1	ME2	ME2	ME1
Υγρός			Η επιλογή όπως και παραπάνω, αλλά με κλάσεις MEW									

Πίνακας 5.3: Προτεινόμενη επιλογή από το διαθέσιμο εύρος

Περιοχή Σύγκρουσης	Πολυπλοκότητα οπτικού πεδίου	Δυσκολία πλοήγησης	Φωτεινότητα περιβάλλοντος χώρου		
			Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή
Όχι	Φυσιολογική	Φυσιολογική	←	←	0
		Υψηλότερη από το φυσιολογικό	0	0	→
	Υψηλή	Φυσιολογική	←	0	0
		Υψηλότερη από το φυσιολογικό	0	→	→
Ναι			→		

Για τις υπόλοιπες καταστάσεις φωτισμού, υπάρχουν αντίστοιχοι πίνακες. Όλοι οι πίνακες παραπέμπουν σε κατηγορίες φωτισμού με απαιτήσεις είτε για την λαμπρότητα είτε για την οριζόντια ένταση φωτισμού.

Εκτός από την επιλογή της κατάλληλης κλάσης φωτισμού ενός δρόμου, το πρώτο μέρος του 13201 παρέχει σαφείς οδηγίες για την επιλογή της σχετικής περιοχής στην οποία θα εφαρμοστούν οι απαιτήσεις της κλάσης. Επιπλέον, περιλαμβάνει συστάσεις για τον έλεγχο της θάμβωσης, τις παραμέτρους που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του κατάλληλου Δείκτη Χρωματικής Απόδοσης και τους περιορισμούς που ισχύουν στην περίπτωση παρακείμενων περιοχών διαφορετικής κλάσης.

Η συγκεκριμένη οδηγία κάνει μια σύντομη αναφορά στον προσαρμοστικό φωτισμό. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι οι τιμές κάποιων παραμέτρων, όπως είναι η κυκλοφοριακή ροή και η φωτεινότητα του περιβάλλοντος χώρου, που καθορίζουν την κατηγορία φωτισμού μπορεί να μεταβάλλονται σε διαφορετικές περιόδους κατά την διάρκεια της νύχτας, αλλά και σε διαφορετικές εποχές του χρόνου. Επομένως, και οι αντίστοιχες απαιτήσεις σε αυτές τις περιόδους μπορεί να μεταβάλλονται. Η εφαρμογή των πινάκων του EN 13201-1 μπορεί να υποδείξει διαφορετικές κλάσεις φωτισμού με χαμηλότερες απαιτήσεις κατάλληλες για τις διαφορετικές αυτές περιόδους. Για τον σκοπό αυτό όμως, απαιτούνται δεδομένα για την μεταβολή της κυκλοφοριακής ροής περισσότερο λεπτομερή από την μέση ημερήσια κυκλοφοριακή ροή [26]. Πιο συγκεκριμένα, εξαιρετικά χρήσιμη θα ήταν η γνώση της ωριαίας διακύμανσης του κυκλοφοριακού φόρτου της οδού. Για παράδειγμα, στο Δουβλίνο, σε μια εγκατάσταση προσαρμοστικού φωτισμού σε αυτοκινητόδρομο για τον καθορισμό του προτεινόμενου σεναρίου dimming οι μηχανικοί του Δήμου έλαβαν υπόψη στοιχεία που είχαν για την ωριαία διακύμανση της κυκλοφοριακής ροής κατά την διάρκεια μιας κοινής εβδομάδας, αλλά και σε ειδικές περιόδους, όπως για παράδειγμα την θερινή περίοδο που τα σχολεία και τα κολέγια της πόλης είναι κλειστά.

Πέρα από αυτήν την σύντομη αναφορά, το πρότυπο δεν επεκτείνεται περαιτέρω στον τρόπο εφαρμογής του προσαρμοστικού φωτισμού. Δεν διευκρινίζεται αν για τις διαφορετικές χρονικές περιόδους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αιχμή στην

κυκλοφοριακή ροή ή μια μέση τιμή για αυτό το διάστημα. Επιπλέον, εκτός από την λαμπρότητα και την ένταση φωτισμού, κάθε κλάση διαθέτει και άλλα κριτήρια ποιότητας. Από αυτά το μόνο που μεταβάλλεται με την μεταβολή της φωτεινής ροής είναι το κατώφλι προσαύξησης (TI). Συγκεκριμένα, ο δείκτης TI αυξάνεται με την μείωση της φωτεινής ροής. Ωστόσο, δεν γίνεται σαφές αν το επιτρεπόμενο όριο για κάθε χρονική περίοδο θα είναι αυτό της κλάσης φωτισμού που έχει ο δρόμος χωρίς την εφαρμογή προσαρμοστικού φωτισμού ή αυτό της κάθε κλάσης που επιλέγεται για κάθε χρονική περίοδο. Επίσης, δεν γίνεται καμία αναφορά στις καιρικές συνθήκες, όπως η ομίχλη και το χιόνι, δηλαδή στο πως αυτές επηρεάζουν το φωτιστικό αποτέλεσμα και αν συνίσταται να γίνεται ρύθμιση της φωτεινής ροής σε τέτοιες συνθήκες.

Η αναθεώρηση, λοιπόν, του Προτύπου ήταν απαραίτητη για την καθιέρωση μιας τεχνικής για την εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού και την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων.

5.1.2 EN 13201-2/2003: Οδοφωτισμός, Μέρος 2^ο : Απαιτήσεις επίδοσης

Μια κλάση φωτισμού καθορίζεται από ένα σύνολο φωτομετρικών απαιτήσεων που στόχο έχουν να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών διάφορων τύπων δρόμου. Το δεύτερο μέρος του προτύπου προσδιορίζει αυτές τις απαιτήσεις, ενώ αναφέρεται και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του οδοφωτισμού.

Έτσι, οι κλάσεις **ME/MEW** προορίζονται για οδηγούς μηχανοκίνητων οχημάτων σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους ή ακόμα και σε δρόμους κατοικημένων περιοχών όπου επιτρέπονται μεσαίες και υψηλές ταχύτητες. Ενδεικτικά, οι απαιτήσεις των κλάσεων ME παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4 οι απαιτήσεις γίνονται όλο και λιγότερο αυστηρές από την κλάση ME1 μέχρι την ME6. Το ίδιο ισχύει και για τις υπόλοιπες κλάσεις.

Πίνακας 5.4: Απαιτήσεις κλάσεων ME

Κλάση	Λαμπρότητα στην επιφάνεια του δρόμου για στεγνό οδόστρωμα			Θάμβωση ανικανότητας	Περιβάλλον φωτισμός
	\bar{L} (cd/m ²) [minimum]	U_o [minimum]	U_l [minimum]	TI (%) [maximum]	SR [minimum]
ME1	2,0	0,4	0,7	10	0,5
ME2	1,5	0,4	0,7	10	0,5
ME3a	1,0	0,4	0,7	15	0,5
ME3b	1,0	0,4	0,6	15	0,5
ME3c	1,0	0,4	0,5	15	0,5
ME4a	0,75	0,4	0,6	15	0,5
ME4b	0,75	0,4	0,5	15	0,5
ME5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
ME6	0,3	0,35	0,4	15	Καμία απαίτηση

Οι κλάσεις **CE** αφορούν οδηγούς μηχανοκίνητων οχημάτων σε περιοχές εμπλοκής (conflict zones), όπως εμπορικούς δρόμους, διασταυρώσεις, κυκλικές

διασταυρώσεις, περιοχές αναμονής, αλλά και δρόμους με μεγάλη πυκνότητα πεζών, όπου μπορεί να προκληθούν ατυχήματα.

Οι **κλάσεις S και A** αφορούν πεζούς και ποδηλάτες σε πεζόδρομους, ποδηλατοδρόμους, δρόμους κατοικημένων περιοχών κ.α. Προορίζονται, όμως και για τις Λωρίδες Έκτακτης Ανάγκης των αυτοκινητόδρομων και για χώρους στάθμευσης.

Οι **κλάσεις ES** αποτελούν πρόσθετη ομάδα κλάσεων φωτισμού που προορίζεται για δρόμους όπου ο δημόσιος φωτισμός πρέπει να είναι κατάλληλος για την αναγνώριση προσώπων και αντικειμένων σε περιοχές με μεγάλη εγκληματικότητα.

Οι **κλάσεις EV** είναι πρόσθετες κατηγορίες που προορίζονται για τις περιπτώσεις όπου κάθετες επιφάνειες πρέπει να είναι ορατές. Εφαρμόζονται σε οδικές περιοχές όπως οι σταθμοί διοδίων κτλ.

Οι απαιτήσεις των κλάσεων φωτισμού αντικατοπτρίζουν τον τύπο του δρόμου ή των χρηστών του. Έτσι, οι κλάσεις ME διαβαθμίζονται με βάση την λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου (L_{av}), την συνολική και την διαμήκη ομοιομορφία (U_o , U_l αντίστοιχα), το κατώφλι προσαύξησης (TI) και τον δείκτη λαμπρότητας περιβάλλοντος χώρου (SR), ενώ οι κλάσεις CE βάσει της έντασης φωτισμού και της ομοιομορφίας. Οι κατηγορίες S, A, ES και EV απεικονίζουν τις διαφορετικές προτεραιότητες στον οδικό φωτισμό, αφού τα κριτήρια για έναν δρόμο S κλάσης είναι η μέση και η ελάχιστη οριζόντια ένταση φωτισμού, για ένα δρόμο A κλάσης η μέση ημισφαιρική ένταση φωτισμού και η ομοιομορφία, για την ES κλάση η ελάχιστη ημικυλινδρική ένταση φωτισμού και, τέλος, για την EV κλάση η ελάχιστη κάθετη ένταση φωτισμού.

Εκτός από την προσδιορισμό των απαιτήσεων των κλάσεων φωτισμού, το πρότυπο έχει και περιβαλλοντική διάσταση. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται μέτρα για τον έλεγχο της θάμβωσης ανικανότητας και του διαφεύγοντος φωτισμού με τον ορισμό των κλάσεων φωτεινής έντασης G.1 έως G.6., καθώς και τον έλεγχο της θάμβωσης ενόχλησης με τις κλάσεις D.0 έως D.6. Με βάση τις κλάσεις αυτές κατηγοριοποιούνται τα φωτιστικά ως προς τον έλεγχο της θάμβωσης.

Πίνακας 5.5 Κλάσεις φωτεινής έντασης για τον έλεγχο της θάμβωσης

Κλάση	Μέγιστη φωτεινή ένταση σε cd/klm			Άλλες απαιτήσεις
	στις 70°*	στις 80°*	στις 90°*	
G1		200	50	Καμία
G2		150	30	Καμία
G3		100	20	Καμία
G4	500	100	10	Μηδενική φωτεινή ένταση πάνω από τις 95°
G5	350	100	10	Μηδενική φωτεινή ένταση πάνω από τις 95°
G6	350	100	0	Μηδενική φωτεινή ένταση πάνω από τις 90°
Κάθε κατεύθυνση υπό την συγκεκριμένη γωνία με το κατακόρυφο διάνυσμα				

Οι κλάσεις φωτεινής έντασης G1, G2 και G3 αντιστοιχούν σε «semi cut-off» και «cut-off» φωτιστικά, ενώ οι G4, G5 και G6 αντιστοιχούν σε «full cut-off».

Οι αντίστοιχες κλάσεις για την θάμβωση ενόχλησης προκύπτουν με κριτήριο τον δείκτη θάμβωσης ενόχλησης. Ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής: $I \cdot A \cdot 0.5$ σε [cd/m], όπου I είναι η μέγιστη τιμή της φωτεινής έντασης σε cd από κάθε κατεύθυνση που σχηματίζει γωνία 85° από την προς το κάθετο διάνυσμα στον δρόμο και A είναι η εξωτερική επιφάνεια όλων των φωτεινών μερών του φωτιστικού σε επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση του I [27].

Πίνακας 5.6: Κλάσεις θάμβωσης ενόχλησης

Κλάση	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Δείκτης θάμβωσης ενόχλησης [maximum]	-	7000	5500	4000	2000	1000	500

5.1.3 EN 13201-3/2004: Οδοφωτισμός, Μέρος 3^ο : Υπολογισμός επίδοσης

Το τρίτο μέρος ορίζει και περιγράφει τις παραδοχές και τις μαθηματικές διαδικασίες που πρέπει να υιοθετηθούν στον υπολογισμό των φωτομετρικών απαιτήσεων που περιγράφονται στο 13201-2. Με τον σαφή ορισμό των μεθόδων υπολογισμού των φωτομετρικών μεγεθών εξασφαλίζεται, αφενός η ποιότητα σε μια εγκατάσταση οδοφωτισμού και αφετέρου η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ακόμα και όταν αυτά προέρχονται από διαφορετικές πηγές [28].

5.1.4 EN 13201-4/2004: Οδοφωτισμός, Μέρος 4^ο : Μέθοδοι μέτρησης επίδοσης φωτισμού εγκαταστάσεων

Το τέταρτο μέρος του προτύπου διευκρινίζει τις συμβάσεις και τις διαδικασίες όσον αφορά την μέτρηση των επιδόσεων μιας εγκατάστασης φωτισμού. Επιπλέον, παρέχει οδηγίες και συμβουλές για την επιλογή των κατάλληλων οργάνων μέτρησης της λαμπρότητας και της έντασης φωτισμού. Οι συμβάσεις για τις θέσεις των παρατηρητών και των σημείων μέτρησης είναι αυτές που ορίζονται στο τρίτο μέρος. Τέλος, περιγράφονται οι συνθήκες που μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβή αποτελέσματα, καθώς και οι δυνατές προφυλάξεις που μπορούν να τις ελαχιστοποιήσουν [29].

5.1.5 EN 13201-5/2007 (προσχέδιο): Οδοφωτισμός, Μέρος 5^ο : Απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης

Το πέμπτο μέρος του ευρωπαϊκού προτύπου για τον οδοφωτισμό είναι υπό διαμόρφωση. Μέχρι στιγμής έχει εκδοθεί ένα προσχέδιό του. Το μέρος αυτό έχει ως αντικείμενο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των εγκαταστάσεων φωτισμού

για την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν στο συνέδριο του Κιότο για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Έτσι, ενώ τα προηγούμενα μέρη διευκρινίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις σε λαμπρότητα ή ένταση φωτισμού για κάθε κλάση, το πέμπτο προσδιορίζει την μέγιστη επιτρεπτή κατανάλωση για την επίτευξη των απαιτήσεων αυτών. Αυτό γίνεται με την βοήθεια ενός μεγέθους που ονομάζεται SLEEC (Street Lighting Energy Efficiency Criteria-Κριτήρια Ενεργειακής Απόδοσης Οδοφωτισμού) και εκφράζεται σε $W/cd \cdot m^{-2}/m^2$ (στην περίπτωση των ME/MEW κλάσεων) ή σε $W/lx/m^2$ (στις υπόλοιπες κλάσεις) [30].

5.2 Τεχνική Έκθεση CIE 115-2010 : Συστάσεις για το φωτισμό δρόμων για κυκλοφοριακή ροή οχημάτων και πεζών

Η Τεχνική Έκθεση της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού CIE 115-2010 είναι η αναθεώρηση της ομώνυμης έκθεσης του 1995. Στα χρόνια που μεσολάβησαν από τότε μέχρι την ανανέωση της, το θέμα της μείωσης της κατανάλωσης ισχύος γινόταν όλο και πιο σημαντικό στα πλαίσια της αυξανόμενης ευαισθητοποίησης της κοινωνίας για το περιβάλλον. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν σημαντικές αλλαγές στην τεχνολογία φωτισμού, όπως η βελτίωση της απόδοσης και η δυνατότητα ηλεκτρονικού ελέγχου των φωτιστικών, που κατέστησαν δυνατή την εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού στον οδοφωτισμό και μάλιστα σε λογικό κόστος. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένα δομημένο μοντέλο για την επιλογή της κλάσης φωτισμού ενός δρόμου, η οποία πρέπει να εξασφαλίζει ένα ελάχιστο επίπεδο λαμπρότητας ή έντασης φωτισμού.

Για την επιλογή λαμβάνονται υπόψη διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την κυκλοφορία των χρηστών του δρόμου. Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους είναι σταθερές, ενώ άλλες είναι χρονικά εξαρτώμενες, όπως η κυκλοφοριακή ροή, οι καιρικές συνθήκες, η σύνθεση των χρηστών του δρόμου και η λαμπρότητα του περιβάλλοντος χώρου. Μέχρι το 2010 για την αποτίμηση των χρονικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων λαμβανόταν υπόψη μια μέση τιμή. Το μοντέλο της CIE αναπτύχθηκε για να διευκολύνει την εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού δίνοντας την δυνατότητα να επιλέγονται για τον ίδιο δρόμο διαφορετικές κλάσεις φωτισμού για διαφορετικές περιόδους κατά την διάρκεια της νύχτας.

Η τεχνική έκθεση αυτή, όπως φανερώνει και ο τίτλος, έχει χαρακτήρα συμβουλευτικό και όχι υποχρεωτικό. Στόχος είναι οι συστάσεις αυτές να μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στις ιδιαίτερες συνθήκες και ανάγκες κάθε χώρας, ώστε να αποτελέσουν ένα πλαίσιο αναφοράς στην σύνταξη εθνικών προτύπων και οδηγιών.

5.2.1 Είδη και επιλογή κλάσεων φωτισμού

Οι κλάσεις φωτισμού που προτείνονται χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο των χρηστών του δρόμου και την χρήση τους. Έτσι, οι κλάσεις M προορίζονται για δρόμους όπου ο κύριος χρήστης είναι τα μηχανοκίνητα οχήματα και οι επιτρεπόμενες ταχύτητες είναι μεσαίες ή υψηλές, οι κλάσεις C προορίζονται για τον φωτισμό περιοχών εμπλοκής και, τέλος, οι κλάσεις P προορίζονται για δρόμους με χαμηλές ταχύτητες και αυξημένη κυκλοφορία πεζών. Ενδεικτικά, περιγράφεται η επιλογή της κατάλληλης κλάσης M.

Οι κλάσεις M1 έως M6 καθορίζονται από μια σειρά παραμέτρων, η κάθε μια από τις οποίες παίρνει μια σταθμισμένη τιμή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Παράμετροι για την επιλογή κλάσεων φωτισμού M

Παράμετρος	Επιλογές	Σταθμισμένη Τιμή V_w	Επιλεχθείσα V_w
Ταχύτητα	Πολύ υψηλή	1	
	Υψηλή	0,5	
	Μέτρια	0	
Κυκλοφοριακή ροή	Πολύ υψηλή	1	
	Υψηλή	0,5	
	Μέτρια	0	
	Χαμηλή	-0,5	
	Πολύ χαμηλή	-1	
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Μικτή με υψηλό ποσοστό μη μηχανοκίνητων	2	
	Μικτή	1	
	Μόνο μηχανοκίνητα	0	
Ύπαρξη διαζώματος	Όχι	1	
	Ναι	0	
Πυκνότητα διασταυρώσεων	Υψηλή	1	
	Μέτρια	0	
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα	0,5	
	Μη παρόντα	0	
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Υψηλή	1	
	Μέτρια	0	
	Χαμηλή	-1	
Σήμανση καθοδήγησης/Έλεγχος κυκλοφορίας	Κακή	0,5	
	Μέτρια ή Καλή	0	
		Σύνολο σταθμευμένων τιμών	V_{ws}

Οι τιμές αυτές στην συνέχεια αθροίζονται (V_{ws}). Τέλος, ο αριθμός της κλάσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\text{Αριθμός κλάσης φωτισμού} = 6 - V_{ws}$$

Σε περίπτωση που το αποτέλεσμα δεν είναι ακέραιος αριθμός επιλέγεται ο μικρότερος ακέραιος αριθμός.

Όσον αφορά την κυκλοφορική ροή, λαμβάνεται υπόψη η ώρα αιχμής και όχι η Μέση Ημερήσια Κυκλοφοριακή ροή.

Τα κριτήρια ελέγχου ποιότητας του οδοφωτισμού είναι για την περίπτωση των Μ κλάσεων η μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος (L_{av}), η συνολική (U_o) και η διαμήκης ομοιομορφία (U_l), το κατώφλι προσαύξησης (f_{T1}) και ο δείκτης λαμπρότητας περιβάλλοντος χώρου (R_s).

Πίνακας 5.8: Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού Μ

Κλάση Φωτισμού	Επιφάνεια του δρόμου				Κατώφλι προσαύξησης	Δείκτης λαμπρότητας περιβάλλοντος χώρου
	Ξηρή			Υγρή		
	L_{av} (cd/m^2)	U_o	U_l	U_o	f_{T1} (%)	R_s
M1	2,0	0,40	0,70	0,15	10	0,5
M2	1,5	0,40	0,70	0,15	10	0,5
M3	1,0	0,40	0,60	0,15	15	0,5
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,5
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,5
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,5

Αντίστοιχη είναι και η διαδικασία επιλογής για τις κλάσεις Ρ. Τα κριτήρια ποιότητας του φωτισμού είναι η μέση και η ελάχιστη οριζόντια ένταση φωτισμού ($E_{h,av}$ και $E_{h,min}$), η ελάχιστη κάθετη ένταση φωτισμού ($E_{v,min}$) και η ελάχιστη ημικυλινδρική ένταση φωτισμού ($E_{sc,min}$).

Για τις κλάσεις C η επιλογή είναι κάπως πιο σύνθετη. Στην περίπτωση που οι δρόμοι που οδηγούν στην περιοχή σύγκρουσης είναι κλάσης Μ το προτεινόμενο κριτήριο ποιότητας είναι η λαμπρότητα και η κλάση της περιοχής σύγκρουσης επιλέγεται να είναι ένα επίπεδο πάνω από την πιο απαιτητική των κλάσεων των δρόμων που οδηγούν στην περιοχή εμπλοκής. Αν δηλαδή, διασταυρώνονται ένας δρόμος κλάσης Μ3 και ένας κλάσης Μ4, τότε η διασταύρωση (περιοχή εμπλοκής) προτείνεται να είναι κλάσης Μ2.

Σε κάποιες περιπτώσεις που η απόσταση θέασης είναι μικρή ή άλλοι παράγοντες εμποδίζουν την χρήση της λαμπρότητας ως κριτηρίου ποιότητας, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ένταση φωτισμού για ένα μέρος ή και για ολόκληρη την περιοχή σύγκρουσης. Για τον λόγο αυτό οι οδηγίες της CIE περιλαμβάνουν έναν πίνακα αντιστοίχισης των κλάσεων Μ και C για διαφορετικούς συντελεστές q_o οδοστρώματος.

Πίνακας 5.9: Αντιστοιχία κλάσεων φωτισμού Μ και C για διάφορους τύπους οδοστρώματος

Κλάση φωτισμού Μ			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Μέση λαμπρότητα L σε $cd \cdot m^{-2}$			2,0	1,5	1,0	0,75	0,50	0,30
Κλάση φωτισμού C για $q_o=0,05cd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$			C0	C1	C2	C3	C4	C5
Μέση ένταση φωτισμού E σε lx			50	30	20	15	10	7,5
Κλάση φωτισμού C για $q_o=0,07cd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$		C0	C1	C2	C3	C4	C5	
Μέση ένταση φωτισμού E σε lx		50	30	20	15	10	7,5	
Κλάση φωτισμού C για $q_o=0,09cd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$	C0	C1	C2	C3	C4	C5		
Μέση ένταση φωτισμού E σε lx	50	30	20	15	10	7,5		

Σε κάθε άλλη περίπτωση επιλέγεται η κατάλληλη κλάση C με την αποτίμηση των παραμέτρων με βάση τον αντίστοιχο πίνακα αποτίμησης, τον υπολογισμό του V_{ws} και την σχέση:

$$\text{Αριθμός κλάσης φωτισμού} = 6 - V_{ws}$$

Όταν το αποτέλεσμα δεν είναι ακέραιος αριθμός επιλέγεται ο μικρότερος ακέραιος αριθμός.

5.2.2 Παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον οδοφωτισμό

Οι καιρικές συνθήκες είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την οδήγηση και συνεπώς τον οδοφωτισμό. Το υγρό οδόστρωμα, για παράδειγμα, έχει ως συνέπεια πιθανή αύξηση της μέσης λαμπρότητας και την μείωση της ομοιομορφίας. Σε πολλές περιπτώσεις αυξάνεται η θάμβωση εξαιτίας του νερού που συσσωρεύεται σε κάποια σημεία και δημιουργεί επιφάνειες που ανακλούν το φως αντί να το διαχέουν. Στην τεχνική έκθεση τονίζεται ότι η πιθανότητα αύξησης της μέσης λαμπρότητας στο υγρό οδόστρωμα δεν συνιστά επαρκή λόγο για την ρύθμιση της φωτεινότητας των φωτιστικών.

Όταν το οδόστρωμα είναι καλυμμένο από χιόνι, το επίπεδο της λαμπρότητας είναι πιο υψηλό από ότι συνήθως. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι έως 4 με 5 φορές πιο υψηλό, ανάλογα με την κατάσταση του χιονιού και την σταθερά q_0 που χαρακτηρίζει την φύση της επιφάνειας του δρόμου. Αυτή η αύξηση της λαμπρότητας δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την ομοιομορφία και συνίσταται η ρύθμιση του επιπέδου της φωτεινής ροής της εγκατάστασης.

Τέλος, η ομίχλη θολώνει το οπτικό πεδίο σε βαθμό που εξαρτάται από την πυκνότητα της. Η οδήγηση δυσχεραίνεται σημαντικά, ειδικά σε αυτοκινητόδρομους όπου κυριαρχούν υψηλές ταχύτητες. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ποιοτικός φωτισμός είναι πολύ σημαντικός για την αντίληψη του άμεσου περιβάλλοντος.

Πέρα από τις καιρικές συνθήκες, η ηλικία των χρηστών του δρόμου έχει μεγάλη σημασία, αφού επηρεάζει την όραση. Για τον λόγο αυτό προτείνεται σε περιοχές με μεγάλο ποσοστό ηλικιωμένων, όπως είναι οι περιοχές γύρω από νοσοκομεία και οίκους ευγηρίας, να επιλέγεται μια κλάση φωτισμού πάνω από το φυσιολογικό.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει και επηρεάζεται από τον οδοφωτισμό είναι η ασφάλεια των χρηστών του δρόμου, είτε αυτή έχει να κάνει με την πρόληψη ατυχημάτων είτε με την πρόληψη της εγκληματικότητας. Ο παράγοντας αυτός, που έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, τονίζεται σε αυτό το έγγραφο [31].

5.2.3 Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου του CIE 115-2010 για προσαρμοστικό φωτισμό

Στα παραρτήματα της Τεχνικής Έκθεσης παρατίθενται πολύ σημαντικές πληροφορίες. Αρχικά, παρουσιάζεται ένας παράδειγμα αξιολόγησης επένδυσης μιας εγκατάστασης φωτισμού. Έπειτα, αναλύεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η επίδραση του χιονιού στο αποτέλεσμα του φωτισμού. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σχέση υπολογισμού του κατωφλίου προσαύξησης και γίνεται λόγος για τον έλεγχο της θάμβωσης σε πεζόδρομους και δρόμους χαμηλών ταχυτήτων. Τέλος, δίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής προσαρμοστικού φωτισμού με βάση το προτεινόμενο μοντέλο κλάσεων φωτισμού.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, θεωρείται ένας αυτοκινητόδρομος ταχείας κυκλοφορίας όπου μεταβάλλεται μόνο η κυκλοφοριακή ροή κατά την διάρκεια της νύχτας. Θεωρούνται τέσσερις χρονικές περιόδους (Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 και Δt_4), από την στιγμή που ανάβουν τα φωτιστικά μέχρι την ώρα της βραδινής αιχμής, από την βραδινή αιχμή μέχρι τα μεσάνυχτα, από τα μεσάνυχτα μέχρι την πρωινή ώρα αιχμής και από την πρωινή ώρα αιχμής μέχρι το σβήσιμο. Τα χαρακτηριστικά του αυτοκινητόδρομου και η αποτίμηση των παραμέτρων γίνεται στον Πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10: Αποτίμηση παραμέτρων με βάση το CIE 115-2010

Παράμετρος	Επιλογές	Σταθμισμένη Τιμή V_w	Επιλεχθείσα V_w			
			Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
Ταχύτητα	Πολύ υψηλή	1	1	1	1	1
	Υψηλή	0,5				
	Μέτρια	0				
Κυκλοφοριακή ροή	Πολύ υψηλή	1	1			1
	Υψηλή	0,5				
	Μέτρια	0		0		
	Χαμηλή	-0,5				
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Πολύ χαμηλή	-1			-1	
	Μικτή με υψηλό ποσοστό μη μηχανοκίνητων	2				
	Μικτή	1				
	Μόνο μηχανοκίνητα	0	0	0	0	0
Υπαρξη διαζώματος	Όχι	1				
	Ναι	0	0	0	0	0
Πυκνότητα διασταυρώσεων	Υψηλή	1				
	Μέτρια	0	0	0	0	0
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα	0,5				
	Μη παρόντα	0	0	0	0	0
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Υψηλή	1				
	Μέτρια	0	0	0	0	0
	Χαμηλή	-1				
Σήμανση καθοδήγησης/ Έλεγχος κυκλοφορίας	Κακή	0,5				
	Μέτρια ή Καλή	0	0	0	0	0
		Σύνολο σταθμευμένων τιμών	2	1	0	2
		Κλάση φωτισμού	M4	M5	M6	M4

Η κλάση M4 ονομάζεται κανονική κλάση του δρόμου, καθώς είναι η κλάση που έχει ο δρόμος την περίοδο αιχμής του, δηλαδή αυτή που θα είχε κανονικά ο δρόμος χωρίς την εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού. Από τα κριτήρια ποιότητας των κλάσεων, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, το κατώφλι TI αυξάνεται με την μείωση της φωτεινής ροής. Στην τεχνική έκθεση αναφέρεται ότι τα όρια για τα υπόλοιπα κριτήρια ποιότητας θα πρέπει να είναι αυτά της κανονική κλάσης του δρόμου [31].

Πίνακας 5.11: Κλάσεις φωτισμού δρόμου ανά χρονική περίοδο

Χρονική Περίοδος	Κλάση	Απαιτήσεις κλάσης				
		L_{av} (cd/m ²)	U_o	U_i	f_{T1} (%)	R_s
Δt_1	M4	0,75	0,40	0,60	15	0,5
Δt_2	M5	0,50	0,35	0,40	15	0,5
Δt_3	M6	0,30	0,35	0,40	20	0,5
Δt_4	M4	0,75	0,40	0,60	15	0,5

5.3 Το αναθεωρημένο CEN/TR 13201-1/2014

Το EN 13201-1 του 2014 έχει βασιστεί στην Τεχνική Έκθεση 115-2010 της CIE. Προτείνεται η κατηγοριοποίηση των δρόμων με βάση το σύστημα κλάσεων M, C, P. Οι M κλάσεις προορίζονται για αυτοκινητόδρομους, οι C κλάσεις για περιοχές εμπλοκής και οι P για πεζόδρομους και δρόμους χαμηλών ταχυτήτων. Για την επιλογή κλάσης προτείνονται δύο εναλλακτικές μέθοδοι.

Η πρώτη είναι σχεδόν όμοια με την προτεινόμενη από την CIE. Οι παράμετροι είναι οι ίδιες και η αποτίμησή τους γίνεται με την βοήθεια ενός παρόμοιου Πίνακα. Ενδεικτικά, ο Πίνακας 5.12 αντιστοιχεί στις κλάσεις M. Υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση στις επιλογές για την κάθε παράμετρο και στην σταθμισμένη τιμή V_w . Για την τελική επιλογή οι επιλεχθείσες τιμές V_w αθροίζονται και η κλάση προκύπτει από την αφαίρεση:

$$M = 6 - V_{ws}$$

,όπου V_{ws} το άθροισμα των τιμών V_w . Σε περίπτωση που $V_{ws} < 0$ τότε θεωρείται για τον υπολογισμό ότι $V_{ws} = 0$. Σε περίπτωση που το αποτέλεσμα της αφαίρεσης είναι μικρότερο ή ίσο του μηδενός τότε κλάση του δρόμου θεωρείται η M1.

Αναφορικά με την παράμετρο της κυκλοφοριακής ροής, υπολογίζεται η αιχμή της και όχι η μέση τιμή της κατά την υπό εξέταση χρονική περίοδο, όπως ακριβώς ισχύει και στην έκθεση CIE 115-2010. Επίσης, συνιστάται να λαμβάνονται υπόψη στοιχεία για την διακύμανση της ροής κυκλοφορίας κατά την διάρκεια της νύχτας όπου αυτό είναι δυνατόν, όπου δηλαδή υπάρχουν εγκατεστημένα συστήματα επίβλεψης της κίνησης. Σε αντίθετη περίπτωση, γίνεται μια εκτίμηση των στοιχείων αυτών.

Πίνακας 5.12: Παράμετροι για την επιλογή κλάσεων φωτισμού M

Παράμετρος	Επιλογές	Περιγραφή		Σταθμισμένη Τιμή V_w
Όριο Ταχύτητας	Πολύ υψηλή	$v \geq 100$ km/h		2
	Υψηλή	$70 < v < 100$ km/h		1
	Μέτρια	$40 < v \leq 70$ km/h		-1
	Χαμηλή	$v \leq 40$ km/h		-2
Κυκλοφοριακή ροή		Αυτοκινητόδρομοι, δρόμοι πολλών λωρίδων	Δρόμοι δύο λωρίδων	
	Υψηλή	>65% της μέγιστης χωρητικότητας	>45% της μέγιστης χωρητικότητας	1
	Μέτρια	35%-65% της μέγιστης χωρητικότητας	15%-45% της μέγιστης χωρητικότητας	0
	Χαμηλή	<35% της μέγιστης χωρητικότητας	<15% της μέγιστης χωρητικότητας	-1
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Μικτή με υψηλό ποσοστό μη μηχανοκίνητων			2
	Μικτή			1
	Μόνο μηχανοκίνητα			0
Ύπαρξη διαζώματος	Όχι			1
	Ναι			0
Πυκνότητα διασταυρώσεων		Διασταυρώσεις/km	A/K, απόσταση μεταξύ γεφυρών, km	
	Υψηλή	>3	<3	1
	Μέτρια	≤ 3	≥ 3	0
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα			1
	Μη παρόντα			0
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Υψηλή	Βιτρίνες καταστημάτων, αθλητικές εγκαταστάσεις, σταθμοί MMM, φωτιζόμενες διαφημιστικές πινακίδες		1
	Μέτρια	Συνήθης κατάσταση		0
	Χαμηλή			-1
Δυσκολία πλοήγησης	Πολύ Δύσκολη			2
	Δύσκολη			1
	Εύκολη			0

Όταν κατά την διάρκεια της νύχτας οι τιμές ορισμένων παραμέτρων μεταβάλλονται, ορίζονται χρονικές περίοδοι και υπολογίζεται η κλάση M για κάθε χρονική περίοδο. Τα όρια για τα υπόλοιπα κριτήρια ποιότητας θα πρέπει να είναι αυτά της κανονικής κλάσης του δρόμου καθ' όλη την διάρκεια της νύχτας.

Με τον ίδιο τρόπο επιλέγονται και οι C και P κλάσεις. Για τις C κλάσεις υπάρχει η ίδια αντιστοιχία με τις M κλάσεις που περιγράφεται στην έκθεση της CIE.

Τα όρια των κλάσεων M, C, P δεν διευκρινίζονται σαφώς στο πρώτο μέρος του Προτύπου. Αναφέρεται ότι διαδικασία επιλογής των κλάσεων έγινε με βάση το CIE 115-2010 αλλά δεν γίνεται παραπομπή σε αυτό για τα όρια. Επιπλέον, το δεύτερο μέρος του Προτύπου δεν έχει αναθεωρηθεί ακόμα και περιλαμβάνει τα όρια των προηγούμενων κλάσεων. Γενικά, θα μπορούσαμε να αντιστοιχήσουμε τις M κλάσεις στις ME, τις C στις CE και τις P στις S. Οι κλάσεις A, ES και EV δεν υπάρχουν.

Η εναλλακτική μέθοδος, που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β του προτύπου και στην συνέχεια της παρούσας ενότητας, είναι εντελώς διαφορετική και δίνει την δυνατότητα το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο της μέσης λαμπρότητας να επιλέγεται μέσα από ένα εύρος τιμών. Η επιλογή της κλάσης γίνεται με την βοήθεια ενός πίνακα και ενός γραφήματος.

Μέσω του πίνακα γίνεται η επιλογή των συντελεστών πέντε βασικών παραμέτρων του δρόμου:

- a) Τύπος δρόμου και όριο ταχύτητας
- b) Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής
- c) Κυκλοφοριακή ροή
- d) Φωτεινότητα περιβάλλοντος
- e) Δυσκολία εγχειρήματος οδήγησης

Στην συνέχεια, υπολογίζεται ένας συνολικός συντελεστής που ισούται με το γινόμενο των πέντε συντελεστών. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι οι τρεις πρώτες παράμετροι είναι εξαρτημένες και πάντα επηρεάζουν τον τελικό συντελεστή. Οι δύο τελευταίες είναι ανεξάρτητες. Μπορεί να επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, οπότε η τιμή του συντελεστή τους είναι 1.25 ή μπορεί να μην έχουν καμία επιρροή, οπότε η τιμή του συντελεστή τους είναι 1. Επιπλέον, για τις δύο τελευταίες παραμέτρους χρησιμοποιούνται δύο σύμβολα, τα οποία δηλώνουν αν το θεωρούμενο σενάριο είναι πιθανό (●) ή όχι (–) να συμβεί. Για παράδειγμα, σε ένα αυτοκινητόδρομο ταχείας κυκλοφορίας είναι εξίσου πιθανό να είναι είτε εύκολη είτε απαιτητική η οδήγηση. Ο μελετητής πρέπει να γνωρίζει ποιο σενάριο από τα δύο ισχύει για τον συγκεκριμένο δρόμο και να επιλέξει τον κατάλληλο συντελεστή. Ωστόσο, δεν είναι πιθανό το σενάριο να είναι υψηλή η φωτεινότητα του περιβάλλοντος, αφού αυτού του είδους οι αυτοκινητόδρομοι δεν διέρχονται από κατοικημένες περιοχές.

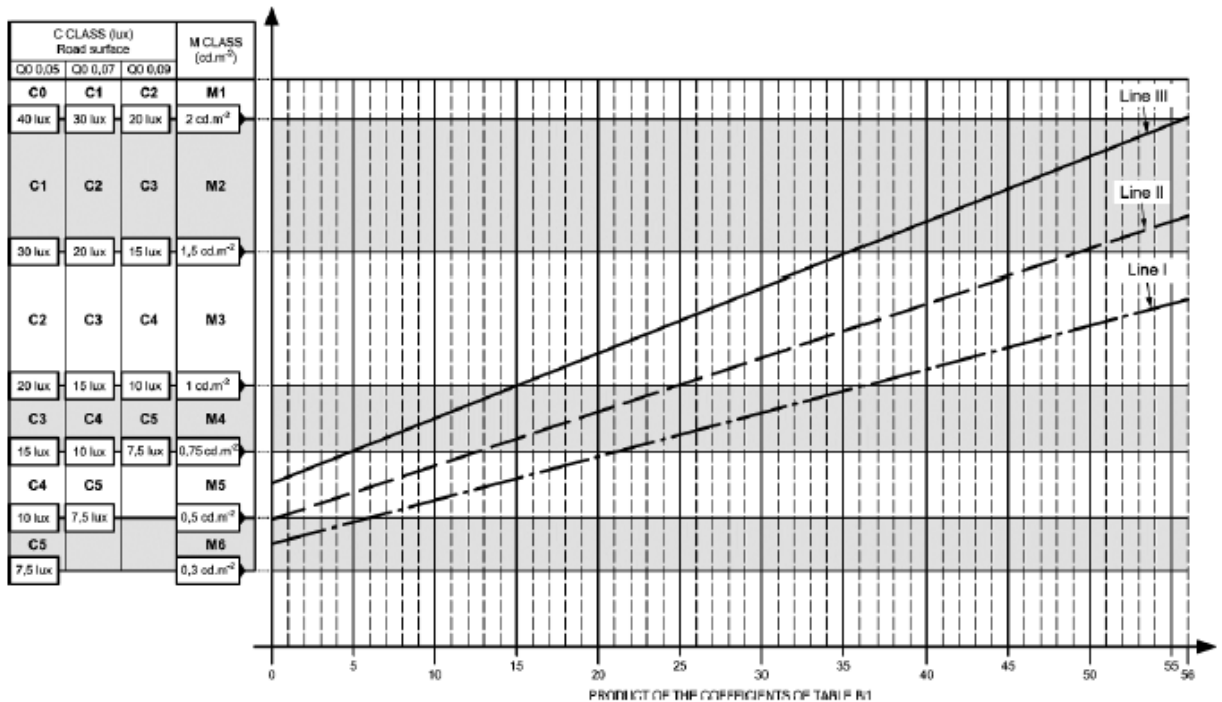
Αφού γίνει η επιλογή των συντελεστών υπολογίζεται ο τελικός συντελεστής. Το αποτέλεσμα περιέχεται σε μία από τις τρεις στήλες με τίτλο: Line I (Γραμμή I), Line II (Γραμμή II), Line III (Γραμμή III).

Τέλος, χρησιμοποιώντας τον τελικό συντελεστή και την Γραμμή υπολογίζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα το ελάχιστο επιτρεπτό όριο μέσης Λαμπρότητας μέσα από ένα εύρος τιμών για κάθε κλάση. Ωστόσο, το όριο ορίζεται προσεγγιστικά καθώς η οριζόντια στήλη του γραφήματος που αντιστοιχεί στο όριο της μέσης λαμπρότητας δεν είναι βαθμονομημένη.

Ο Πίνακας 5.13 και το γράφημα 5.1 αντιστοιχούν στις κλάσεις M και C [32].

Πίνακας 5.13: Εναλλακτική μέθοδος επιλογής για τις κλάσεις Μ και C [32]

Roads or streets designation	CARRIAGEWAY & SPEED LIMIT				TRAFFIC							A	B	C	Overall coefficient								
	Carriageway		Speed	Coefficients carriageway speed	Composition				Volume						Ambient luminosity	Mental task load	Ambient luminosity	Mental task load	A x B or A x C	A x B x C			
	single	separated	km/h		Coefficients				Coefficients						Coefficients		Coefficients		Line I *	High	High	Line II *	Line II *
					1	2	3	4	3	2	1				1	1	1,25	1,25					
					Not motorized	Motorized only	Mixed traffic	Mixed mainly not motorized	High	Medium	Low				Low to moderate		Line I *	High					
Interurban motorway		X	≤ 130	5		2			3			●	●	30	—	●	38						
										2							20			25			
											1						10			12			
Urban motorway Expressway		X	≤ 110	5		2			3			—	—		●	●	38	47					
										2									25	31			
											1								12	16			
Interurban main road	X		≤ 90	5			3		3			●	●	45	—	●	56						
										2							30		38				
											1						15		19				
Main crossing road	X		≤ 70	4			3		3			—	—		●	●	45	56					
										2								30	37				
											1							15	19				
Main urban road Boulevard - Avenue	X		≤ 50	3			3		3			—	—		●	●	34	42					
										2								23	28				
											1							11	14				
Secondary urban road Avenue - Street	X		≤ 50	3			3			2		●	●	18	●	—	22						
																	9		11				
											1												
Urban service road	X		≤ 50	2			3			2		●	●	12	●	—	15						
																	6		8				
											1												
Urban road Dangerous intersections Village crossing	X		≤ 50	3			3		3			●	●	27	●	●	34	42					
										2							18		23	28			
											1						9		11	14			
Urban road in dangerous section	X		≤ 30	1			4		3			●	●	12	●	●	15	18					
										2							8		10	12			
											1						4		5	7			



Εικόνα 5.1: Γράφημα εναλλακτικής επιλογής για τις κλάσεις M και C
Πηγή: EN 13201-1/2014 [32]

5.4 Συγκριτικό παράδειγμα εφαρμογής προσαρμοστικού φωτισμού πριν και μετά την αναθεώρηση του EN 13201-1

Η εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού διευκολύνθηκε σημαντικά με την αναθεώρηση του EN 13201-1. Αυτό μπορεί να γίνει φανερό με ένα ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής dimming βάσει του προτύπου οδοφωτισμού πριν και μετά την αναθεώρησή του.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η Λεωφόρος Αλεξάνδρας στην Αθήνα. Πρόκειται για έναν αστικό δρόμο που χωρίζεται από διάζωμα και υπάρχουν τρεις λωρίδες κυκλοφορίας σε κάθε κατεύθυνση. Το όριο ταχύτητας είναι 50 km/h, καθώς πρόκειται για δρόμο εντός κατοικημένης περιοχής.

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρήθηκαν τέσσερις χρονικές περίοδοι (Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 και Δt_4): α) από την στιγμή που ανάβουν τα φωτιστικά μέχρι τις 23:00 (το τέλος της βραδινής αιχμής, β) από την βραδινή αιχμή μέχρι τα μεσάνυχτα, γ) από τα μεσάνυχτα μέχρι τις 05:00 (την πρωινή ώρα αιχμής) και δ) από την πρωινή ώρα αιχμής μέχρι το σβήσιμο.

5.4.1 Εφαρμογή προσαρμοστικού φωτισμού βάσει του CEN/TR 13201-1/2004

Αρχικά επιλέγεται η κατάλληλη κατάσταση φωτισμού για τον δρόμο.

Πίνακας 5.14: Παράμετροι για την επιλογή κατάστασης φωτισμού

Τυπική ταχύτητα κύριου χρήστη	>30 και ≤60 km/h	
Τύπος χρήστη	Κύριος χρήστης	Μηχανοκίνητα οχήματα Οχήματα βραδείας κίνησης
	Άλλοι επιτρεπόμενοι χρήστες	Ποδηλάτες Πεζοί

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά οδηγούν σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 σε κατάσταση φωτισμού B1.

Οι δύο πίνακες με την βοήθεια των οποίων γίνεται η επιλογή της κατάλληλης κλάσης φωτισμού για κατάσταση φωτισμού B1 είναι οι εξής:

Πίνακας 5.15: Προτεινόμενο εύρος κλάσεων φωτισμού (κατάσταση φωτισμού B1)

Κύριες καιρικές συνθήκες	Μέτρα για την μείωση της ταχύτητας	Πυκνότητα διασταυρώσεων Διασταυρώσεις/km	Δυσκολία στην πλοήγηση	Κυκλοφοριακή ροή οχημάτων ανά ημέρα					
				<7.000			≥7.000		
				←	0	→	←	0	→
Ξηρός	Όχι	<3	Φυσιολογική	ME6	ME5	ME4b	ME5	ME4b	ME3c
			Υψηλότερη από το φυσιολογικό	ME5	ME4b	ME3c	ME5	ME4b	ME3c
		≥3	Φυσιολογική	ME5	ME4b	ME3c	ME4b	ME4b	ME3c
			Υψηλότερη από το φυσιολογικό	ME4b	ME3c	ME2	ME3c	ME3c	ME2
	Ναι	Η επιλογή όπως και παραπάνω, αλλά επιλέξτε μια κλάση χαμηλότερη στην περιοχή εφαρμογής των μέτρων για την μείωση της ταχύτητας.							
Υγρός		Η επιλογή όπως και παραπάνω, αλλά με κλάσεις MEW							

Πίνακας 5.16: Προτεινόμενη επιλογή από το διαθέσιμο εύρος (κατάσταση φωτισμού B1)

Περιοχή Σύγκρουσης	Πολυπλοκότητα οπτικού πεδίου	Σταθμευμένα οχήματα	Φωτεινότητα περιβάλλοντος χώρου					
			Χαμηλή		Μέτρια		Υψηλή	
			Κυκλοφοριακή ροή ποδηλατών		Κυκλοφοριακή ροή ποδηλατών		Κυκλοφοριακή ροή ποδηλατών	
			Φυσιολογική	Υψηλή	Φυσιολογική	Υψηλή	Φυσιολογική	Υψηλή
Όχι	Φυσιολογική	Μη παρόντα	←	0	←	0	0	0
		Παρόντα	0	→	0	→	→	→
	Υψηλή	Μη παρόντα	0	0	0	0	0	0
		Παρόντα	0	0	→	→	→	→
Ναι		→						

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της λεωφόρου Αλεξάνδρας περιγράφονται στον Πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17: Αποτίμηση παραμέτρων για την λεωφόρο Αλεξάνδρας

	Δt ₁	Δt ₂	Δt ₃	Δt ₄
Καιρικές συνθήκες	Ξηρός καιρός			
Μέτρα για την μείωση της ταχύτητας	Όχι			

Πυκνότητα διασταυρώσεων	≥3 /km			
Δυσκολία στην πλοήγηση	Φυσιολογική			
Περιοχή εμπλοκής	Όχι			
Πολυπλοκότητα οπτικού πεδίου	Όχι			
Σταθμευμένα οχήματα	Μη παρόντα			
Κυκλοφοριακή ροή ποδηλατών	Φυσιολογική			
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Κυκλοφοριακή ροή	?	?	?	?

Η διαδικασία προσδιορισμού της κυκλοφοριακής ροής κάθε χρονικής περιόδου δεν είναι σαφώς ορισμένη στο EN 13201-1 του 2004. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.1.1 και όπως παρατηρείται στον Πίνακα 5.15 η κυκλοφοριακή ροή των οχημάτων είναι εκφρασμένη σε οχήματα ανά ημέρα. Ωστόσο, στην συγκεκριμένη εφαρμογή μας ενδιαφέρει η κυκλοφοριακή ροή σε διαστήματα μερικών ωρών. Θα ήταν πιο βολική η χρήση της ωριαίας διακύμανσης του κυκλοφοριακού φόρτου αντί της μέσης ημερήσιας κυκλοφοριακής ροής.

Στο σημείο αυτό θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν δύο παραδοχές:

- i) 7.000 οχήματα ανά ημέρα ανάγονται σε 292 οχήματα/ώρα κατά μέσο όρο.
- ii) Για κάθε ένα από τέσσερα χρονικά διαστήματα είναι δυνατόν να εκτιμηθεί:
 - Η μέση ωριαία κυκλοφοριακή ροή
 - Η ωριαία κυκλοφοριακή ροή κατά την ώρα αιχμής για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο

Επιλέγεται το πιο δυσμενές σενάριο, δηλαδή το δεύτερο.

Επομένως, η κυκλοφοριακή ροή και η κλάση που προκύπτει για κάθε μία από τις τέσσερις χρονικές περιόδους είναι:

Πίνακας 5.18: Κυκλοφοριακή ροή και κλάση λεωφόρου Αλεξάνδρας ανά χρονική περίοδο

	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
Κυκλοφοριακή ροή	Υψηλή (≥292 οχ./h)	Μέτρια(≥292 οχ./h)	Χαμηλή(<292 οχ./h)	Μέτρια(≥292 οχ./h)
Κλάση	ME4b	ME4b	ME5	ME4b

Τα όρια των κλάσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.19 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.19: Κλάσεις φωτισμού δρόμου ανά χρονική περίοδο

Χρονική Περίοδος	Κλάση	Απαιτήσεις κλάσης				
		L_{av} (cd/m ²)	U_o	U_i	f_{T1} (%)	R_s
Δt_1	ME4b	0,75	0,40	0,50	15	0,5
Δt_2	ME4b	0,75	0,40	0,50	15	0,5
Δt_3	ME5	0,50	0,35	0,40	15	0,5
Δt_4	ME4b	0,75	0,40	0,50	15	0,5

Το παραπάνω παράδειγμα αποδεικνύει ότι το EN 13201-1 πριν την αναθεώρησή του δεν διευκόλυε τον προσαρμοστικό φωτισμό. Το γεγονός ότι ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθούν κάποιες παραδοχές κατέστησε το πρότυπο ελλιπές. Επιπλέον, δεν άφηνε πολλά περιθώρια μεταβολής της κλάσης φωτισμού ενός δρόμου.

5.4.2 Εφαρμογή προσαρμοστικού φωτισμού βάσει του CEN/TR 13201-1/2014

Η αποτίμηση των παραμέτρων για την εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού σύμφωνα με το EN 13201-1 που εκδόθηκε το 2014, φαίνεται στον πίνακα 5.20.

Πίνακας 5.20: Παράμετροι για την επιλογή κλάσεων φωτισμού M για την λεωφόρο Αλεξάνδρας

Παράμετρος	Επιλογές	Σταθμισμένη Τιμή V_w	Επιλεχθείσα Τιμή V_w			
			Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
Όριο Ταχύτητας	Πολύ υψηλή	2				
	Υψηλή	1				
	Μέτρια	-1	-1	-1	-1	-1
	Χαμηλή	-2				
Κυκλοφοριακή ροή	Υψηλή	1	1			
	Μέτρια	0		0		0
	Χαμηλή	-1			-1	
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Μικτή με υψηλό ποσοστό μη μηχανοκίνητων	2				
	Μικτή	1	1	1	1	1
	Μόνο μηχανοκίνητα	0				
Υπαρξη διαζώματος	Όχι	1				
	Ναι	0	0	0	0	0
Πυκνότητα διασταυρώσεων	Υψηλή	1	1	1	1	1
	Μέτρια	0				
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα	1				
	Μη παρόντα	0	0	0	0	0
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Υψηλή	1	1			
	Μέτρια	0		0	0	0
	Χαμηλή	-1				
Δυσκολία πλοήγησης	Πολύ Δύσκολη	2				
	Δύσκολη	1				
	Εύκολη	0	0	0	0	0
Άθροισμα V_{ws}			3	1	0	1
Κλάση			M3	M5	M6	M5

Επομένως, σύμφωνα με το πρότυπο EN 13201-1 του 2014 οι κλάσεις και οι απαιτήσεις τους για κάθε χρονικό διάστημα είναι οι εξής:

Πίνακας 5.21: Κλάσεις φωτισμού δρόμου ανά χρονική περίοδο

Χρονική Περίοδος	Κλάση	Απαιτήσεις κλάσης				
		L_{av} (cd/m ²)	U_o	U_l	f_{T1} (%)	R_s
Δt_1	M3	1,00	0,40	0,60	15	0,5
Δt_2	M5	0,50	0,35	0,40	15	0,5
Δt_3	M6	0,30	0,35	0,40	20	0,5
Δt_4	M5	0,50	0,35	0,40	15	0,5

Παρατηρείται ότι το αναθεωρημένο πρότυπο είναι πολύ πιο εύχρηστο και παρέχει μεγάλο περιθώριο μεταβολής των κλάσεων και συνεπώς εξοικονόμησης ενέργειας, όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν.

5.5 Εφαρμογή του προτύπου για τον οδοφωτισμό στην Ελλάδα και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες

Στην Ελλάδα με την απόφαση Δ13/Β/οικ. 16522 (ΦΕΚ Β' 1792 3.12.2004) του Υπουργείου ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε ορίστηκε ότι «οι κανόνες, τα στοιχεία, τα μεγέθη και οι προδιαγραφές υλικών για την σύνταξη μελετών και την εκτέλεση έργων οδικού φωτισμού θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ ή μέχρι την έκδοσή τους, σύμφωνα με τα πρότυπα (EN), τις οδηγίες και τα κείμενα εναρμόνισης που εκδίδονται και ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και όπου δεν υπάρχουν με τα αναφερόμενα στις τελευταίες εκδόσεις της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού (CIE)» (παράγραφος 2).

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο έχει υιοθετηθεί ως ΕΛΟΤ EN 13201. Μέχρι στιγμής, βέβαια, δεν έχει εκδοθεί το νέο EN 13201-1 για την εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού από τον Ελληνικό Οργανισμό Προτυποποίησης. Αντίστοιχα, και άλλες Ευρωπαϊκές χώρες έχουν υιοθετήσει το EN 13201, όπως η Μεγάλη Βρετανία (BS EN 13201), η Ιταλία (UNI EN 13201) και η Ολλανδία (NEN EN 13201).

Πριν την επανέκδοση του 13201-1, αρκετές χώρες είχαν εκδώσει οδηγίες ή πρότυπα που ανέφεραν τον προσαρμοστικό φωτισμό ως μια ενδιαφέρουσα πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας, χωρίς πάντα να αποσαφηνίζουν τον τρόπο εφαρμογής του.

Για παράδειγμα, η Μεγάλη Βρετανία εξέδωσε, αρχικά το 2003 και ξανά το 2013 με κάποιες τροποποιήσεις και προσθήκες, το BS 5489-1, έναν Κώδικα Ορθής Πρακτικής για τον σχεδιασμό συστημάτων οδοφωτισμού. Σε αυτό το έγγραφο, στην ενότητα 4.4.4 αναφέρεται ότι σε περιοχές όπου η κυκλοφοριακή ροή και οι απαιτήσεις των χρηστών μπορεί να ποικίλλουν κατά την διάρκεια της νύχτας είναι δυνατή η μεταβολή των επιπέδων του φωτός. Το ποσοστό μεταβολής της φωτεινής ροής θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να πληρούνται κάθε φορά οι απαιτήσεις της κατάλληλης κλάσης φωτισμού που υποδεικνύουν οι επικρατούσες συνθήκες, όπως αυτές ορίζονται στο πρότυπο EN 13201-2 ή εναλλακτικά στο CIE 115-2010. Η μείωση του επιπέδου του φωτός μπορεί να πραγματοποιείται είτε με την αντίστοιχη μείωση της φωτεινότητας κάθε φωτιστικού ξεχωριστά, είτε με το σβήσιμο μεμονωμένων φωτιστικών, με την βασική προϋπόθεση να πληρούνται τα υπόλοιπα κριτήρια ποιότητας, όπως η ομοιομορφία. Επίσης, πριν την εφαρμογή οποιουδήποτε σεναρίου dimming το πρότυπο συνιστά να γίνεται μια εκτίμηση κινδύνου (risk assessment), δηλαδή να ληφθούν υπόψη και να αξιολογηθούν παράγοντες όπως [33]:

- η ωριαία διακύμανση κυκλοφοριακής ροής μιας συνηθισμένης ημέρας αλλά και σε ειδικές περιστάσεις.
- η παραμονή σταθμευμένων οχημάτων.
- ο δείκτης εγκληματικότητας της περιοχής.
- το ποσοστό ατυχημάτων.

Από την άλλη, η Ισπανία έχει προσαρμόσει το πρώτο μέρος του EN 13201 για την επιλογή κλάσης φωτισμού, το οποίο άλλωστε αποτελεί τεχνική οδηγία και δεν έχει υποχρεωτικό χαρακτήρα. Η διαδικασία επιλογής κλάσης καθορίζεται από το Βασιλικό Διάταγμα 1890/2008 με το οποίο εγκρίθηκε ο «Κανονισμός ενεργειακής απόδοσης σε εγκαταστάσεις φωτισμού εξωτερικών χώρων» και οι συμπληρωματικές τεχνικές οδηγίες αυτού EA-01 έως EA-07. Σύμφωνα με αυτό, τα επιτρεπόμενα όρια των κλάσεων είναι τα ίδια με το EN 13201-2, ενώ για το dimming αναφέρεται στην τεχνική οδηγία EA-02 ότι για την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση της φωτορύπανσης θα πρέπει να μειώνεται το επίπεδο της φωτεινής ροής για συγκεκριμένες ώρες κατά την διάρκεια της νύχτας σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού, εορταστικού φωτισμού, φωτεινής σήμανσης και διαφημιστικού φωτισμού, με την προϋπόθεση ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από 5kW και ότι δεν τίθεται θέμα ασφάλειας. Η μείωση αυτή δεν θα πρέπει να γίνεται αυθαίρετα, αλλά να καλύπτει τις απαιτήσεις της χαμηλότερης κλάσης που θα έχει οριστεί κατάλληλη για την δεδομένη αυτή περίοδο. Επίσης, πρέπει να διατηρούνται τα υπόλοιπα κριτήρια ποιότητας όπως καθορίζονται από την οδηγία EA-02 [34].

Κεφάλαιο 6: Τεχνολογίες Προσαρμοστικού Φωτισμού στον Οδοφωτισμό με Φωτιστικά Τεχνολογίας LED

6.1 Εισαγωγή

Ο προσαρμοστικός οδοφωτισμός εφαρμόζεται τόσο σε φωτιστικά τεχνολογίας LED, όσο και σε φωτιστικά με λαμπτήρες εκκενώσεως. Ωστόσο, ο φωτισμός στερεάς κατάστασης (Solid State Lighting-SSL) που περιλαμβάνει τα LED, τα OLED (Organic Light Emitting Diode) και τα PLED (Polymer Light Emitting Diode) είναι η πιο πρωτοποριακή τεχνολογία. Μερικά από τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα της είναι το μικρό μέγεθος, το μεγάλο εύρος διαθέσιμων επιλογών θερμοκρασίας χρώματος, οι πολλές επιλογές ελέγχου, όπως είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας χρώματος και της απόχρωσης και φυσικά η πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά φωτιστικά. Επίσης, έχουν άμεση απόκριση και δεν περιέχουν τοξικά χημικά και μέταλλα. Επιπλέον, τα φωτιστικά LED διατηρούν ή ακόμα και αυξάνουν την φωτεινή απόδοσή τους με την μείωση της φωτεινής ροής τους, σε αντίθεση με τα φωτιστικά λαμπτήρων επαγωγής [35]. Τέλος, δύο από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη φωτεινή απόδοση, η οποία φθάνει τα 130 lm/W και παρουσιάζει συνεχή βελτίωση και η μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού τα LED διατηρούν μέχρι και το 90% της φωτεινής ροής τους στις 100.000 ώρες [35]-[37].

Για όλους τους παραπάνω λόγους, στο κεφάλαιο αυτό δίνεται περισσότερη έμφαση στα φωτιστικά τεχνολογίας LED. Άλλωστε, κύριος στόχος του προσαρμοστικού φωτισμού είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, που είναι κύριο χαρακτηριστικό των φωτιστικών LED. Ωστόσο, η αρχιτεκτονική του δικτύου είναι παρόμοια και για τα φωτιστικά συμβατικής τεχνολογίας με ballast.

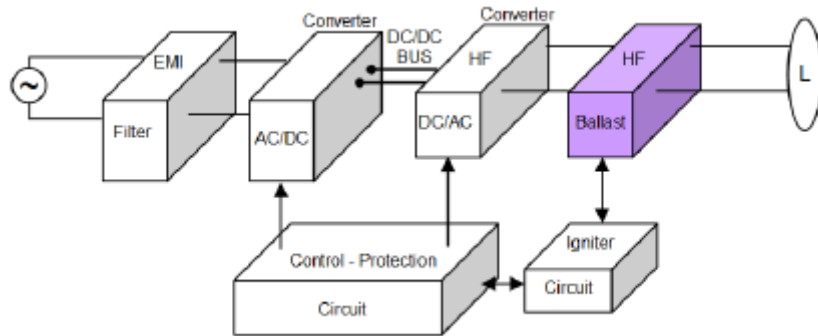
6.2 Φωτιστικά με λαμπτήρες εκκενώσεως

Οι λαμπτήρες εκκενώσεως περιέχουν στο εσωτερικό τους κάποιο στοιχείο, είτε αέριο είτε ατμούς μετάλλου είτε μίγμα αερίων και ατμών. Διακρίνονται σε λαμπτήρες χαμηλής και υψηλής πίεσης ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης που επικρατούν στο εσωτερικό τους [38], [39]. Στο στοιχείο που κυριαρχεί οφείλεται το όνομα του λαμπτήρα. Έτσι, στον εξωτερικό φωτισμό, έχουμε λαμπτήρες:

- Μεταλλικών Αλογονιδίων (Metal Halide-MH)
- Λαμπτήρες Ατμών Υδραργύρου (Mercury Vapor-MV)
- Ατμών Νατρίου Υψηλής Πίεσης (High Pressure Sodium-HPS)
- Ατμών Νατρίου Χαμηλής Πίεσης (Low) Pressure Sodium-LPS)

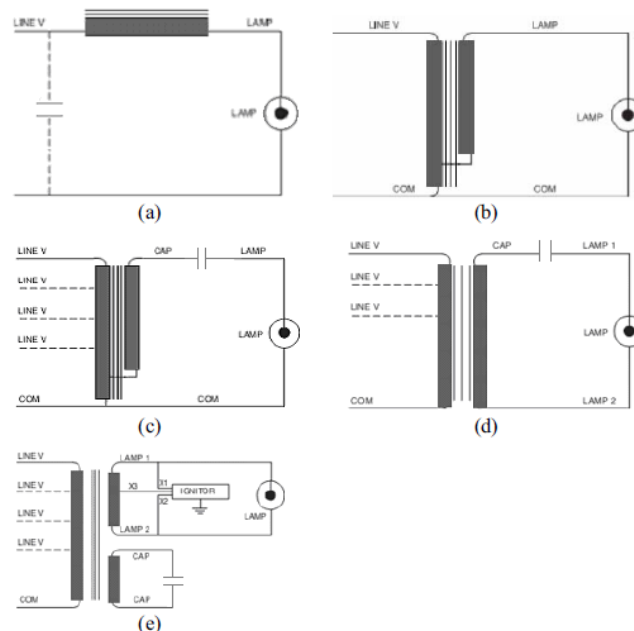
Από τους παραπάνω λαμπτήρες οι τρεις πρώτοι ανήκουν στην κατηγορία λαμπτήρων Εκκένωσης Υψηλής Έντασης (High Intensity Discharge-HID).

Το φως παράγεται από φαινόμενα ηλεκτρικής εκκένωσης, δηλαδή από τον ιονισμό και την διέγερση και αποδιέγερση των ατόμων του στοιχείου. Για την λειτουργία τους απαιτείται ένα όργανο έναυσης που ονομάζεται ballast ή στραγγαλιστικό πηνίο. Τα ballast διακρίνονται σε ηλεκτρομαγνητικά και ηλεκτρονικά. Τα ηλεκτρονικά είναι συνήθως ρυθμιζόμενα (dimmable) [38], [39].



Εικόνα 6.1: Σχηματικό διάγραμμα δομής ενός ηλεκτρονικού ballast
Πηγή: Energetic Aspects of the HID Ballast Used in the Outdoor Lighting [40]

Η έννοια του dimming όσον αφορά τα συμβατικά φωτιστικά έχει συνδεθεί με τα ηλεκτρονικά ballast. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια είναι δυνατόν να γίνει ρύθμιση της φωτεινής ροής και με τα ηλεκτρομαγνητικά ballast. Αυτή η λύση, αποτελεί ενδιαφέρουσα εναλλακτική σε περιπτώσεις που είναι ήδη εγκαταστημένα ενεργοβόρα φωτιστικά με λαμπτήρες εκκενώσεως και ηλεκτρομαγνητικά ballast και δεν υπάρχει επαρκές διαθέσιμο κεφάλαιο για την αντικατάστασή τους.



Εικόνα 6.2: Διάφοροι τύποι ηλεκτρομαγνητικών ballast-(a)Magnetic Reactor, (b) High Reactance Autotransformer, (c) Constant Wattage Autotransformer, (d) Constant Wattage Isolated, (e) Magnetic Regulator

Πηγή: Energetic Aspects of the HID Ballast Used in the Outdoor Lighting [40]

Επίσης, τα ηλεκτρομαγνητικά ballast έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα ηλεκτρονικά. Τα βασικότερα μειονεκτήματα τους ήταν για μεγάλο διάστημα η ανικανότητα ρύθμισης της φωτεινής ροής και οι μεγαλύτερες απώλειες. Το πρώτο έχει πλέον ξεπεραστεί. Επιπλέον, με την εμφάνιση των ηλεκτρομαγνητικών ballast Πολύ Χαμηλών Απωλειών (Very Low Loss Electromagnetic Ballasts) η κατανάλωση τους είναι πλέον συγκρίσιμη με τα ηλεκτρονικά. Στον Πίνακα 6.1 πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των ηλεκτρονικών και των μαγνητικών ballast [40]-[42].

Πίνακας 6.1: Συγκριτικός πίνακας συστημάτων dimming με ηλεκτρονικό και ηλεκτρομαγνητικό ballast

	Ηλεκτρονικό ballast με δυνατότητα dimming	Ηλεκτρομαγνητικό ballast με δυνατότητα dimming
Εγκατάσταση εξοπλισμού dimming	Σε κάθε φωτιστικό	Κεντρική εγκατάσταση στο πύλαρ
Κόστος κτήσης	Υψηλό	Χαμηλό
Δυνατότητα αυτόματης επαναφοράς σε λειτουργία (Σε περίπτωση διακοπής και επαναφοράς της τροφοδοσίας)	Όχι	Ναι
Αντοχή σε αντίξοες καιρικές συνθήκες (υψηλή υγρασία, μεγάλο εύρος θερμοκρασιών)	Χαμηλή	Υψηλή
Αντικεραυνική προστασία	Σχετικά χαμηλή	Υψηλή
Διάρκεια ζωής	<8 έτη συνήθως	>30 έτη
Ενεργειακή αποδοτικότητα	Συγκριτικά υψηλότερη	Συγκριτικά χαμηλότερη
Κατανάλωση	Χαμηλή	Υψηλή*
Κόστος συντήρησης	Σχετικά υψηλό	Χαμηλό
Φιλικότητα προς το περιβάλλον	Περιέχει τοξικές ουσίες	Ανακυκλώσιμο
Ανθεκτικότητα	Συγκριτικά χαμηλή	Υψηλή
Φαινόμενο Flicker	Δεν παρατηρείται	Μπορεί να παρατηρηθεί

* Με εξαίρεση τα Very Low Loss Electromagnetic Ballast των οποίων η κατανάλωση είναι ίδια ή λίγο υψηλότερη

Το ballast καταναλώνει ισχύ σε ποσοστό που φτάνει μέχρι και το 20% της ονομαστικής ισχύος του φωτιστικού. Η ισχύς του ballast θα πρέπει να συνυπολογίζεται στον υπολογισμό της ισχύος και της φωτεινής απόδοσης (lm/W) του φωτιστικού [38].

6.3 Φωτιστικά τεχνολογίας LED

Κάθε φωτιστικό αποτελείται από δύο μέρη, το οπτικό τμήμα και το τμήμα ηλεκτρικών μερών. Το οπτικό τμήμα των φωτιστικών LED αποτελείται κυρίως από τις φωτο-εκπέμπουσες διόδους (LED).

Μια δίοδος εκπομπής φωτός (LED) είναι μια ένωση pn που έχει κατασκευαστεί από έναν ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού διακένου, όπως για παράδειγμα το αρσενικούχο γάλλιο (Gallium Arsenide-GaAs). Η μια πλευρά του ημιαγωγικού υλικού είναι τύπου n, δηλαδή έχει περίσσεια αρνητικού φορτίου (ηλεκτρόνια) και η άλλη τύπου p, δηλαδή έχει περίσσεια θετικού φορτίου (οπές). Η επιφάνεια μεταξύ τους λέγεται διεπιφάνεια (junction). Όταν εφαρμόσουμε ορθή πόλωση στην διάταξη τα ηλεκτρόνια εγχέονται από την n-περιοχή στην p-περιοχή. Η τάση που εφαρμόζεται είναι συνήθως από 1-3 V και το ρεύμα που διαρρέει την δίοδο, το ρεύμα οδήγησης του LED, είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων mA. Η επανασύνδεση των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μπορεί να βρίσκεται στο ορατό φάσμα, στο υπεριώδες ή στο υπέρυθρο. Το χρώμα της εξαρτάται από το είδος του ημιαγωγικού υλικού [43].

Τα LED, ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, διακρίνονται στα PCB (Printed Circuit Board) LED, όπου συστοιχίες LED συνδέονται σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος, και στα COB (Chips On Board) LED. Στην τελευταία περίπτωση τα LED είναι πακτωμένα μεταξύ τους δίνοντας την εντύπωση ενός ενιαίου μεγαλύτερου LED.

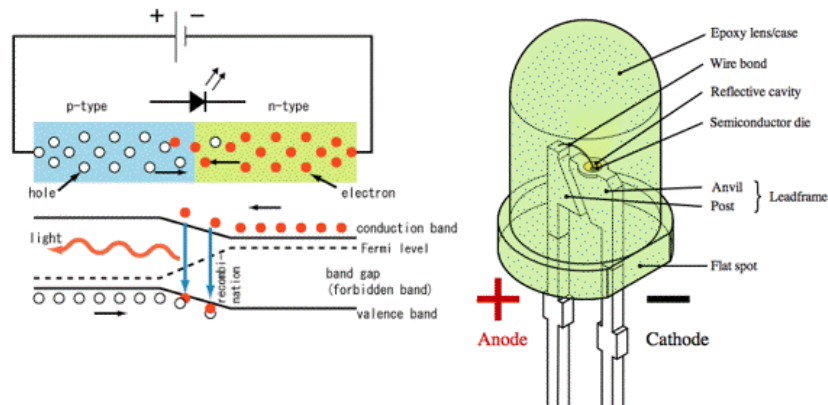


Εικόνα 6.3: LED σε PCB
Πηγή: www.schreder.com



Εικόνα 6.4: COB LED
Πηγή: en.sunpuled.com

Τα LED καλύπτονται από φακούς κατασκευασμένους από συνθετικό υλικό, συνήθως PMMA ή PC, εξαιρετικά ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία, και σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Ο φακός των LED έχει καθοριστική σημασία στο τελικό αποτέλεσμα, αφού από την σχεδίασή του εξαρτάται η κατανομή της φωτεινής έντασης του φωτιστικού. Για τον λόγο αυτό, η σχεδίαση φακών αποτελεί ολόκληρο κλάδο της μηχανικής (optical engineers) [44].



Εικόνα 6.5: Απεικόνιση LED και αρχή λειτουργίας του
 Πηγή: en.wikipedia.org

Το τμήμα των ηλεκτρικών μερών ενός φωτιστικού περιλαμβάνει τον εξοπλισμό για την έναυσή του. Το όργανο έναυσης για ένα φωτιστικό LED είναι το τροφοδοτικό (driver).

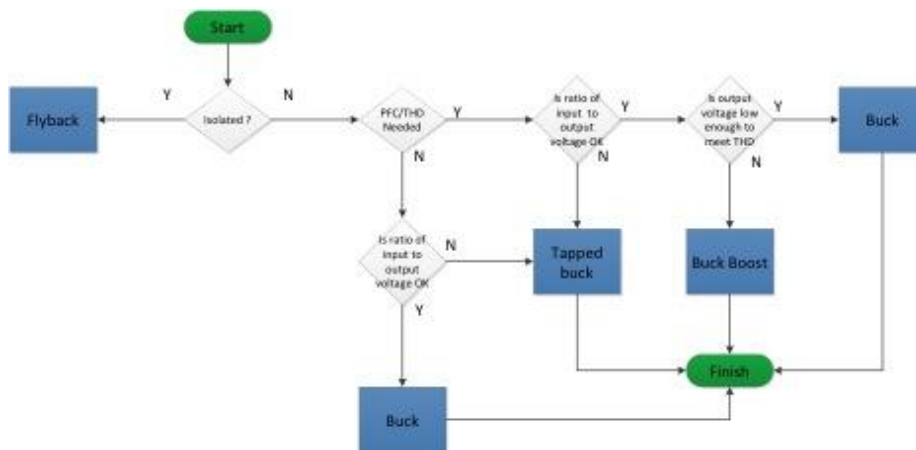
Τα LEDs, όπως και γενικά οι δίοδοι, δεν είναι γραμμικά κυκλωματικά στοιχεία. Μια μικρή μεταβολή στην τάση θα προκαλέσει μεγάλη μεταβολή στο ρεύμα και τελικά μεγάλη αλλαγή στην φωτεινότητα, η οποία είναι απευθείας εξαρτώμενη από το ρεύμα. Ο driver είναι αυτό το ηλεκτρονικό κύκλωμα που θα διατηρήσει το ρεύμα οδήγησης των LED σταθερό. Επίσης, τα LED λειτουργούν σε χαμηλή τάση (12-24V) και με συνεχές ρεύμα. Τα φωτιστικά τροφοδοτούνται από το δίκτυο με εναλλασσόμενη τάση που κυμαίνεται μεταξύ 120-277 V και εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι LED drivers υποβιβάζουν την υψηλή τάση και μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές.

Γενικά, υπάρχουν τέσσερις τοπολογίες driver και για κάθε μια από αυτές συναντώνται παραλλαγές ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή:

- Buck
- Boost
- Tapped Buck
- Flyback

Για την επιλογή του κατάλληλου LED driver ή για την σωστή σχεδίαση του υπάρχουν διάφορες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Ποια μέθοδος dimming πρόκειται να εφαρμοστεί, αναλογική ή PWM μέθοδος.
- Αν προτιμάται τοπολογία με γαλβανική απομόνωση (isolated) ή όχι (non-isolated). Για τοπολογίες με γαλβανική απομόνωση η flyback τοπολογία είναι η πιο δημοφιλής επιλογή. Αντίθετα, οι Buck, Boost και Tapped Buck τοπολογίες είναι non-isolated τοπολογίες.
- Το είδος της τροφοδοσίας, δηλαδή αν πρόκειται για AC ή DC πηγή.



Εικόνα 6.6: Μπλοκ διάγραμμα επιλογής κατάλληλης τοπολογίας driver
 Πηγή: www.designingwithleds.com

Στην περίπτωση DC τροφοδοσίας, το κύκλωμα του driver είναι πιο απλό. Χρειάζονται μόνο διευκρινήσεις για την τάση στην είσοδο και στην έξοδο του driver. Αντίθετα, όταν ο driver τροφοδοτείται από AC τροφοδοσία, έχει πιο πολύπλοκο κύκλωμα, αφού πρέπει ο εξοπλισμός να συμμορφώνεται με τα Πρότυπα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility-EMC), Ηλεκτρομαγνητικής Παρεμβολής (Electromagnetic Interference-EMI) και Προστασίας από Υπερτάσεις (Surge Protection) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επίσης, πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ο Συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion Factor –THD Factor) και να γίνεται διόρθωση του συντελεστή ισχύος (Power Factor Correction-PFC) [45]. Τα φωτιστικά δρόμου τροφοδοτούνται από το δίκτυο, ανήκουν δηλαδή στην δεύτερη περίπτωση.

Επιπλέον, τα τροφοδοτικά LED κατηγοριοποιούνται με βάση την μορφή του ρεύματος οδήγησης και την μέθοδο dimming που είναι σχεδιασμένα να πραγματοποιούν. Οι μέθοδοι dimming των LED είναι δύο, η μέθοδος Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού (Pulse Width Modulation-PWM), όπου το ρεύμα οδήγησης έχει την μορφή τετραγωνικού παλμού και η αναλογική μέθοδος ή μέθοδος Μείωσης Συνεχούς Ρεύματος (Constant Current Reduction-CCR), στην οποία το ρεύμα οδήγησης είναι συνεχές. Η περιγραφή των δύο μεθόδων ακολουθεί στις ενότητες 6.4.5 και 6.4.6 αντίστοιχα.

6.4 Μέθοδοι ρύθμισης της φωτεινότητας (dimming)

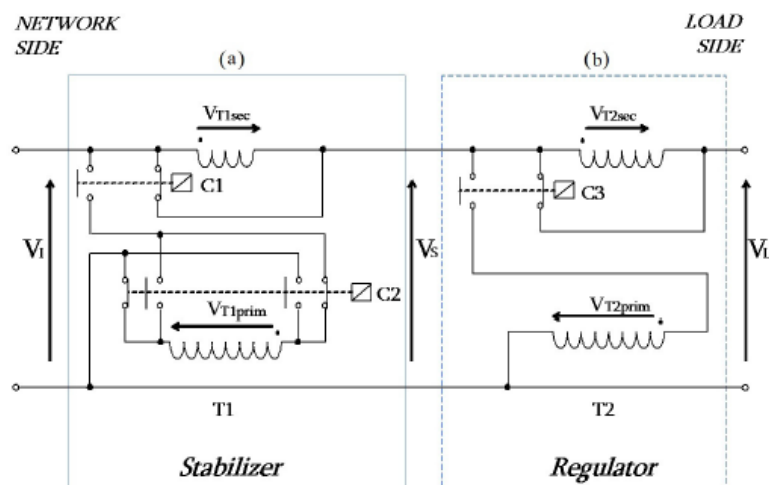
Η ρύθμιση της φωτεινής ροής ενός φωτιστικού πραγματοποιείται με την βοήθεια ειδικού βοηθητικού εξοπλισμού. Στην περίπτωση φωτιστικών τεχνολογίας LED ή συμβατικής τεχνολογίας με ηλεκτρονικό ballast μια συσκευή ελέγχου φωτισμού (dimming control device) συνδέεται με ένα ή περισσότερα ballast ή τροφοδοτικά και

στέλνει το κατάλληλο σήμα ελέγχου για το επίπεδο φωτεινής ροής που πρέπει να επιτευχθεί. Στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών ballast το dimming είναι είτε διαβαθμισμένο είτε συνεχές. Το συνεχές dimming επιτυγχάνεται μέσω ενός ρυθμιστή και σταθεροποιητή φωτεινής ροής, ο οποίος τοποθετείται στο ερμάριο ηλεκτρικής διανομής (πίλαρ) των φωτιστικών. Γενικά, όσον αφορά το dimming υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που ενδείκνυνται για διαφορετικούς τύπους φωτιστικών και παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναλύονται παρακάτω.

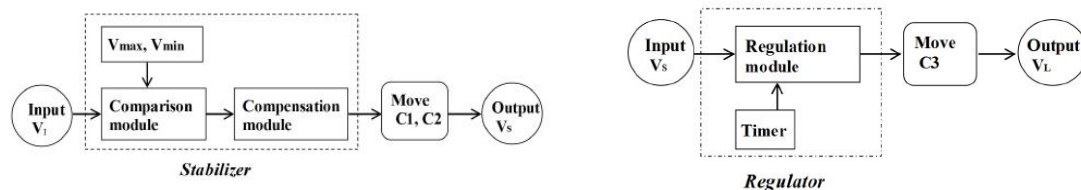
6.4.1 Κλιμακωτή μέθοδος dimming συμβατικών φωτιστικών με μαγνητικά ballast

Η μέθοδος αυτή λέγεται κλιμακωτή γιατί μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκεκριμένα επίπεδα dimming. Συνήθως, τα επίπεδα dimming που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι δύο, το 100% και το 50% της φωτεινής ροής. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχουν και τρία δυνατά επίπεδα dimming.

Οι F.R. Blanquez et Al. [46] σχεδίασαν ένα σύστημα κλιμακωτού dimming δύο επιπέδων, το οποίο περιλαμβάνει έναν μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού r_1 για την σταθεροποίηση της τάσης (stabilizer), έναν δεύτερο μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού r_2 για την επίτευξη 50% επιπέδου φωτεινής ροής (regulator), διακόπτες για την σύνδεση ή την παράκαμψη των μετασχηματιστών, σύστημα ελέγχου με μετρητή και ρυθμισμένα επίπεδα ελάχιστου και μέγιστου επιτρεπτού ορίου τάσης για κάθε επίπεδο λειτουργίας ώστε να παραμένει η διακύμανση της τάσης σε επιτρεπτά επίπεδα (stabilizer control system) και, τέλος, ένα σύστημα ελέγχου που συνδέεται με χρονοδιακόπτη ή αισθητήρες και πραγματοποιεί την αλλαγή των επιπέδων φωτεινότητας (regulator control system). Ο εξοπλισμός αυτός εγκαθίσταται στο πύλαρ όπου είναι συνδεδεμένα τα φωτιστικά.



Εικόνα 6.7: Κύκλωμα σταθεροποιητή τάσης και ρυθμιστή φωτεινής ροής
 Πηγή: High Efficiency Voltage Regulator and Stabilizer [47]



Εικόνα 6.8: Συστήματα Ελέγχου σταθεροποιητή και ρυθμιστή
Πηγή: High Efficiency Voltage Regulator and Stabilizer [47]

TABLE I
 COMPENSATION STEPS - LAMP VOLTAGE LEVEL - OPERATING ELEMENTS
 STATE (O: OPENED, C: CLOSED)

Luminous Flux	Supply Voltage V_I	Lamps Voltage Level V_L	C1	C2	C3
100%	$V_{min} < V_I < V_{max}$	V_I	O	O	O
	$V_I > V_{max}$	$V_I \cdot (1 - 1/r_1)$	C	O	O
	$V_I < V_{min}$	$V_I \cdot (1 + 1/r_1)$	C	C	O
Reduced flux	$V_{min} < V_I < V_{max}$	$V_I \cdot (1 - 1/r_2)$	O	O	C
	$V_I > V_{max}$	$V_I \cdot (1 - 1/r_2) \cdot (1 - 1/r_1)$	C	O	C
	$V_I < V_{min}$	$V_I \cdot (1 - 1/r_2) \cdot (1 + 1/r_1)$	C	C	C

Εικόνα 6.9: Επίπεδα τάσης και καταστάσεις διακοπών
Πηγή: High Efficiency Voltage Regulator and Stabilizer [47]

Υπάρχει και εναλλακτική μέθοδος κλιμακωτού dimming, η οποία προϋποθέτει την ύπαρξη ενός μαγνητικού ballast και ενός οι δύο επιπλέον πυκνωτών ανάλογα με το αν τα επίπεδα της φωτεινής ροής είναι δύο ή τρία αντίστοιχα. Οι πυκνωτές συνδέονται στο κύκλωμα μέσω ρελέ μεταγωγής, με αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου της σύνθετης αντίστασης και την μείωση της ισχύος [47].

Το κλιμακωτό dimming πραγματοποιείται όταν δοθεί η κατάλληλη είσοδος από προ-ρυθμισμένες συσκευές με χρονοδιακόπτη, από αισθητήρες ανίχνευσης της ανθρώπινης παρουσίας και φωτοκύτταρα ή χειροκίνητα από διακόπτες.

Πρόκειται για πιο οικονομική μέθοδο από το συνεχές dimming και είναι κατάλληλη για όλους τους λαμπτήρες HID. Ανάλογα με την ισχύ και το είδος του λαμπτήρα σε ένα σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού με δύο επίπεδα φωτεινής ροής το χαμηλό επίπεδο αντιστοιχεί στο 15-40% της φωτεινής ροής και στο 30-60% της αρχικής κατανάλωσης [47].

6.4.2 Συνεχής μέθοδος dimming συμβατικών φωτιστικών με μαγνητικά ballast

Υπάρχει διαθέσιμος εξοπλισμός που επιτρέπει την ομαλή και συνεχή μείωση της ισχύος των φωτιστικών HID. Η μείωση στο επίπεδο φωτεινότητας επιτυγχάνεται με

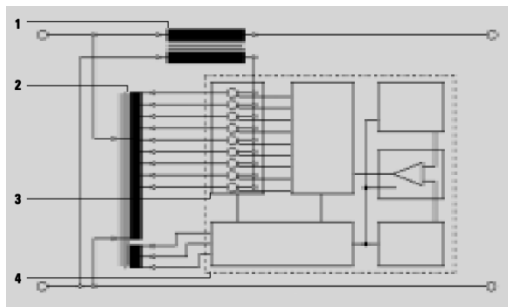
την μείωση της τάσης τροφοδοσίας του φωτιστικού. Η μείωση της τάσης δεν συνίσταται να γίνεται ακαριαία αλλά σταδιακά, μόλις μερικά Volt/λεπτό, ώστε να μην επηρεάσει την διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Εκτός από μείωση της τάσης εισόδου, ο εξοπλισμός αυτού του είδους επιτυγχάνει και την σταθεροποίησή της στο ζητούμενο επίπεδο.

Ο έλεγχος γίνεται κεντρικά, αφού ο εξοπλισμός τοποθετείται εντός του πίνακα τροφοδοσίας (pillar) ή εξωτερικά σε σύνδεση με αυτό. Η επικοινωνία με τους λαμπτήρες γίνεται με την υπάρχουσα καλωδίωση. Αυτά τα συστήματα είναι δυνατόν να συνδέονται με αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης και μέτρησης της φωτεινότητας του περιβάλλοντος και να προσαρμόζουν το επίπεδο dimming με βάση την είσοδο που δέχονται από αυτούς. Επίσης, συνήθως έχουν και δυνατότητα τηλεδιαχείρισης μέσω GPRS modem.

Ο εξοπλισμός είναι συνήθως ένας αυτομετασχηματιστής με λήψεις. Η ισχύς μειώνεται με την μείωση του πλάτους της τάσης τροφοδοσίας του δικτύου. Έτσι, μειώνεται και η φωτεινή ροή. Συνήθως, χρησιμοποιείται με φωτιστικά που διαθέτουν CWA ballast [47]. Το dimming έχει μικρή επίπτωση στην ποιότητα ισχύος, αλλά η λειτουργία υπό μειωμένη τάση μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του λαμπτήρα και του ballast, σύμφωνα με το Κέντρο Έρευνας Φωτισμού (Lighting Research Center) [7].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι ο ρυθμιστής φωτεινής ροής και σταθεροποιητής τάσης ILUEST+ της εταιρείας SALICRU. Ο εξοπλισμός είναι ηλεκτρονικός, χωρίς κινητά μέρη, όπως ρελέ και διακόπτες, καθώς κάτι τέτοιο αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας και τον χρόνο ανταπόκρισης του συστήματος. Αποτελείται από τέσσερα μέρη:

- Έλεγχος: Ο έλεγχος πραγματοποιείται με έναν μικροελεγκτή με ενσωματωμένη μνήμη που είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των βασικών παραμέτρων του εξοπλισμού, όπως είναι οι τάσεις, η εντολή εξοικονόμησης, ο έλεγχος διακύμανσης της τάσης.
- Μετασχηματιστής Ενίσχυσης Τάσης: Ο εξοπλισμός είναι στατικός, δηλαδή χρησιμοποιούνται στατικοί ημιαγωγοί (θυρίστορ ή TRIAC) αντί για κινητά μέρη. Ο μετασχηματιστής ενίσχυσης τάσης επιτρέπει την χρήση χαμηλής ισχύος ημιαγωγών μειώνοντας όλες τις εισροές ρεύματος που μπορεί να τους επιβαρύνουν.
- Αυτομετασχηματιστής με λήψεις: Αυτός ο μετασχηματιστής αυξάνει ή μειώνει την πρωτεύουσα τάση του μετασχηματιστή ενίσχυσης με βάση την ανατροφοδότηση της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση αναφοράς επιτυγχάνοντας, έτσι, το ζητούμενο επίπεδο φωτεινής ροής.
- Προστασία: Ο εξοπλισμός πρέπει να εξασφαλίζει προστασία από υπερφορτώσεις, καθώς και αντικεραυνική προστασία.



1. Μετασχηματιστής ενίσχυσης τάσης
2. Μετασχηματιστής με λήψεις
3. Στατικές λήψεις
4. Έλεγχος

Εικόνα 6.10: Κυκλωματικό διάγραμμα εξοπλισμού για συνεχές dimming σε εγκαταστάσεις με μαγνητικά ballast

Ο εξοπλισμός που περιγράφεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω λειτουργεί και ως σταθεροποιητής της τάσης. Έτσι, επιτυγχάνεται η διατήρηση της ονομαστικής τάσης λειτουργίας όταν σταματούν οι εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες και δημιουργείται στο δίκτυο υπέρταση. Η διατήρηση της τάσης στο ονομαστικό επίπεδο του φωτιστικού είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την περίοδο εκκίνησης του, καθώς επηρεάζεται η διάρκεια ζωής του [49].

6.4.3 Συνεχής μέθοδος dimming συμβατικών φωτιστικών με ηλεκτρονικά ballast

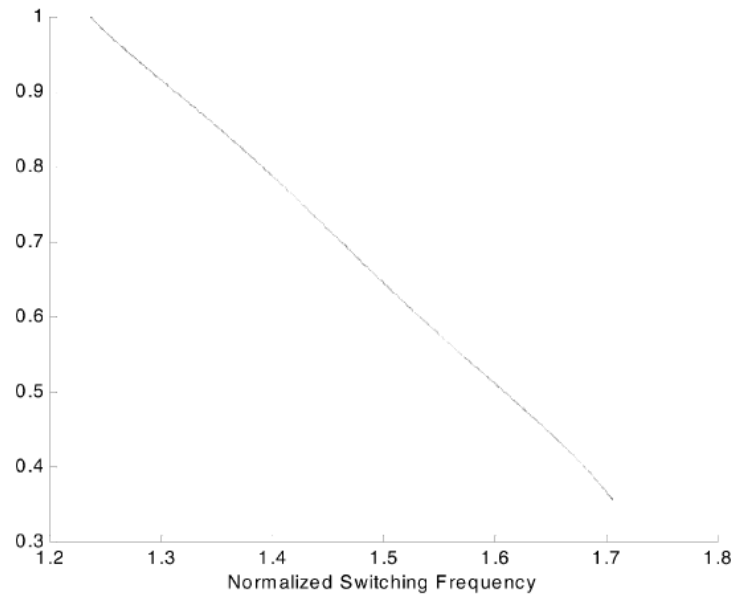
Τα ηλεκτρονικά ballast περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά κυκλώματα στερεάς κατάστασης ώστε να παρέχουν τις κατάλληλες συνθήκες εκκίνησης και λειτουργίας για τους λαμπτήρες εκκένωσης. Τα ηλεκτρονικά ballast τροφοδοτούν τους λαμπτήρες εκκένωσης είτε με χαμηλής συχνότητας τετραγωνικούς παλμούς [50] είτε με εξαιρετικά υψηλής συχνότητας ημιτονοειδές ρεύμα, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα ακουστικής συνήχησης, που εμφανίζονται σε ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να αποφεύγεται καθώς οδηγεί σε ασταθές τόξο ή και σβέση του τόξου [51].

Το κύκλωμα του ballast περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, ένα μετατροπέα AC-DC (ανορθωτής) και ένας μετατροπέας DC-AC υψηλής συχνότητας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.1.

Τα ηλεκτρονικά ballast με δυνατότητα dimming εξασφαλίζουν συνεχές dimming σε ένα εύρος από το 100% έως το 30 με 40%. Το κατώτατο όριο εξαρτάται και από το ίδιο το ballast, αλλά και από τον τύπο του λαμπτήρα. Οι κυριότερες μέθοδοι dimming είναι δύο: ο έλεγχος συχνότητας και ο έλεγχος τάσης.

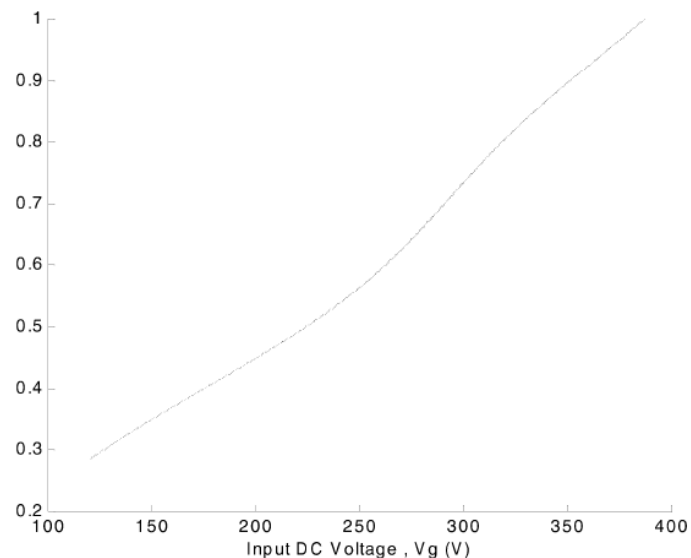
Η μέθοδος ελέγχου της συχνότητας είναι αυτή με την πιο συχνή εφαρμογή. Μεταβάλλοντας την διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα DC-AC σε ένα μεγάλο εύρος και διατηρώντας σταθερή την DC τάση στην έξοδο του μετατροπέα AC-DC επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ισχύος και της φωτεινής ροής του

λαμπτήρα. Η ισχύς μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα σε σχέση με την διακοπτική συχνότητα [51],[52].



Εικόνα 6.11: Σχέση ισχύος λαμπτήρα με κανονικοποιημένη διακοπτική συχνότητα για ballast τύπου LC
Πηγή: Dimming Control and Characteristics of High Frequency Operated metal Halide Lamps [53]

Στην μέθοδο ελέγχου τάσης, η συχνότητα διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται η DC τάση λειτουργίας στην έξοδο του μετατροπέα AC-DC. Η σχέση μεταξύ της ισχύος και της τάσης φαίνεται στο παρακάτω γράφημα:



Εικόνα 6.12: Σχέση ισχύος λαμπτήρα με DC τάση για ballast τύπου LC
Πηγή: Dimming Control and Characteristics of High Frequency Operated metal Halide Lamps [53]

Η καταλληλότητα της κάθε μεθόδου εξαρτάται από την τοπολογία του ballast. Σε κάποιες τοπολογίες παρεμβάλλεται ένας DC-DC μετατροπέας ισχύος που

υποβιβάζει την DC τάση της εξόδου του ανορθωτή. Σε αυτό το στάδιο γίνεται και η ρύθμιση του επιπέδου dimming του λαμπτήρα [53].

6.4.4 Τεχνικοί περιορισμοί όσον αφορά το dimming των λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής έντασης

Υπάρχει ένα σύνολο τεχνικών θεμάτων όσον αφορά το dimming λαμπτήρων HID, τα οποία είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη κατά την μελέτη πριν την εγκατάσταση και την λειτουργία ενός συστήματος ελέγχου φωτεινής ροής αυτού του τύπου φωτιστικών. Αυτά τα θέματα έχουν να κάνουν με το φωτιστικό αποτέλεσμα, την απόδοση, την διάρκεια ζωής και το χρώμα. Για την αντιμετώπισή τους ο Εθνικός Οργανισμός Κατασκευαστών Ηλεκτρικού Εξοπλισμού των Η.Π.Α. (National Electrical Manufacturers Association-NEMA) έχει εκδώσει μια σειρά οδηγιών.

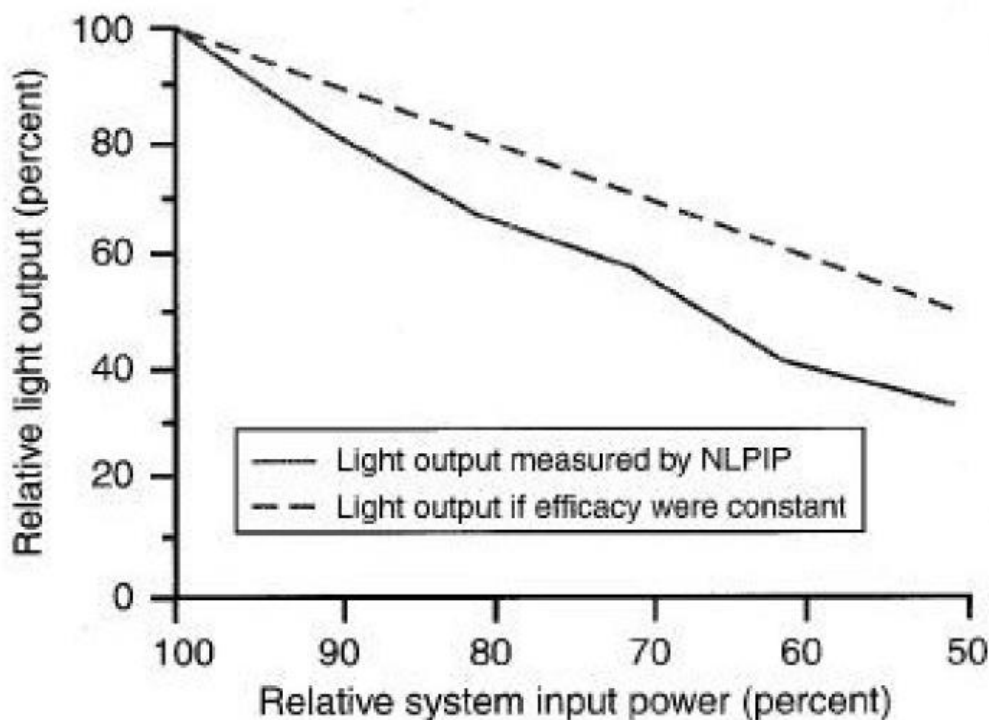
Απόδοση: Η σχέση της μείωσης της κατανάλωσης του φωτιστικού και της μείωσης της φωτεινής ροής δεν είναι γραμμική, καθώς η φωτεινή απόδοση κατά την διάρκεια του dimming μειώνεται. Έτσι, η φωτεινή ροή μειώνεται περισσότερο από την ισχύ. Συγκεκριμένα, η μείωση της φωτεινής ροής είναι 20-50% μεγαλύτερη από την μείωση της ισχύος για τους λαμπτήρες MH και 10-40% μεγαλύτερη για τους λαμπτήρες HPS [47].

Πίνακας 6.2: Πίνακας ισχύος και αντίστοιχης απόδοσης για λαμπτήρα MH 400 W
Πηγή: Lighting Research Center [7]

Ισχύς Φωτιστικού (W)	Κανονικοποιημένη Απόδοση (%)
439	100
393	91
354	82
302	79
260	67
247	59

Dimming κάτω από το 50%: Το dimming κάτω από το 50% της ονομαστικής ισχύος στους λαμπτήρες HID δεν συνίσταται, καθώς μπορεί να επιδεινώσει την διάρκεια ζωής, την απόδοση, την θερμοκρασία χρώματος [47]. Σύμφωνα με τις οδηγίες της NEMA το ελάχιστο επιτρεπτό επίπεδο dimming τόσο για τους λαμπτήρες HPS όσο και για τους λαμπτήρες MH είναι το 50%. Επίσης, συνίσταται οι λαμπτήρες να

λειτουργήσουν για περίοδο 15 λεπτών τουλάχιστον μετά την εκκίνηση και 30 λεπτών μετά από διακοπή και επαναλειτουργία στο 100% της ισχύος τους πριν την εφαρμογή του dimming [54].



Εικόνα 6.13: Γράφημα ισχύος σε σχέση με την φωτεινή απόδοση για λαμπτήρα MH 400 W
Πηγή: Lighting Research Center [7]

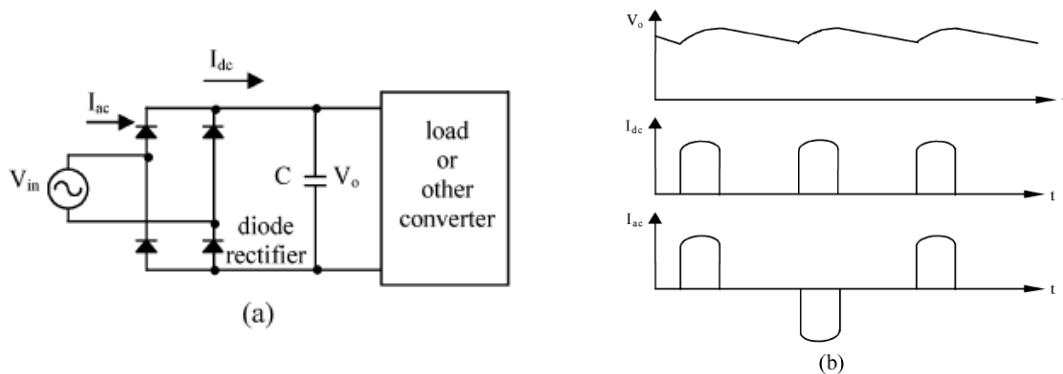
Flicker: Η ρύθμιση της φωτεινής ροής των λαμπτήρων εκκένωσης, ειδικά των λαμπτήρων HPS, μπορεί να οδηγήσουν στην εμφάνιση του flicker [47].

Χρώμα: Οι λαμπτήρες εκκένωσης μπορεί να παρουσιάσουν αλλαγή στην θερμοκρασία χρώματος αλλά και στον δείκτη χρωματικής απόδοσης με το dimming. Οι λαμπτήρες MH είναι πιο ευάλωτοι σε τέτοιου είδους αλλαγές. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία χρώματος ορισμένων λαμπτήρων MH αυξάνεται με το dimming και στο 50% της ονομαστικής ισχύος μπορεί να αυξηθεί έως και 1500K. Το CRI αντίθετα μειώνεται με το dimming του λαμπτήρα MH [7], [47].

6.4.5 Μέθοδος PWM για το dimming των LED

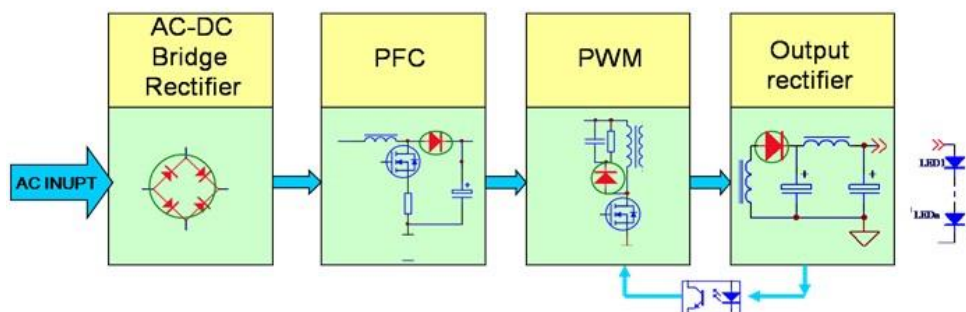
Η μέθοδος Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού πραγματοποιείται με PWM drivers. Βασικό μέρος ενός PWM driver για μια τέτοια εφαρμογή είναι μια ανορθωτική διάταξη για την μετατροπή της τάσης εισόδου από AC σε DC, όπως είναι ο ανορθωτής γέφυρας. Οι ανορθωτές γέφυρας συνδέονται συνήθως παράλληλα με ένα πυκνωτή, ο οποίος μειώνει την κυμάτωση της DC τάσης εξόδου.

Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 6.14(a). Η τάση εισόδου V_{in} είναι η εναλλασσόμενη τάση του δικτύου Χαμηλής Τάσης (ΧΤ, 230 V $\pm 10\%$). Το ρεύμα εισόδου στην διάταξη ανόρθωσης I_{ac} , σε αντίθεση με την τάση εισόδου, δεν έχει ημιτονοειδή μορφή, καθώς οι δίοδοι άγουν μόνο για το χρονικό διάστημα που η τάση στην είσοδο της γέφυρας είναι ίση ή μεγαλύτερη από την τάση του πυκνωτή. Στην εικόνα 6.14(b) έχουν σχεδιαστεί οι κυματομορφές του ρεύματος εισόδου I_{ac} , του ρεύματος I_{dc} στην έξοδο του ανορθωτή και της τάσης V_o του πυκνωτή, δηλαδή της τάσης εξόδου της βαθμίδας ανόρθωσης. Παρατηρείται ότι η τάση εξόδου V_o , η οποία αποτελεί παράλληλα τάση εισόδου για την επόμενη βαθμίδα του τροφοδοτικού, έχει μικρή κυμάτωση χάρη στην ύπαρξη του πυκνωτή.



Εικόνα 6.14: (α)Κύκλωμα ανορθωτή γέφυρας παράλληλα με πυκνωτή (β) Τάση εξόδου, ρεύμα εξόδου, ρεύμα εισόδου
Πηγή: IEEE [55]

Αυτή η μη ημιτονοειδής μορφή του ρεύματος εξόδου I_{dc} της βαθμίδας ανόρθωσης έχει ως συνέπεια την μείωση του συντελεστή ισχύος. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να συνδεθεί και ένα κύκλωμα Διόρθωσης Συντελεστή Ισχύος (Power Factor Correction-PFC). Άλλο ένα βασικό δομικό στοιχείο του κυκλώματος είναι μια PWM διάταξη. Τέλος παρεμβάλλεται ένας ανορθωτής για την τελική σταθεροποίηση και εξομάλυνση της του ρεύματος εξόδου, δηλαδή του ρεύματος οδήγησης των LED [55].

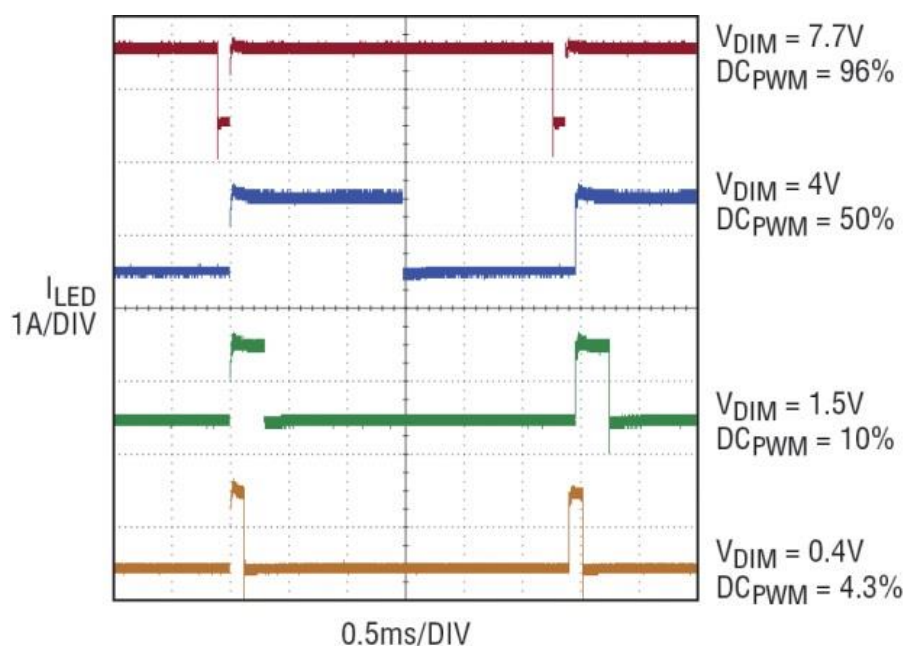


Εικόνα 6.15: Διάγραμμα βαθμίδων τυπικού LED driver
Πηγή: www.thinkisemi.com

Η έξοδος ενός PWM driver είναι τετραγωνικός παλμός με μεγάλη συχνότητα, πλάτος ίσο με το ονομαστικό ρεύμα και εύρος που μπορεί να μεταβάλλεται μεταβάλλοντας και το επίπεδο dimming. Η αναλογία του χρονικού διαστήματος μέσα στην περίοδο του παλμού που οι δίοδοι άγουν προς την περίοδο του παλμού λέγεται κύκλος λειτουργίας του (duty cycle).

$$DC = \frac{T_{PWM,ON}}{T_{PWM}}$$

Μεταβάλλοντας το duty cycle μεταβάλλεται και η φωτεινή ροή. Έτσι, για παράδειγμα, όταν τα LED άγουν για το 50% του χρόνου το επίπεδο της φωτεινής ροής είναι περίπου στο 50% [56].



Εικόνα 6.16: Ρεύμα οδήγησης των LED σε μορφή τετραγωνικού παλμού με duty cycle 96,50,10,4.3%
 Πηγή: www.eetimes.com

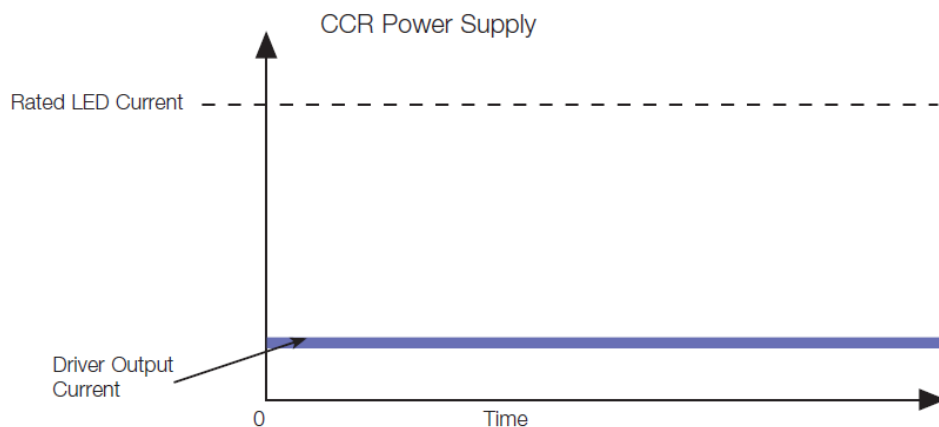
Η PWM μέθοδος εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς το επιθυμητό επίπεδο φωτισμού, ακόμα και στα πιο χαμηλά επίπεδα dimming. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι δεν μεταβάλλεται η θερμοκρασία χρώματος των LED αφού τα LED είτε δεν άγουν είτε οδηγούνται από το ονομαστικό ρεύμα οδήγησης [56].

Ωστόσο, τα PWM κυκλώματα είναι πιο σύνθετα, γεγονός που αυξάνει και το κόστος. Συχνά ευθύνονται για παραγωγή θορύβου και φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Επιπλέον, η συχνότητα του παλμού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτήν την μέθοδο. Όσο πιο μεγάλη είναι η συχνότητα, τόσο λιγότερο πιθανό είναι να παρατηρηθεί flicker. Για συχνότητες μικρότερες από 200 Hz μπορεί να παρατηρηθεί flicker στην περιφερειακή όραση. Ωστόσο, για την επίτευξη μεγάλων συχνοτήτων απαιτούνται τροφοδοτικά με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και κόστος κατασκευής. Τέλος, οι PWM drivers πρέπει να τοποθετούνται πολύ κοντά στη φωτεινή πηγή, καθώς τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

του καλωδίου (χωρητικότητα, επαγωγή) αλλοιώνουν τον τετραγωνικό παλμό μεγάλης συχνότητας, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του driver [56].

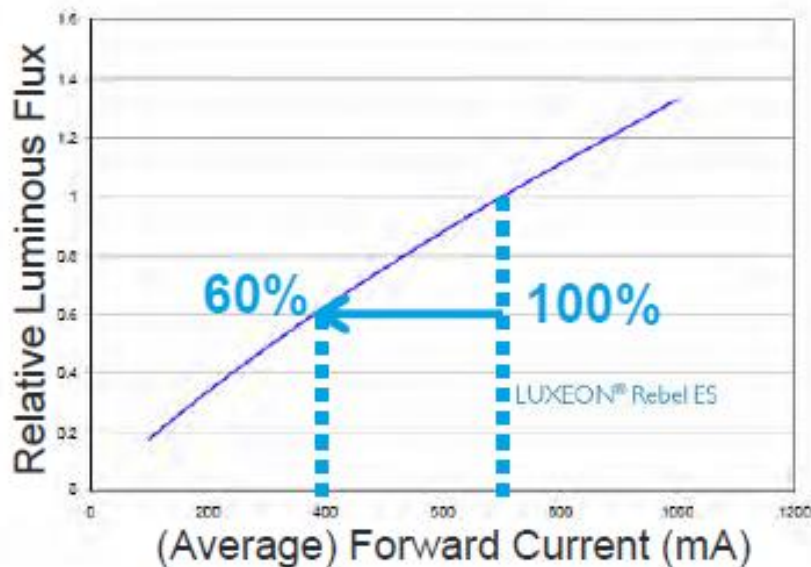
6.4.6 Αναλογική μέθοδος dimming φωτιστικών LED

Με την αναλογική μέθοδο ή Μέθοδο Μείωσης Συνεχούς Ρεύματος (Constant Current Reduction-CCR) τα LED διαρρέονται συνεχώς από DC ρεύμα. Κάθε τιμή του ρεύματος αντιστοιχεί σε δεδομένο επίπεδο φωτισμού. Γενικά, η φωτεινή ροή των LED μειώνεται με την μείωση του ρεύματος οδήγησης.



Εικόνα 6.17: DC ρεύμα οδήγησης στο 25% του ονομαστικού ρεύματος οδήγησης των LED
Πηγή: www.lutron.com [57]

Η μέθοδος CCR επιτυγχάνεται με AC/DC τροφοδοτικά. Η αυξομείωση του DC ρεύματος εξόδου μπορεί να επιτευχθεί με μία μεταβλητή αντίσταση που συνδέεται σε σειρά με τις συστοιχίες των LED.



Εικόνα 6.18: Σχέση μεταξύ της φωτεινής ροής και του ρεύματος οδήγησης για LED της εταιρείας LUMILEDS
Πηγή: www.lumileds.com

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το απλούστερο κύκλωμα, καθώς και το γεγονός ότι το κύκλωμα δεν παράγει θόρυβο. Επιπλέον, η CCR μέθοδος δεν προκαλεί το φαινόμενο flicker, δηλαδή ταχύτατες και μικρές διακυμάνσεις της φωτεινής ροής, το οποίο έχει σοβαρές επιπτώσεις στην οπτική άνεση και την υγεία [56].

Το κυριότερο μειονέκτημα της τεχνικής CCR είναι ότι αλλοιώνει την θερμοκρασία χρώματος της πηγής. Η θερμοκρασία χρώματος εξαρτάται από το ρεύμα οδήγησης των LED. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία χρώματος των LED μπορεί να είναι 3000K όταν το ρεύμα οδήγησης είναι 700mA και 2700K για ρεύμα οδήγησης 350mA [56]. Επίσης, κυρίως στα χαμηλότερα επίπεδα dimming, είναι λιγότερο ακριβής σε σχέση με την PWM μέθοδο ως προς το επίπεδο φωτεινότητας που επιτυγχάνεται, αφού η σχέση φωτεινής ροής και ρεύματος οδήγησης δεν είναι γραμμική [56],[57].

6.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας για τον έλεγχο του φωτισμού

Οι driver των φωτιστικών LED και τα ηλεκτρονικά ballast των λαμπτήρων εκκένωσης αποτελούν τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό οδήγησης του φωτιστικού (Electronic Control Gear-ECG). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα ECG για να προχωρήσουν σε αύξηση ή μείωση του επιπέδου της φωτεινής ροής πρέπει να δεχτούν το κατάλληλο σήμα ελέγχου από τον ελεγκτή. Οι δύο αυτές συσκευές επικοινωνούν με κοινό πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Ως πρωτόκολλο επικοινωνίας ορίζεται ένα σύνολο προσυμφωνημένων κανόνων που απαιτούνται για τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνεται η ανταλλαγή δεδομένων, και επομένως η επικοινωνία μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών μέσω ενός δικτύου. Οι κανόνες αυτοί καθορίζουν την μορφή, τον χρόνο και την σειρά μετάδοσης των πληροφοριών στο δίκτυο. Εκτελούν, επίσης, έλεγχο και διόρθωση σφαλμάτων κατά την διάρκεια μετάδοσης των πληροφοριών. Το πρωτόκολλο μπορεί να καθορίζει το ηλεκτρομηχανολογικό μέρος (hardware), το λογισμικό (software) μιας συσκευής ή τον συνδυασμό των δύο [59].

Για την επικοινωνία του ελεγκτή και του driver (ή του ballast) ενός φωτιστικού τα κυριότερα πρωτόκολλα επικοινωνίας και ελέγχου είναι δύο:

- Το αναλογικό πρωτόκολλο 0-10 Volt
- Το ψηφιακό πρωτόκολλο DALI (Digital Addressable Lighting Interface- Ψηφιακή Διεπαφή Φωτισμού με δυνατότητα Διευθυνσιοδότησης)

6.5.1 Πρωτόκολλο ελέγχου 0-10 Volt DC

Το πρωτόκολλο ελέγχου φωτισμού 0-10V καθορίζεται από το διεθνές πρότυπο ANSI E1.3 – 2001(R2011) “Entertainment Technology –Lighting Control Systems 0 to 10V

Analog Control Specification” και είναι το παλαιότερο και απλούστερο πρωτόκολλο ελέγχου φωτισμού. Χρησιμοποιείται ένα αναλογικό DC σήμα τάσης από την έξοδο του ελεγκτή στην είσοδο του ECG που κυμαίνεται μεταξύ των 0 και 10 Volt. Η διακύμανση του DC σήματος μπορεί να είναι +/-20mV. Το πρότυπο 0-10V είναι γραμμικό, δηλαδή για τάση 10V το επίπεδο της φωτεινής ροής είναι στο 100%, για τάση 5V είναι στο 50%, για τάση 0V στο 0% (δηλαδή το φωτιστικό κλείνει) και ούτω καθεξής.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής ελέγχου είναι η ευκολία στην εγκατάσταση, αφού απαιτούνται μόνο δύο αγωγοί, ένας για το σήμα ελέγχου και ένας επιστροφής. Το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό είναι της τάξης των λίγων mA, γεγονός που καθιστά εφικτή την χρήση αγωγών με μικρή διατομή και μικρή πτώση τάσης.

Μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου ελέγχου 0-10V είναι το 1-10V. Η αρχή λειτουργίας του είναι βασικά η ίδια. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι ελεγκτές 1-10V έχουν ως κατώτατο σήμα ελέγχου το 1 Volt DC που αντιστοιχεί σε 10% επίπεδο dimming, καθώς και έναν διακόπτη διακοπής της τροφοδοσίας για την απενεργοποίηση του φωτιστικού.

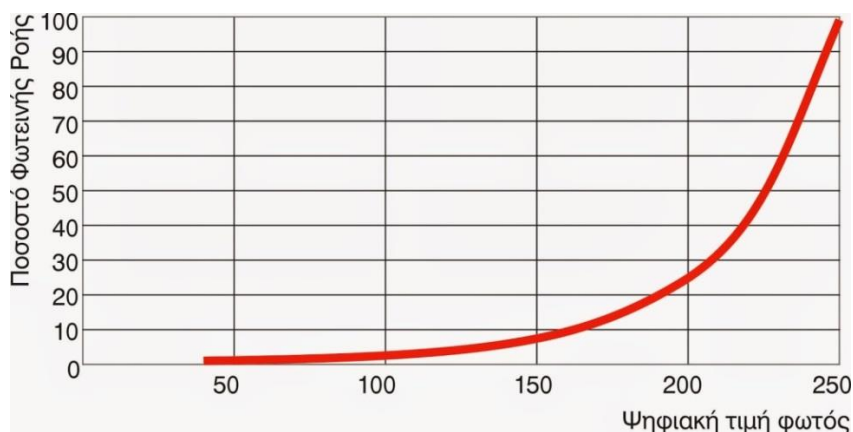
Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ του ελεγκτή και του ECG. Αυτό συμβαίνει γιατί σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμα και με την χρήση αγωγών με μικρή διατομή η πτώση τάσης μεταβάλλει το επίπεδο του σήματος που φτάνει στην είσοδο του ECG και συνεπώς και το επίπεδο του dimming. Επίσης, σε μεγάλες αποστάσεις αυξάνεται και ο θόρυβος που αλλοιώνει το αναλογικό σήμα κατά την μετάδοση του.

Το ελάχιστο επίπεδο dimming που επιτυγχάνεται με αυτήν την τεχνική είναι από 5 έως 10%. Επίσης, το πρωτόκολλο 0-10V είναι μονής κατεύθυνσης, δεν δέχεται δηλαδή ανατροφοδότηση από την εξοπλισμό οδήγησης του φωτιστικού [60].

6.5.2 Πρωτόκολλο ελέγχου DALI

Το πρωτόκολλο ελέγχου DALI είναι ένα ανοιχτό πρωτόκολλο διασύνδεσης για ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, του οποίου οι αρχές και οι κανονισμοί ορίζονται από το τεχνικό πρότυπο IEC 62386. Ως διεθνές πρότυπο επικοινωνίας, το DALI καθορίζει τις εντολές που το ECG, εφόσον υποστηρίζει το πρωτόκολλο, τις αναγνωρίζει και τις εκτελεί. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο διπλής κατεύθυνσης, το οποίο συστάθηκε από μια ομάδα κατασκευαστών και φορέων που δραστηριοποιούνται στον τομέα των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου λαμπτήρων εκκένωσης, φθορισμού και LED, υπό την επίβλεψη του Γερμανικού Οργανισμού Κατασκευαστών Ηλεκτρολογικού και Ηλεκτρονικού Υλικού [61].

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου τεχνικής DALI έχουν δυνατότητα ρύθμισης της έντασης φωτισμού σε ποσοστό από περίπου 1% μέχρι 100% και σε λογαριθμική μεταβολή του ποσοστού της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής σε σχέση με την ψηφιακή τιμή του φωτός, όπως φαίνεται στο γράφημα [60].



Εικόνα 6.19: Μεταβολή φωτεινής ροής από ψηφιακό ηλεκτρονικό σύστημα με στοιχεία σύνδεσης DALI
 Πηγή: stefoulouglou.blogspot.com

Ένας ελεγκτής DALI συνδέεται με το ECG ενός ή περισσότερων φωτιστικών σειριακά μέσω δύο καλωδίων. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αγωγών καθορίζει το επίπεδο του σήματος και, συνεπώς, το επίπεδο dimming. Το χαμηλό επίπεδο είναι στα 0 V (από -4.5 V έως +4.5 V), ενώ το υψηλό στα 16 V (από 9.5 V έως 22.5 V). Η πτώση τάσης κατά την μετάδοση του σήματος μπορεί να είναι έως 2V [62]-[64].

Η μέγιστη απόσταση μετάδοσης εξαρτάται από την διατομή του αγωγού μεταξύ του ελεγκτή και του ECG [62],[63].

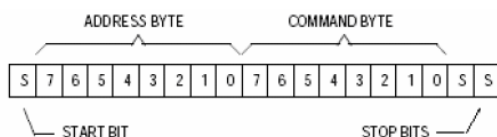
Πίνακας 6.3: Απόσταση μετάδοσης συναρτήσει της διατομής του αγωγού

Μήκος Αγωγού	Ελάχιστη Διάμετρος
Έως 100 m	0.5 mm ²
100 – 150 m	0.75 mm ²
Πάνω από 150 m	1.5 mm ²

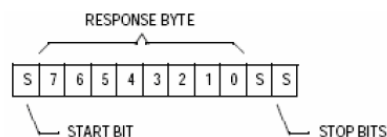
Στο κάθε ECG στο δίκτυο αποδίδεται μια διεύθυνση. Η επικοινωνία είναι διπλής κατεύθυνσης και βασίζεται στην αρχή master and slave: ο ελεγκτής (master) ξεκινάει και ελέγχει την μεταφορά των μηνυμάτων με τα ECG (slaves). Τα ECG ανταποκρίνονται και στέλνουν μηνύματα μόνο μετά από αίτημα του ελεγκτή [62]-[64].

Τα μηνύματα του ελεγκτή έχουν μήκος 19 bits, ένα bit έναρξης, 8 bits για την διεύθυνση, 8 bits για την εντολή και 2 bits λήξης. Η διεύθυνση μπορεί να είναι ενός

ECG ή μιας ομάδας αυτών. Γενικά υπάρχει περιθώριο διευθυνσιοδότησης έως 64 μεμονωμένων ECG και έως 16 ομάδων. Τα μηνύματα που προέρχονται από το ECG έχουν μήκος 11 bits, 1 bit έναρξης, 8 bits δεδομένων και 2 bits λήξης. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 1200 bits/sec και είναι επαρκής για την μετάδοση των συγκεκριμένων πακέτων [64].



Εικόνα 6.20: Μήνυμα ελεγκτή σύμφωνα με το πρωτόκολλο DALI
Πηγή: IEEE [64]



Εικόνα 6.21: Μήνυμα ECG σύμφωνα με το πρωτόκολλο DALI
Πηγή: IEEE [64]

Πίνακας 6.4: Πίνακας περιγραφής πεδίων μηνύματος ελεγκτή DALI

Τύπος πεδίου	Περιγραφή byte
Διεύθυνση μεμονωμένου ECG	0AAAAAAS (AAAAAA=0...63, S=0/1)
Διεύθυνση ομάδας	100AAAAAS (AAAA=0...15, S=0/1)
Διεύθυνση για το σύνολο των συνδεδεμένων ECG	1111111S (S=0/1)
Εντολή	101CCCC1 (CCCC=Κωδικός εντολής)

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής DALI είναι πολυάριθμα [63]-[64]:

- Η απλή καλωδίωση γραμμών ελέγχου με χρήση δύο αγωγών
- Η δυνατότητα διευθυνσιοδότησης με αποτέλεσμα των έλεγχο έως 64 ECG μεμονωμένα (short addressing), συνολικά (broadcast addressing) ή σε ομάδες (group addressing).
- Η δυνατότητα αποθήκευσης έως 16 σεναρίων φωτισμού.
- Η αυτόματη ανίχνευση των μονάδων ECG.
- Η δυνατότητα απενεργοποίησης του φωτιστικού χωρίς την αποσύνδεση του από την τροφοδοσία.
- Η ευελιξία στην επαναδιαμόρφωση του συστήματος (αλλαγές στην ομαδοποίηση των φωτιστικών, στα σενάρια φωτισμού κλπ).
- Η αυτόματη και ταυτόχρονη ρύθμιση της φωτεινότητας όλων των μονάδων κατά την επιλογή μιας σκηνής.
- Η εύκολη διαδικασία προσθήκης νέων μονάδων στο δίκτυο.
- Η δυνατότητα επιλογής φωτισμού έκτακτης ανάγκης.
- Η δυνατότητα αναφοράς μηνυμάτων σχετικά με την κατάσταση των συνδεδεμένων μονάδων ECG, για παράδειγμα στην περίπτωση αστοχίας λαμπτήρα ή του ίδιου του ECG.

6.5.3 Σύγκριση πρωτοκόλλων

Είναι φανερό ότι το DALI προσφέρει πολύ μεγάλη ευελιξία με το τεράστιο εύρος λειτουργιών και δυνατοτήτων του. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του είναι η δυνατότητα διευθυνσιοδότησης και διαχείρισης πολυάριθμων μονάδων ECG. Επιπλέον, η τεχνική DALI επιτρέπει μεγάλη απόσταση μετάδοσης, σε αντίθεση με την μέθοδο 0-10 V.

Ωστόσο, στον οδοφωτισμό, για μεγαλύτερη αξιοπιστία του συστήματος διαχείρισης επιλέγεται κατά κανόνα η τοποθέτηση ενός ελεγκτή για κάθε φωτιστικό σώμα. Ο ελεγκτής τοποθετείται συνήθως στο εσωτερικό του φωτιστικού, καθώς το κέλυφος του χαρακτηρίζεται από μεγάλη μηχανική αντοχή. Συνεπώς, σε μια τέτοια τοπολογία, τα πλεονεκτήματα του DALI και ο περιορισμός του 0-10 V δεν έχουν πλέον κάποιο αντίκτυπο.

6.6 Συστήματα τηλεδιαχείρισης προσαρμοστικού φωτισμού

Όσον αφορά τον προσαρμοστικό οδοφωτισμό υπάρχει ένα μεγάλο εύρος διαθέσιμων οργάνων, συσκευών και μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την «έξυπνη» διαχείριση μιας εγκατάστασης. Τα συστήματα ελέγχου ποικίλουν από πολύ απλές έως πολύ σύνθετες εφαρμογές.

Για παράδειγμα, η ρύθμιση της φωτεινής ροής μπορεί να επιτευχθεί από αυτόνομα συστήματα που περιλαμβάνουν ελεγκτές και αισθητήρες. Οι ελεγκτές τοποθετούνται στα φωτιστικά και περιέχουν αποθηκευμένα προ-ρυθμισμένα σενάρια dimming. Διάφοροι τύποι αισθητήρων μπορούν να συνδεθούν στους ελεγκτές όπως:

- Αισθητήρες Παθητικών Υπερύθρων (Passive Infra-Red Sensors-PIR): Οι PIR αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση διέλευσης πεζών ή ποδηλατών. Οι αισθητήρες αυτοί, όπως δηλώνει ο όρος «παθητικών» στην ονομασία τους, δεν εκπέμπουν ακτινοβολία. Περιέχουν πυροηλεκτρικά υλικά που ανιχνεύουν την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπει κάθε σώμα με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν, όπως το ανθρώπινο σώμα. Η ακτινοβολία εξαρτάται από την θερμοκρασία της επιφάνειάς του. Προκειμένου να ανιχνεύεται η διέλευση παιδιών αλλά να αποφεύγεται η ανίχνευση πτηνών και γενικότερα ζώων οι αισθητήρες τοποθετούνται σε κατάλληλο ύψος και ρυθμίζονται ώστε να αντιδρούν σε ακτινοβολία από ένα επίπεδο και πάνω. Η εμβέλεια τους είναι μόλις μερικά μέτρα [64], [65].
- Ραντάρ ανίχνευσης κίνησης: Έχουν πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια από τους PIR αισθητήρες και γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις φωτισμού αυτοκινητοδρόμων μέσης και ταχείας κυκλοφορίας.

- Αισθητήρας ανίχνευσης φωτός (Light Sensor): Ο αισθητήρας αυτός ανιχνεύει την εξωτερική φωτεινή ένταση και με βάση αυτή ρυθμίζει την φωτεινή ροή του φωτιστικού στο επίπεδο που χρειάζεται ώστε να πληρούνται τα όρια της κλάσης του δρόμου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.
- Αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και θορύβου: Πρόκειται για αισθητήρες για την μέτρηση των συνθηκών λειτουργίας του εξωτερικού περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στα πλαίσια εφαρμογών «Έξυπνων» πόλεων.

Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα τροφοδοσίας των φωτιστικών από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Βέβαια, σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης.

Από την άλλη, τα συστήματα τηλεδιαχείρισης παρέχουν ακόμα περισσότερες δυνατότητες και εξασφαλίζουν την δυνατότητα συνολικής επίβλεψης μιας εγκατάστασης φωτισμού πέρα από εξοικονόμηση ενέργειας. Τα συστήματα τηλεδιαχείρισης προσαρμοστικού φωτισμού με βάση το μέσο μετάδοσης των δεδομένων και των εντολών διακρίνονται σε ασύρματα, ενσύρματα ή σε ένα συνδυασμό των δύο τεχνολογιών. Η αρχιτεκτονική τους είναι ίδια ανεξαρτήτως του μέσου μετάδοσης. Συγκεκριμένα, αποτελούνται από τρεις δομικές μονάδες, οι οποίες ανταλλάσσουν δεδομένα ανά τακτά χρονικά διαστήματα και είναι [67]-[69]:

1. Ο Ελεγκτής Φωτιστικού (Outdoor Luminaire Controller-OLC): Πρόκειται για τον τερματικό κόμβο του συστήματος. Τοποθετείται συνήθως στο εσωτερικό του φωτιστικού σε σύνδεση με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό ελέγχου (ECG). Η κυριότερη λειτουργία του είναι η ρύθμιση της φωτεινής ροής του φωτιστικού με βάση κάποιο κοινό πρωτόκολλο ελέγχου. Επιπλέον, διαθέτει μετρητές για την καταγραφή της κατανάλωσης, της τάσης τροφοδοσίας του φωτιστικού, του σήματος ελέγχου, του ρεύματος οδήγησης στην περίπτωση των φωτιστικών LED και άλλων μεγεθών, καθώς και την αποστολή της καταγραφής ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ο OLC έχει δυνατότητα επικοινωνίας με άλλους ελεγκτές αλλά και με τον κεντρικό ελεγκτή. Τέλος, μπορεί να συνδεθεί με αισθητήρες PIR, φωτοκύτταρα κλπ.
2. Ο Κεντρικός Ελεγκτής ή Ελεγκτής Τομέα (Segment Controller): Πρόκειται για τον συγκεντρωτή του συστήματος που έχει ως κύρια λειτουργία την συγκέντρωση μετρήσεων από έναν αριθμό OLC και την προώθηση των μετρήσεων προς το Κεντρικό Σύστημα Διαχείρισης. Επίσης, προωθεί τις εντολές για ρύθμιση της φωτεινής ροής των φωτιστικών από το σύστημα διαχείρισης προς τους OLCs. Λειτουργεί, δηλαδή ως διαμεσολαβητής μεταξύ των δύο οντοτήτων του δικτύου.
3. Το Κεντρικό Σύστημα Διαχείρισης (Central Management System-CMS): Το σύστημα αυτό δέχεται το σύνολο της καταγραφείσας πληροφορίας,

επεξεργάζεται και αποθηκεύει τα ληφθέντα δεδομένα. Παράλληλα, με βάση την επεξεργασία, την παρέμβαση του χρήστη ή τις αποθηκευμένες ρυθμίσεις, στέλνει ανάλογες εντολές και πληροφορίες προς τους OLCs. Το CMS περιλαμβάνει την Γραφική Διεπαφή Χρήστη (Graphic User Interface-GUI), δηλαδή το λογισμικό της εφαρμογής, την βάση δεδομένων όπου αποθηκεύονται οι πληροφορίες και τα δεδομένα του συστήματος (π.χ. μετρήσεις, αναφορές σφαλμάτων κ.α.) και τον ή τους server όπου αυτά αποθηκεύονται.

Το παραπάνω δίκτυο μπορεί να αναλυθεί σε δύο υποδίκτυα. Το δίκτυο πρόσβασης (access network) είναι το τμήμα του δικτύου που αποτελείται από τους ελεγκτές φωτιστικού και από τον κεντρικό ελεγκτή. Το δίκτυο κορμού περιλαμβάνει τον κεντρικό ελεγκτή και το κεντρικό σύστημα διαχείρισης (backbone network). Η επικοινωνία στα δύο υποδίκτυα μπορεί να καθορίζεται από το ίδιο ή και από διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας.

6.6.1 Δικτυακές τοπολογίες

Τα συστήματα διαχείρισης οδοφωτισμού αποτελούν ένα δίκτυο συσκευών που επικοινωνούν μεταξύ τους (Machine to Machine Communication-M2M). Η τοπολογία ενός δικτύου εξαρτάται από την χωρική κατανομή των κόμβων του (τερματικών και συγκεντρωτών), τον τρόπο που αυτοί επικοινωνούν μεταξύ τους και την υπολογιστική τους ικανότητα. Τα είδη των κόμβων είναι δύο:

- Οι κόμβοι πλήρους λειτουργίας (Full Function Device-FFD): Μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως συντονιστές του δικτύου είτε ως ενδιάμεσοι κόμβοι. Εκτός από την δυνατότητα καταγραφής δεδομένων, μπορούν να επικοινωνήσουν με άλλους κόμβους, είτε πρόκειται για FFD είτε για RFD μεταφέροντας μηνύματα διαχείρισης και ελέγχου.
- Οι κόμβοι περιορισμένης λειτουργίας (Reduced Function Device-RFD): Πραγματοποιούν λειτουργίες καταγραφής και επικοινωνούν μόνο με κόμβους FFD. Ως εκ τούτου, δεν μπορούν να συντονίσουν το δίκτυο [70].

Κάθε είδος τοπολογίας χρειάζεται τουλάχιστον μια συσκευή πλήρους λειτουργίας (FFD) που θα έχει τον ρόλο του συντονιστή του δικτύου για να λειτουργήσει αποτελεσματικά.

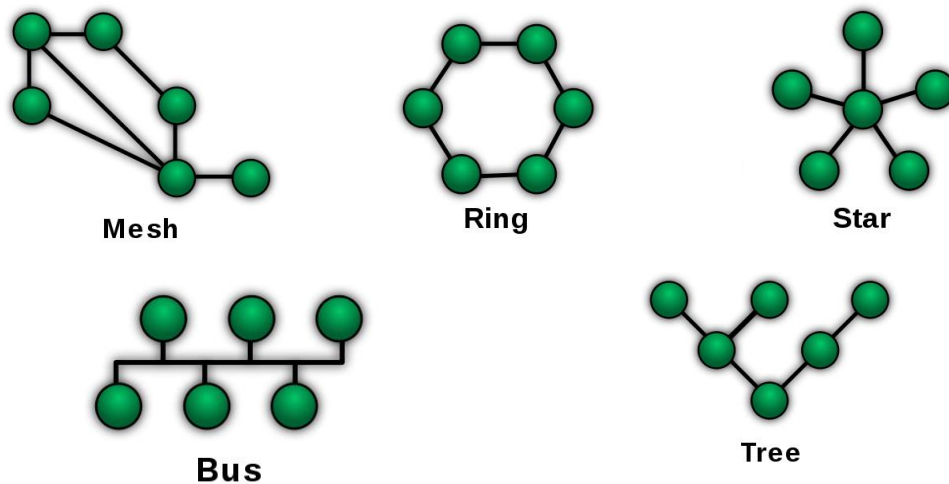
Σε ένα δίκτυο οι κόμβοι σχηματίζουν συγκεκριμένες δικτυακές τοπολογίες, όπως [70]:

- τοπολογία αστέρα (star): Ένας κόμβος FFD που έχει τον ρόλο του συγκεντρωτή και συντονιστή του δικτύου συνδέεται ακτινωτά με πλήθος

απλών κόμβων RFD. Ο περιορισμός της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι ότι οι RFD κόμβοι πρέπει να βρίσκονται εντός της εμβέλειας του συντονιστή.

- τοπολογία δένδρου (tree): Το δίκτυο σχηματίζεται από έναν κόμβο FFD στον ρόλο του συγκεντρωτή, ένα πλήθος ενδιάμεσων κόμβων FFD και ένα πλήθος τελικών κόμβων RFD που αδυνατούν να επικοινωνήσουν απευθείας με τον συγκεντρωτή. Οι τελικοί κόμβοι ομαδοποιούνται και επικοινωνούν με τον συγκεντρωτή μέσω ενός από τους ενδιάμεσους κόμβους που έχει τον ρόλο του κόμβου-πατέρα. Είναι φανερό ότι για την μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων από τελικό κόμβο στον συγκεντρωτή πραγματοποιεί πολυβηματική (multi-hop) δρομολόγηση. Για τον λόγο αυτό, η συγκεκριμένη τοπολογία ακολουθεί πρωτόκολλα δρομολόγησης.
- τοπολογία κατανεμημένου δικτύου (mesh): Η κατανεμημένη (mesh) τοπολογία παρουσιάζει ομοιότητες με την τοπολογία δέντρου, αφού και σε αυτήν την περίπτωση η δρομολόγηση είναι πολυβηματική και καθορίζεται από τα κατάλληλα πρωτόκολλα. Ωστόσο, παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα των εναλλακτικών διαδρομών επικοινωνίας. Μέσω της εναλλακτικής δρομολόγησης η επικοινωνία είναι εφικτή και σε περίπτωση αστοχίας ενός κόμβου. Αντίθετα, στην τοπολογία δένδρου δεν είναι εφικτή εναλλακτική δρομολόγηση σε περίπτωση αστοχίας του κόμβου-πατέρα.
- τοπολογία διαύλου (bus): Στην τοπολογία διαύλου όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο φυσικό δίαυλο. Τα πακέτα δεδομένων μπορούν να μεταφερθούν από έναν κόμβο σε όλους τους υπόλοιπους. Έχει μικρό κόστος υλοποίησης, αλλά σε περίπτωση διακοπής της σύνδεσης το δίκτυο παύει να λειτουργεί.
- τοπολογία βρόχου (ring): Οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν κλειστό βρόχο, δηλαδή κάθε κόμβος είναι συνδεδεμένος με άλλους δύο. Σε περίπτωση διακοπής μιας ζεύξης, ενεργοποιείται η αντίστροφη διαδρομή για την μεταφορά των δεδομένων.

Στον οδοφωτισμό, που τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα κατά μήκος του δρόμου οι καταλληλότερες τοπολογίες είναι η τοπολογία κατανεμημένου δικτύου και η τοπολογία διαύλου. Οι τοπολογίες αυτές υλοποιούνται από διάφορα πρωτόκολλα που αναλύονται παρακάτω. Γενικά, οι mesh τοπολογίες υλοποιούνται από πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας, ενώ οι bus από ενσύρματα.



Εικόνα 6.22: Δικτυακές τοπολογίες
 Πηγή: www.wikipedia.org

6.6.2 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και τεχνολογίες για το δίκτυο πρόσβασης

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τεχνολογίες, ασύρματες και ενσύρματες, που είναι κατάλληλες για την επικοινωνία στο δίκτυο πρόσβασης ενός συστήματος διαχείρισης φωτισμού. Για κάθε τεχνολογία επισημαίνονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά της.

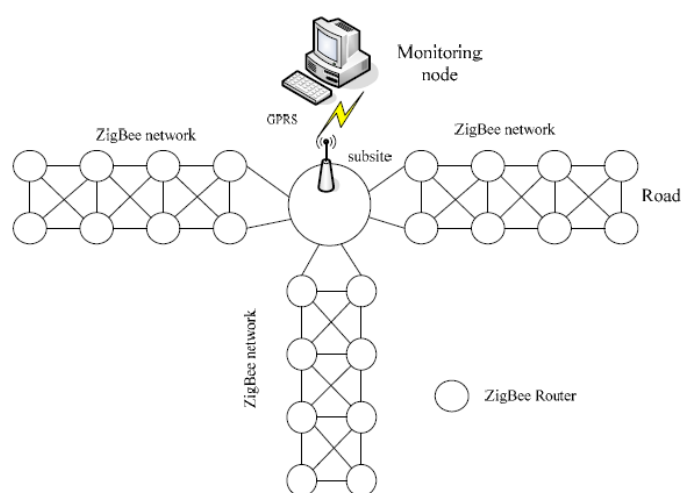
Πρωτόκολλο ZigBee

Το ZigBee είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας βασισμένο στο Πρότυπο IEEE 802.15.4 για επικοινωνίες μικρών αποστάσεων. Λειτουργεί στις αδεσμοποίητες ζώνες συχνοτήτων 868MHz, 915MHz, και 2.4GHz με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 20 kbps, 40 kbps και 250 kbps αντίστοιχα. Η τυπική ισχύς εκπομπής είναι 10 mW και η ακτίνα κάλυψης είναι από μερικές δεκάδες έως και πάνω από 100 m, ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης. Το πρωτόκολλο υποστηρίζει τοπολογίες αστέρα, δένδρου και κατανεμημένες.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το φθινό κόστος και η μικρή πολυπλοκότητα της εγκατάστασης. Επίσης, υποστηρίζει την πολυβηματική (multi hop) επικοινωνία και έχει δυνατότητα αυτό-οργάνωσης μέσω πρωτοκόλλου δυναμικής δρομολόγησης. Συνεπώς, καθιστά πολύ εύκολη την εισαγωγή νέων κόμβων στο δίκτυο (κλιμακωσιμότητα). Ένα δίκτυο επικοινωνιών βασισμένο στην τεχνολογία ZigBee μπορεί να περιλαμβάνει θεωρητικά παραπάνω από 65.000 κόμβους. Επίσης, διαθέτει υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής από ένα εύρος 16 καναλιών μετάδοσης ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές από άλλες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών που λειτουργούν στην ίδια φασματική ζώνη, όπως η τεχνολογία IEEE 802.11 (Wi-Fi).

Το κυριότερο μειονέκτημα της τεχνολογίας ZigBee είναι το μικρό μέγεθος αποθήκευσης και η μικρή υπολογιστική ισχύς των συσκευών που την χρησιμοποιούν, καθώς και ο χαμηλός ρυθμός δεδομένων. Επίσης, εμφανίζεται καθυστέρηση στην επεξεργασία και αποστολή δεδομένων.

Στα συστήματα οδοφωτισμού που βασίζονται στο πρωτόκολλο ZigBee, για λόγους αξιοπιστίας, hardware και χάρη στο μικρό κόστος της τεχνολογίας, κάθε ελεγκτής τομέα συνδέεται με 100-150 ελεγκτές φωτιστικού. Χάρη στον περιορισμένο αριθμό κόμβων ξεπερνιέται το πρόβλημα καθυστέρησης μετάδοσης. Επίσης, το πακέτο δεδομένων έχει μικρό μέγεθος και, συνεπώς, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης είναι επαρκής για τις ανάγκες της εφαρμογής [66],[70]-[72].



Εικόνα 6.23: Δίκτυο πρόσβασης mesh τοπολογίας βασισμένο στο πρωτόκολλο ZigBee
Πηγή: IEEE [71]

Πρωτόκολλο IPv6 Over Low Power Wireless Personal Area Networks-6LoWPAN

Το πρωτόκολλο 6LoWPAN είναι και αυτό βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και χρησιμοποιείται για την M2M επικοινωνία συσκευών σε ένα mesh δίκτυο. Λειτουργεί στην ζώνη των 2.4GHz, έχει ρυθμό μετάδοσης 250 kbps και ακτίνα κάλυψης μερικές δεκάδες μέτρα. Υποστηρίζει διευθυνσιοδότηση IPv6, γεγονός που το καθιστά άμεσα συμβατό με IP δίκτυα. Επίσης υποστηρίζει μεγαλύτερα πακέτα πληροφορίας σε σχέση με το IEEE 802.15.4 (βάσει του IEEE 802.15.4 το μέγεθος του πακέτου είναι 127 bytes, ενώ βάσει του IPv6 το ελάχιστο πακέτο είναι 1280 bytes).

Οι συσκευές που το υποστηρίζουν έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, διαθέτει υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Το κυριότερο πλεονέκτημα του, όμως, είναι η διευθυνσιοδότηση βάσει του IPv6 (48 bits) προσφέρει την δυνατότητα υποστήριξης αναρίθμητων συσκευών στο δίκτυο.

Τα μειονεκτήματα του 6LoWPAN είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα και καθυστέρηση διάδοσης εξαιτίας του μεγαλύτερου πακέτου πληροφορίας [73].

Δίκτυα κινητών επικοινωνιών

Το υπάρχον δίκτυο κινητής επικοινωνίας αποτελεί καλή επιλογή για την μεταφορά της πληροφορίας από τους OLCs στον κεντρικό ελεγκτή. Η πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί μέσω των διαθέσιμων τεχνολογιών κινητών επικοινωνιών GSM και GPRS.

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών έχουν ως βασικό πλεονέκτημα το ότι είναι ήδη εγκατεστημένα, γεγονός που απαλλάσσει εταιρείες από το κόστος εγκατάστασης νέας τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Η χωρητικότητα του δικτύου είναι επαρκής για εφαρμογές διαχείρισης φωτισμού. Τέλος, το ποσοστό κάλυψης των υπάρχοντων δικτύων αγγίζει το 100%.

Ένα σοβαρό μειονέκτημα των δικτύων αυτών είναι ότι η μετάδοση των δεδομένων μπορεί να απορριφθεί σε ώρες αιχμής, δεδομένου ότι ήδη χρησιμοποιούνται από πελάτες κινητής τηλεφωνίας. Επίσης, οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας ενδέχεται να θέσουν υψηλό κόστος μίσθωσης των δικτύων τους.

Powerline Communications (PLC)

Είναι η ενσύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιεί τους αγωγούς του δικτύου ηλεκτροδότησης για την μετάδοση σήματος υψηλής συχνότητας σε ρυθμούς που φτάνουν τα 2-3 Mbps. Συνήθως, η τεχνολογία PLC συναντάται σε υβριδικά δίκτυα για την επικοινωνία των ελεγκτών φωτιστικού με τον κεντρικό ελεγκτή, ενώ στην συνέχεια χρησιμοποιείται άλλο είδος τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας.

Μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι η ύπαρξη των αγωγών που εξοικονομούν για τις εταιρείες συστημάτων διαχείρισης το κόστος εγκατάστασης τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Επίσης παρέχεται μεγάλη γεωγραφική κάλυψη.

Από την άλλη, το καλώδιο είναι ένα έντονα θορυβώδες μέσο που εισάγει μεγάλη εξασθένηση και παραμόρφωση. Έτσι, είναι αναγκαία η χρήση επαναληπτών (repeaters), γεγονός που αυξάνει το κόστος υλοποίησης του δικτύου πρόσβασης. Επίσης, λόγω της τοπολογίας διαύλου του δικτύου Χαμηλής Τάσης (ΧΤ), δεν προσφέρεται εναλλακτική δρομολόγηση δεδομένων σε περίπτωση βλάβης [74].

6.6.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και τεχνολογίες στο δίκτυο κορμού

Οι κυριότερες διαθέσιμες τεχνολογίες που είναι κατάλληλες για την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή τομέα και CMS ενός συστήματος οδοφωτισμού είναι οι τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας στην προηγούμενη ενότητα. Άλλες διαθέσιμες

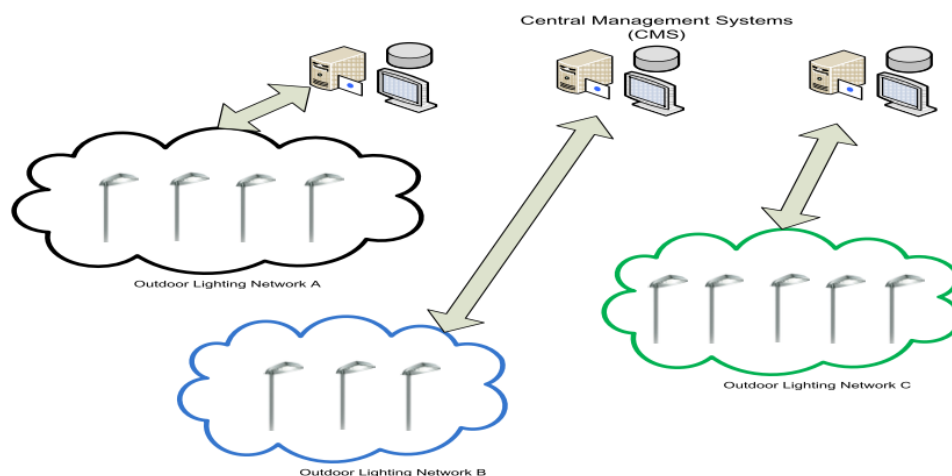
τεχνολογίες είναι η BB-PLC (Broad Band Powerline Communication), καθώς και η τεχνολογία Ethernet, οι οποίες είναι ενσύρματες. Ωστόσο, επειδή συνήθως οι servers του συστήματος δεν βρίσκονται κοντά στην εγκατάσταση, αλλά σε μεγάλες αποστάσεις που εξασθενούν το σήμα, καλό είναι να αποφεύγονται. Σε κάποιες περιπτώσεις, μάλιστα, οι servers βρίσκονται σε χώρο του κατασκευαστή και η πρόσβαση στο λογισμικό διαχείρισης γίνεται μέσω Internet. Σε αυτήν την περίπτωση το δίκτυο κινητών επικοινωνιών είναι ο μόνος τρόπος επικοινωνίας.

6.6.4 Διαλειτουργικότητα

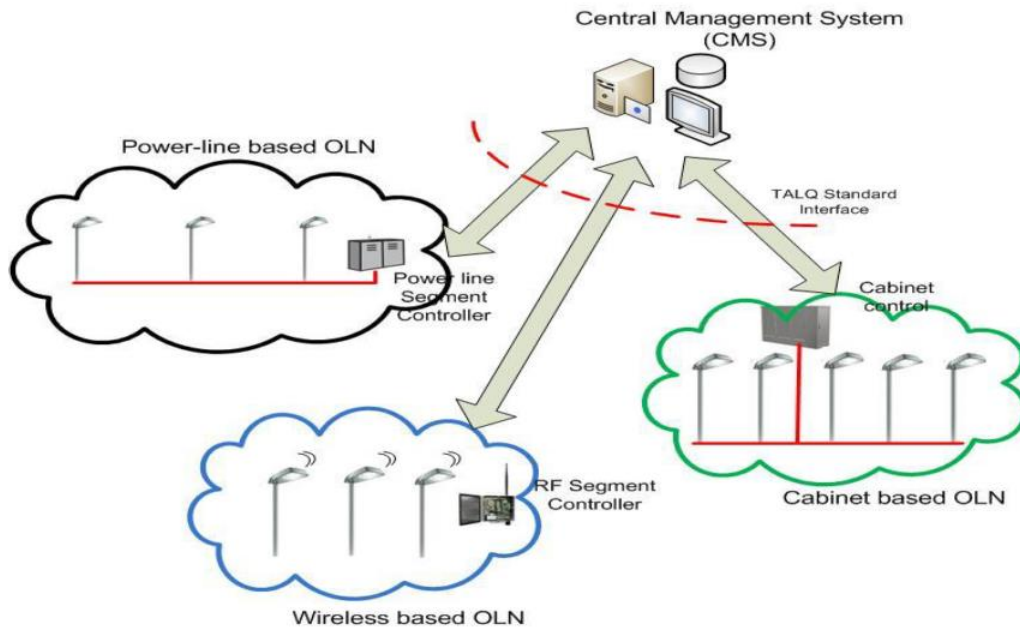
Διαλειτουργικότητα, σύμφωνα με τον ορισμό του National Institute of Standards and Technology (NIST) των Η.Π.Α., είναι «η ικανότητα δύο ή περισσότερων δικτύων, συστημάτων, συσκευών, εφαρμογών να ανταλλάσσουν και να χρησιμοποιούν δεδομένα άμεσα, με ασφάλεια, αποτελεσματικότητα και με μικρή ή καθόλου ενόχληση στους χρήστες».

Με την αυξανόμενη εφαρμογή των συστημάτων διαχείρισης οδοφωτισμού, η ανάγκη για διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας αρχίζει να γίνεται όλο και πιο επιτακτική.

Για τον λόγο αυτό, ιδρύθηκε η κοινοπραξία TALQ από μερικούς από τους κορυφαίους κατασκευαστές στον τομέα του φωτισμού και των συστημάτων διαχείρισης. Στόχος της κοινοπραξίας είναι η ανάπτυξη ενός διεθνώς αποδεκτού προτύπου για τον καθορισμό της διεπαφής λογισμικού διαχείρισης για τον έλεγχο και την επίβλεψη ετερογενών συστημάτων εξωτερικού φωτισμού. Με αυτό το πρότυπο, δηλαδή, θα είναι εφικτός ο έλεγχος όλων των δικτύων εξωτερικού φωτισμού μιας περιοχής από ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης [75].



Εικόνα 6.24: Τρία ετερογενή δίκτυα φωτισμού που επικοινωνούν με τρία CMS
Πηγή: www.talq-consortium.org



Εικόνα 6.25: Τρία ετερογενή δίκτυα που επικοινωνούν με ένα CMS
 Πηγή: www.talq-consortium.org

Κεφάλαιο 7: Εγκατάσταση και Εφαρμογή Συστημάτων Προσαρμοστικού φωτισμού

7.1 Εφαρμογή στην Ευρώπη

Ισπανία

Βαρκελώνη

Συνεργάτες	
Barcelona Digital	Technology Center, coordinator
Arelsa	Εταιρεία με συστήματα διαχείρισης
Circutor	Ενεργειακή Εταιρεία
E-controls	Εταιρεία με συστήματα διαχείρισης
Prysmian	Εταιρεία με οπτικές ίνες, αγωγούς
Santa&Cole	Εταιρεία φωτιστικών
SECE	Εταιρεία με συστήματα διαχείρισης
Semai Lighting	Εταιρεία φωτιστικών LED

Περιγραφή/Σχόλια : Στην Βαρκελώνη, στην περιοχή 22nd district στην οδό Mas de Roda, έχουν εγκατασταθεί πιλοτικά στα πλαίσια του SIIUR project (Solucion Integral d'Infraestructuras Urbanas) φωτιστικά LED, τα οποία κατά την διάρκεια της νύχτας που η κίνηση είναι πολύ περιορισμένη είναι απενεργοποιημένα. Διαθέτουν ωστόσο αισθητήρες και ανάβουν διαδοχικά με την ανίχνευση ανθρώπινης παρουσίας [76].

Κωμόπολη Bollulos de la Mitacion

Συνεργάτες	
Municipality of Bollulos de la Mitacion	Δημοτική Αρχή
F.ENER.CO.M.	Επιχείρηση Ενεργειακών Υπηρεσιών (EEY)
Endesa Ingenieria	Τεχνική Εταιρεία
Enel Sole	Εταιρεία φωτισμού

Περιγραφή/Σχόλια : Στην κωμόπολη Bollulos de la Mitacion, στην Νότια Ισπανία αντικαταστάθηκε τον Μάιο του 2011 εξ ολοκλήρου το δημόσιο δίκτυο οδοφωτισμού. Συγκεκριμένα, αντικαταστάθηκαν 2027 ενεργοβόρα φωτιστικά HID με μέτρια ή και χαμηλή απόδοση και υψηλά επίπεδα διαφεύγοντος φωτισμού. Η ετήσια κατανάλωση πριν την αντικατάσταση ήταν 1.26 GWh. Ένα ποσοστό των

φωτιστικών HID αντικαταστάθηκαν με φωτιστικά LED ενώ τα υπόλοιπα με φωτιστικά HID υψηλής απόδοσης. Τα φωτιστικά LED ελέγχονται από σύστημα κεντρικής διαχείρισης. Από τα νέα φωτιστικά HID κάποια διαθέτουν ballast με δυνατότητα dimming και κάποια συνδέονται με σταθεροποιητές και ρυθμιστές τάσης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στον πίνακα τροφοδοσίας. Υπολογίστηκε ότι η ενέργεια που εξοικονομείται είναι 0,54 GWh (43%). Το έργο χρηματοδοτήθηκε εξ ολοκλήρου από Εταιρεία Υπηρεσιών Ενέργειας της Μαδρίτης. Σύμφωνα, με την σύμβαση που υπογράφηκε η εταιρεία αναλαμβάνει τις υπηρεσίες συντήρησης της εγκατάστασης για περίοδο 10 ετών, κατά την οποία θα αμείβεται με το 90% του ποσού που προβλέπεται να εξοικονομεί ο Δήμος ετησίως. Μετά το πέρας της δεκαετίας η δημοτική αρχή αναλαμβάνει την διαχείριση του έργου [77].

Πόλη Salinas de Pamplona

Συνεργάτες	
Municipality of Pamplona	Δημοτική Αρχή
Luix (San Sebastian)	Εταιρεία με συστήματα διαχείρισης φωτισμού
UVAX Concepts (Valencia)	Εταιρεία με συστήματα διαχείρισης

Περιγραφή/Σχόλια: Στο χωριό Salinas της Ισπανίας 162 φωτιστικά LED τοποθετήθηκαν για να αντικαταστήσουν φωτιστικά HPS. Τα φωτιστικά τεχνολογίας LED που εγκαταστάθηκαν έχουν την δυνατότητα dimming μέσω συστήματος τηλεδιαχείρισης, βασισμένο σε τεχνολογία PLC. Τα φωτιστικά σώματα είναι προγραμματισμένα να ανάβουν και να σβήνουν με χρονοδιακόπτη και να λειτουργούν με προ-ρυθμισμένα σενάρια dimming. Επιπλέον, διαθέτουν και αισθητήρες ώστε να λειτουργούν στο 80% της ονομαστικής λειτουργίας όταν ανιχνεύεται κινούμενο όχημα ή πεζός [78].

Ολλανδία

Πανεπιστήμιο TU Delft

Συνεργάτες	
Delft University of Technology	Πανεπιστήμιο
Tvilight	Εταιρεία με συστήματα διαχείρισης φωτισμού

Περιγραφή/Σχόλια : Στην πανεπιστημιούπολη του TU Delft, έχει εγκατασταθεί έξυπνο σύστημα οδοφωτισμού το οποίο καταναλώνει έως 80% λιγότερη ενέργεια

από το αντικατασταθέν. Αποτελείται από φωτιστικά LED με δυνατότητα dimming, αισθητήρες κίνησης, συσκευή ελέγχου και κεντρική μονάδα ελέγχου. Τα δύο τελευταία είναι τοποθετημένα σε κάθε ένα από αυτά τα φωτιστικά. Η επικοινωνία με την κεντρική μονάδα ελέγχου γίνεται ασύρματα. Τα φωτιστικά είναι ρυθμισμένα να εκπέμπουν το 20% της φωτεινής ροής τους μέχρι την ανίχνευση κάποιου πεζού/ποδηλάτη/οχήματος, οπότε και λειτουργούν στο 100% το ένα μετά το άλλο διαδοχικά. Αφού παραμείνουν σε αυτήν την κατάσταση για λίγα δευτερόλεπτα μετά την διέλευση των πεζών, στην συνέχεια η φωτεινή ροή μειώνεται στο 20%. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσης βλαβών [79].

Επαρχία Utrecht

Συνεργάτες	
Province of Utrecht	Τοπική Αρχή
Luminext	Εταιρεία Φωτισμού

Περιγραφή/Σχόλια : Στην Εθνική οδό N419 της επαρχίας της Ουτρέχτης 117 ενεργοβόρα φωτιστικά αντικαταστάθηκαν με LED και ελέγχονται μέσω συστήματος διαχείρισης τεχνολογίας PLC της Luminext [80].

Πόλη Rotterdam

Συνεργάτες	
Municipality of Rotterdam	Δημοτική Αρχή
Rotterdam Office for Sustainability and Climate Change	Τομέας Βιωσιμότητας και Κλιματικής Αλλαγής
Philips Lighting	Εταιρεία Φωτισμού

Περιγραφή/Σχόλια : Ένα ποσοστό φωτιστικών της πόλης αντικαταστάθηκαν με φωτιστικά LED της εταιρείας Philips και ελέγχονται μέσω του Κεντρικού Συστήματος Διαχείρισης CityTouch της ίδιας εταιρείας. Το σύστημα επιτρέπει τον έλεγχο των φωτιστικών σε ομάδες και μεμονωμένα [58].

Γαλλία

Πόλη Senart en Essonne

Συνεργάτες	
Municipality of Senart en Essonne	Δημοτική Αρχή
Echelon	Εταιρεία με συστήματα διαχείρισης

Περιγραφή/Σχόλια : Περισσότερα από 3.100 φωτιστικά στην πόλη Πόλη Senart en Esonne της Γαλλίας δρόμου ελέγχονται μέσω του συστήματος διαχείρισης της Echelon που βασίζεται στο πρωτόκολλο LonWorks [81].

Πόλη Bordeaux

Συνεργάτες	
Municipality of Bordeaux	Δημοτική Αρχή
Thorn Lighting	Εταιρεία φωτισμού
Politecnico di Torino, Dipartimento de Automatica e Informatica, Italy	Πανεπιστήμιο
Universite Paul Sabatier, Toulouse UPS-LAPLACE , France	Πανεπιστήμιο
Riga Technical University, RTU DESC, Latvia	Πανεπιστήμιο
Universidade de Aveiro, Portugal	Πανεπιστήμιο

Περιγραφή/Σχόλια : Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού project Lites εγκαταστάθηκαν σε ένα δρόμο σε κατοικημένη περιοχή στην πόλη Bordeaux φωτιστικά LED με έξυπνο σύστημα διαχείρισης φωτισμού που διαθέτει αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης [82].

Νορβηγία

Πόλη Oslo

Συνεργάτες	
Viken Nett	Τομέας του παρόχου ηλεκτρικού ρεύματος που είναι υπεύθυνος για τον φωτισμό
Echelon	Εταιρεία συστημάτων διαχείρισης
Philips Lighting	Εταιρεία φωτισμού
Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)	Διεύθυνση διαχείρισης υδάτινων πόρων και ενέργειας
Norwegian University of Science and Technology	Πανεπιστήμιο
ENOVA	Επιχείρηση Ενεργειακών Υπηρεσιών (ΕΕΥ)
Municipality of Oslo	Δημοτική Αρχή
Norwegian Directorate of Public	Διεύθυνση δημόσιων έργων

Construction and Property	
---------------------------	--

Περιγραφή/Σχόλια : Η Νορβηγία είναι πρωτοπόρα στον τομέα ευφών συστημάτων διαχείρισης. Ήδη από το 2006 έχει εγκατασταθεί έξυπνο σύστημα διαχείρισης φωτισμού τεχνολογίας PLC. Μέσω αυτού ελέγχονται τουλάχιστον 55.000 φωτιστικά. Η πρωτοβουλία των Νορβηγών ενέπνευσε και άλλες Ευρωπαϊκές πόλεις και αποτέλεσε έμπνευση για το E-streetlight project [4].

Φινλανδία

Πόλη Tampere

Συνεργάτες	
Municipality of Tampere	Δημοτική Αρχή
C2 SmartLight	Εταιρεία συστημάτων διαχείρισης

Περιγραφή/Σχόλια : Τα 38.000 φωτιστικά της πόλης ελέγχονται από το 2008 με το σύστημα διαχείρισης της φινλανδικής C2 SmartLight [83].

Πόλη Helsinki

Συνεργάτες	
Municipality of Helsinki	Δημοτική Αρχή
C2 SmartLight	Εταιρεία συστημάτων διαχείρισης

Περιγραφή/Σχόλια : Η εθνική οδός E18 περνά έξω από το Ελσίνκι και ενώνει το ανατολικό σύνορο της Φινλανδίας με την πόλη Kotka. Τα 1300 φωτιστικά της εθνικής οδού HPS ελέγχονται ασύρματα με το σύστημα διαχείρισης της C2 SmartLight. Το επίπεδο φωτισμού προσαρμόζεται ανάλογα με την κυκλοφοριακή ροή και τις καιρικές συνθήκες. Και άλλες εθνικές οδοί που συνδέουν το Ελσίνκι με άλλες πόλεις της Φινλανδίας διαθέτουν RF ή PLC έξυπνα συστήματα διαχείρισης [83].

Βέλγιο

Πόλη Grâce-Hollogne

Συνεργάτες	
Municipality of Grâce-Hollogne	Δημοτική Αρχή
Περιφέρεια της Wallonia	Τοπική Αρχή

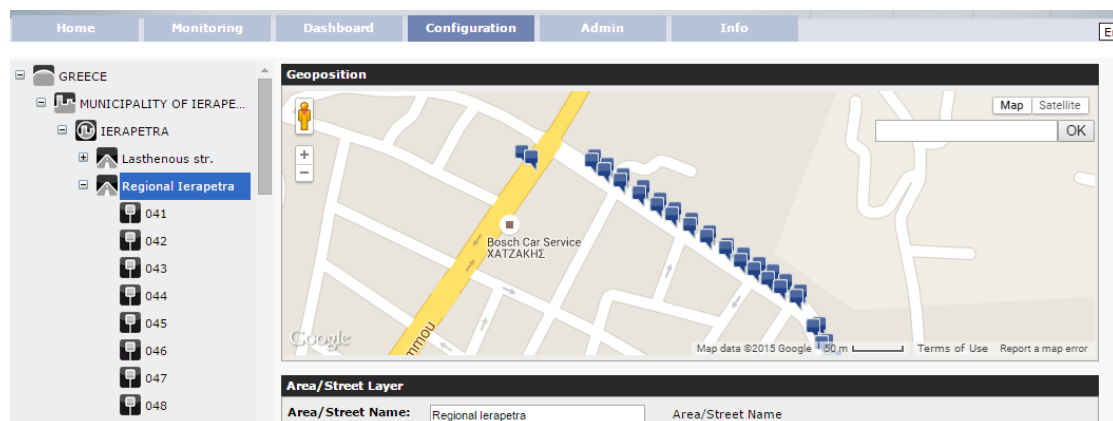
SPI	Υπηρεσία Ανάπτυξης της περιοχής της Λιέγης
Universite de Liege	Πανεπιστήμιο
Universite Catholique de Louvain	Πανεπιστήμιο
SmartNodes	Εταιρεία συστημάτων διαχείρισης φωτισμού
Meusinvest-SpinVenture	Οργανισμός χρηματοδότησης
VIVES- Louvain Technology Fund	Οργανισμός χρηματοδότησης

Περιγραφή/Σχόλια : Το πιλοτικό project GEPPADI εφαρμόστηκε στην πόλη Grâce-Hollogne του Βελγίου, σε ένα πάρκο δραστηριοτήτων αρχικά και αργότερα σε δύο χώρους στάθμευσης και σε έναν ποδηλατόδρομο. Περιλαμβάνει την εγκατάσταση έξυπνου συστήματος διαχείρισης με ανιχνευτές κίνησης που ανιχνεύουν και τον τύπο του χρήστη (πεζός, ποδηλάτης, όχημα) με βάση την ταχύτητα. Οι συνεργάτες του project ίδρυσαν μια εταιρεία που εξειδικεύεται στην διαχείριση του φωτισμού, την SmartNodes [84].

7.2 Εφαρμογές στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, έχουν αρχίσει να πραγματοποιούνται έργα προσαρμοστικού φωτισμού τα τελευταία δύο χρόνια. Αρκετοί δήμοι έχουν προκηρύξει δημόσιους ανοιχτούς διαγωνισμούς. Τα έργα αυτά χρηματοδοτούνται εξ ολοκλήρου από το ΕΣΠΑ και είναι έργα μικρής κλίμακας. Κάποια από αυτά τα έργα έχουν ήδη εγκατασταθεί, ενώ άλλα είναι σε φάση εγκατάστασης.

Για παράδειγμα, στην Ιεράπετρα Κρήτης 133 φωτιστικά HPS των 250 W αντικαταστάθηκαν με φωτιστικά LED των 106 Watt. Στα φωτιστικά είναι τοποθετημένοι ελεγκτές που επικοινωνούν μεταξύ τους και με τον κεντρικό ελεγκτή με βάση το πρωτόκολλο ZigBee. Ο κεντρικός ελεγκτής επικοινωνεί με το CMS με βάση την τεχνολογία GPRS [86].



Εικόνα 7.1: Άποψη του GUI του συστήματος της Ιεράπετρας

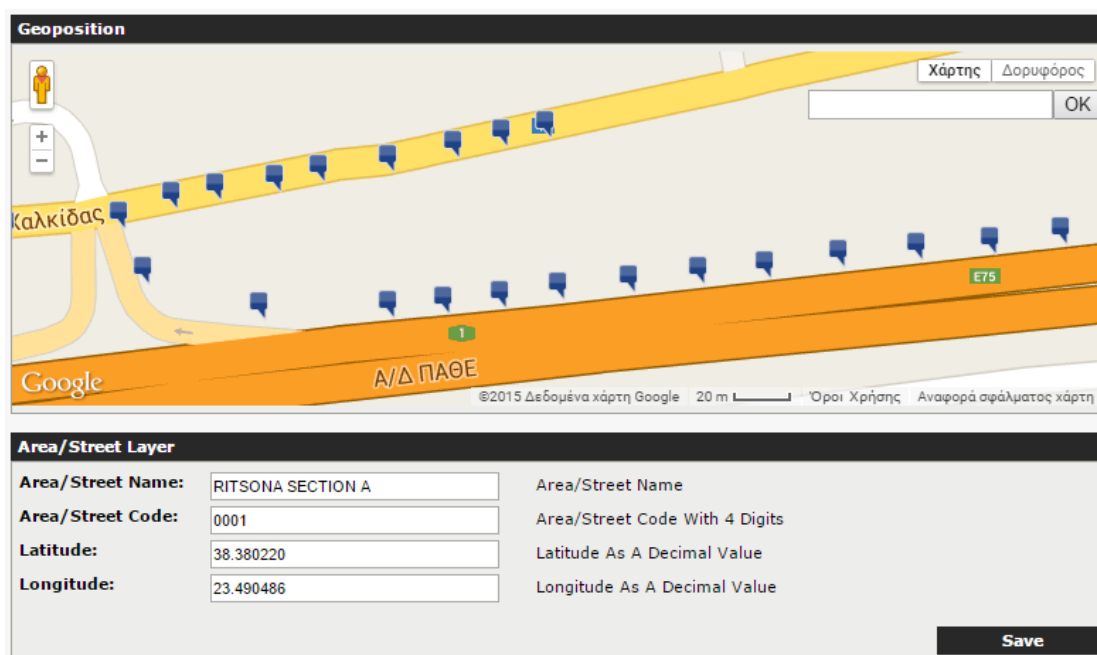
Επιπλέον, στην Κάλυμνο πρόκειται να εγκατασταθούν 110 φωτιστικά σώματα LED με σύστημα διαχείρισης βασισμένο στο ενσύρματο πρωτόκολλο LonWorks. Στα Ιωάννινα 116 φωτιστικά με λαμπτήρες Υδραργύρου των 125W και 250 W πρόκειται να αντικατασταθούν με ισάριθμα φωτιστικά LED των 77 W και 70 W αντίστοιχα συνδεδεμένα με ασύρματο σύστημα διαχείρισης. Τέλος, στον Δήμο Σητείας πρόκειται να εγκατασταθεί σε πεζόδρομο αυτόνομο σύστημα προσαρμοστικού φωτισμού με PIR αισθητήρες και φωτοβολταϊκό πάνελ.

Πέρα από τους Δήμους, και κάποιες από τις εταιρείες κατασκευής και εκμετάλλευσης μεγάλων αυτοκινητοδρόμων έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνολογία. Για παράδειγμα, στην Εθνική Οδό Αθηνών Λαμίας στο τμήμα του Ανισόπεδου Κόμβου Ριτσώνας έχει εγκατασταθεί πιλοτικά ασύρματο σύστημα διαχείρισης με φωτιστικά τεχνολογίας LED. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί η τεχνική έκθεση και η αξιολόγηση επένδυσης της συγκεκριμένης εγκατάστασης,

Κεφάλαιο 8: Τεχνοοικονομική Έκθεση Εγκατάστασης Πιλοτικού Συστήματος Τηλεδιαχείρισης Φωτισμού στον Α/Κ Ριτσώνας

8.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός της παρούσας τεχνικής έκθεσης είναι η παρουσίαση της πιλοτικής εγκατάστασης φωτιστικών τεχνολογίας LED στον ανισόπεδο κόμβο Ριτσώνας της Εθνικής οδού Αθηνών-Λαμίας και συγκεκριμένα στην περιοχή που περιλαμβάνει το τμήμα του ανισόπεδου κόμβου στην λωρίδα επιβράδυνσης προς Ριτσώνα (Τμήμα 1) και το τμήμα της εξόδου προς Ριτσώνα (Τμήμα 2). Το πιλοτικό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε για λογαριασμό της Νέας Οδού, δηλαδή της εταιρείας που κατασκεύασε και εκμεταλλεύεται αυτό το τμήμα της Εθνικής Οδού.



Εικόνα 8.1: Η εγκατάσταση στο λογισμικό Owlet Nightshift

8.2 Πρότυπο οδοφωτισμού

Η μελέτη της εν λόγω εγκατάστασης έγινε με βάση το αναθεωρημένο πρότυπο EN 13201 για τον οδοφωτισμό, το οποίο είναι σε ισχύ από το 2004 με την Υπουργική Απόφαση υπ' αριθμόν Δ13/β/οικ. 16522(ΦΕΚ Β'1792 3.12.2004), όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5.

Ειδικά για τον ηλεκτροφωτισμό αυτοκινητοδρόμων ταχείας κυκλοφορίας είχαν εγκριθεί το 2003 οι Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ)- Τεύχος 9: «Οδικές σήραγγες, έργα Η/Μ και φωτισμός υπαίθριων οδικών έργων» με την αρ. πρωτ. ΔΜΕΟ/α/0/285/19-2-03 Υπουργική Απόφαση. Σύμφωνα με τις οδηγίες αυτές τα τμήματα των κυκλοφοριακών κόμβων των αυτοκινητοδρόμων θα πρέπει να έχουν συνεχή ηλεκτροφωτισμό που να καλύπτει τις παρακάτω απαιτήσεις:

1. Μέση Λαμπρότητα : $L_{av} \geq 2$ cd/m
2. Διαμήκης Ομοιομορφία για κάθε λωρίδα : $U_1 \geq 0.7$
3. Συνολική Ομοιομορφία : $U_o \geq 0.4$
4. Κατώφλι Προσαύξησης : $T1 < 10$ %
5. Δείκτης Λαμπρότητας Περιβάλλοντος Χώρου : $SR > 0.5$

Ωστόσο σύμφωνα με την Εγκύκλιο 1/2005 (Αρ. Πρωτ. Δ13β/0/4318) δεν ισχύουν πλέον τα στοιχεία των οδηγιών που είναι σε αντίθεση με τα πρότυπα ΕΛΟΤ ή τα Ευρωπαϊκά πρότυπα.

Η διαδικασία κατηγοριοποίησης για τα δύο τμήματα του αυτοκινητόδρομου αναλύεται εκτενώς παρακάτω.

8.3 Κατηγοριοποίηση κατά EN 13201 – 1:2014

Τμήμα Α/Κ στην λωρίδα επιβράδυνσης προς Ριτσώνα (Τμήμα 1)

Για το συγκεκριμένο τμήμα του Α/Κ στον Πίνακα 8.1 γίνεται η αποτίμηση των παραμέτρων για την επιλογή της κλάσης του δρόμου.

Πίνακας 8.1 : Πίνακας αποτίμησης παραμέτρων κλάσης Μ για το Τμήμα 1

Παράμετρος	Επιλογές	Περιγραφή	Σταθμισμένη Τιμή V_w
Όριο Ταχύτητας	Υψηλή	$70 < v < 100$ km/h	1
Κυκλοφοριακή ροή		Αυτοκινητόδρομοι, δρόμοι πολλών λωρίδων	
	Υψηλή	>65% της μέγιστης χωρητικότητας	1
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Μόνο μηχανοκίνητα		0
Ύπαρξη διαζώματος	Ναι		0
Πυκνότητα διασταυρώσεων		Α/Κ, απόσταση μεταξύ γεφύρων, km	
	Μέτρια	≤ 3	0
Σταθμευμένα οχήματα	Μη παρόντα		0
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Χαμηλή		-1
Δυσκολία πλοήγησης	Δύσκολη		1

Το άθροισμα των σταθμισμένων τιμών είναι $V_{ws} = 2$. Επομένως, η κλάση φωτισμού είναι $M = 6 - V_{ws} = 4$ (M4).

Τμήμα προσέγγισης προς Ριτσώνα (Τμήμα 2)

Για την εύρεση της κλάσης του τμήματος 2, η αποτίμηση των παραμέτρων γίνεται στον Πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.2 : Πίνακας αποτίμησης παραμέτρων κλάσης M για το Τμήμα 2

Παράμετρος	Επιλογές	Περιγραφή	Σταθμισμένη Τιμή V_w
Όριο Ταχύτητας	Μέτρια	$40 < v < 70$ km/h	-1
Κυκλοφοριακή ροή		Αυτοκινητόδρομοι, δρόμοι πολλών λωρίδων	
	Υψηλή	>65% της μέγιστης χωρητικότητας	1
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Μικτή		1
Ύπαρξη διαζώματος	Όχι		1
Πυκνότητα διασταυρώσεων		Διασταυρώσεις/km	
	Μέτρια	≤ 3	0
Σταθμευμένα οχήματα	Μη παρόντα		0
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Χαμηλή		-1
Δυσκολία πλοήγησης	Δύσκολη		1

Το άθροισμα των σταθμισμένων τιμών είναι $V_{ws} = 2$. Επομένως, η κλάση φωτισμού της επαρχιακής οδού είναι $M = 6 - V_{ws} = 4$ (M4).

8.4 Φωτοτεχνικές απαιτήσεις κλάσης φωτισμού M4

Με βάση την Τεχνική Έκθεση CIE 115-2010 ορίζονται οι απαιτούμενες φωτοτεχνικές επιδόσεις.

Πίνακας 8.3: Απαιτήσεις κλάσης M4 κατά CIE 115-2010

Κατηγορία	Λαμπρότητα στεγνού οδοστρώματος			Φυσιολογική Θάμβωση	Δείκτης Φωτισμού Περιβάλλοντος
	L_{avg} (cd/m ²) (min)	U_o (min)	U_i (min)	TI (%) (max)	SR (min)
M4	0,75	0,4	0,6	15	0,5

- ✓ L_{avg} : Μέση τιμή λαμπρότητας (cd/m²)
- ✓ U_o : Το πηλίκο της ελάχιστης τιμής λαμπρότητας στο υπό μελέτη τμήμα προς την μέση τιμή
- ✓ U_i : Διαμήκης Ομοιομορφία
- ✓ TI: Φυσιολογική Θάμβωση που προκαλείται από το φωτιστικό σώμα (%)
- ✓ SR: Πηλίκο της μέσης έντασης φωτισμού των παρακείμενων λωρίδων προς την μέση τιμή των λωρίδων κυκλοφορίας οχημάτων

8.5 Υπολογισμός συντελεστή συντήρησης

Ο συντελεστής συντήρησης της εγκατάστασης που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της φωτοτεχνικής μελέτης είναι ίσος με 0,8 (MF=0,8). Η τιμή αυτή είναι απόλυτα ασφαλής καθώς η διάρκεια ζωής των LED είναι 100.000 ώρες για το 80% της απόδοσης, δηλαδή περίπου 25 έτη από την αρχή της εγκατάστασης. Λόγω της κατασκευής των φωτιστικών με δείκτη προστασίας IP66, ξεχωριστό τμήμα οπτικών και ηλεκτρικών μερών κλπ. η επίδραση της ρύπανσης είναι αμελητέα και δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τιμή του MF.

8.6 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τμημάτων της εγκατάστασης

Η γεωμετρία του δρόμου των δύο τμημάτων της περιοχής της εγκατάστασης, βάσει της οποίας πραγματοποιήθηκε η φωτοτεχνική μελέτη φαίνεται στους κάτωθι πίνακες.

Πίνακας 8.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτοτεχνική μελέτη του Τμήματος 1

Λωρίδες κυκλοφορίας	Θεωρούνται δυο λωρίδες και μια Λ.Ε.Α.
Διαστάσεις κάθε κατεύθυνσης	12,60m
Πλάτος και ύψος διαχωριστικού	1,00m & 0,80m αντίστοιχα
Ύψος φωτιστικών	12,00m
Απόσταση και διάταξη φωτιστικών	35,50 m μονόπλευρα
Προεξοχή σημείου φωτός	-0,40m
Κλίση φωτιστικού	0°
Ασφαλτοτάπητας	CIE R3, Q ₀ =0.070
Κάλυψη κλάσης	M4 κατά EN 13201

Πίνακας 8.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτοτεχνική μελέτη του Τμήματος 2

Λωρίδες κυκλοφορίας	Τρεις λωρίδες
Διαστάσεις κάθε κατεύθυνσης	12,015m
Ύψος φωτιστικών	12,00m
Απόσταση και διάταξη φωτιστικών	25,00 m μονόπλευρα
Προεξοχή σημείου φωτός	-0,40m
Κλίση φωτιστικού	0°
Ασφαλτοτάπητας	CIE R3, Q ₀ =0.070
Κάλυψη κλάσης	M4 κατά EN 13201

8.7 Λογισμικό προσομοιώσεων

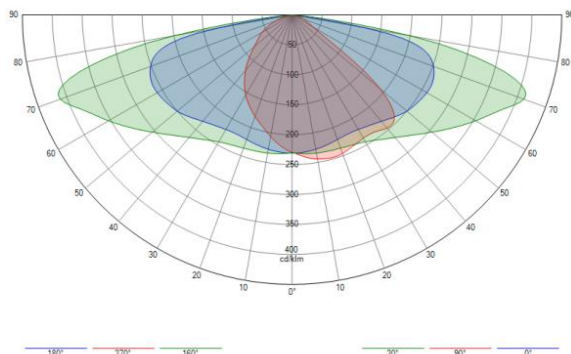
Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της φωτοτεχνικής μελέτης είναι:

1. Schreder Ulysse Version 3.3. της εταιρείας Schreder G.I.E.
2. DIALux EVO Version 5.3.3.18310 της εταιρείας DIAL GmbH.

Τα παραπάνω λογισμικά χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα για επιβεβαίωση όλων των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

8.8 Προσφερόμενος εξοπλισμός

Το φωτιστικό που χρησιμοποιήθηκε είναι της σειράς AMPERA MIDI, του Ομίλου Schreder.



Εικόνα 8.2 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού
Πηγή: www.ils.com.gr [85]



Εικόνα 8.3 Φωτιστικό Ampera
Πηγή: www.ils.com.gr [85]

Πίνακας 8.6: Χαρακτηριστικά φωτιστικού

Τύπος Φωτιστικού	Ισχύς (W)	Φωτεινή ροή LED (lm)	CCT (K)
AMPERA MIDI 64 LED/700mA/5103 optic	139.0	15590	3000

Το κεντρικό σύστημα διαχείρισης (OWLET Nightshift) αναπτύσσεται από τον βελγικό όμιλο Schreder στο γερμανικό παράρτημά του και λειτουργεί επιτυχώς σε χιλιάδες εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο. Αποτελείται από:

- Ελεγκτές φωτιστικού (Luminaire Controllers-LuCos): Σε κάθε φωτιστικό είναι τοποθετημένος ένας ελεγκτής. Οι LuCos επικοινωνούν με τον SeCo μέσω πρωτοκόλλου ZigBee.
- Ελεγκτής τομέα (Segment Controller-SeCo): Ο κεντρικός ελεγκτής του συστήματος διαχείρισης Owlet έχει δυνατότητα σύνδεσης με έως και 150 LuCos. Επικοινωνεί με το CMS μέσω τεχνολογίας 3G.
- Λογισμικό Διαχείρισης: Η πρόσβαση στο λογισμικό διαχείρισης OWLET Nightshift γίνεται μέσω Internet.

8.9 Αποτελέσματα μελέτης

Τμήμα Α/Κ στην λωρίδα επιβράδυνσης προς Ριτσώνα (Τμήμα 1)

Τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 8.7.

Πίνακας 8.7: Περίληψη αποτελεσμάτων για το Τμήμα 1

	L_{avg} (cd/m ²)	U_o	U_i	TI (%)	SR
Αποτέλεσμα προσομοίωσης	0,75	0,46	0,90	0	0,67
Απαιτήσεις κλάσης M4	0,75	0,4	0,6	15	0,5
Εκπλήρωση	NAI	NAI	NAI	NAI	NAI

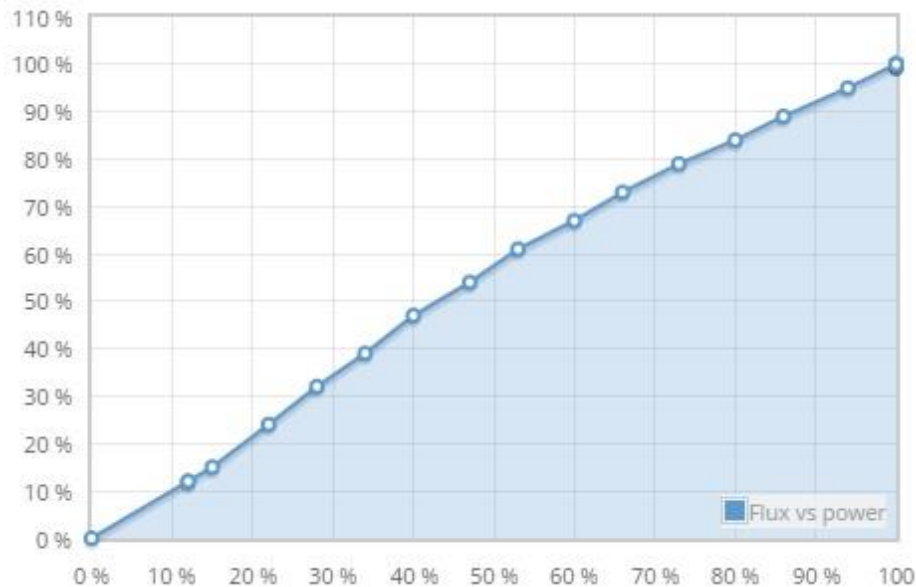
Τμήμα προσέγγισης προς Ριτσώνα (Τμήμα 2)

Στο Τμήμα 2 οι ιστοί των φωτιστικών είναι τοποθετημένοι στο ίδιο ύψος, αλλά σε μικρότερη απόσταση μεταξύ τους. Αυτό μας επιτρέπει να μειώσουμε εξ' αρχής την φωτεινότητα και κατά συνέπεια την κατανάλωση του φωτιστικού για επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας. Με ρύθμιση της φωτεινής ροής στα 11381 lm, δηλαδή στο 73% της αρχικής, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 8.8: Περίληψη αποτελεσμάτων για το τμήμα 2

	L_{avg} (cd/m ²)	U_o	U_i	TI (%)	SR
Αποτέλεσμα προσομοίωσης	0,79	0,48	0,90	9	0,69
Απαιτήσεις κλάσης M4	0,75	0,4	0,6	15	0,5
Εκπλήρωση	NAI	NAI	NAI	NAI	NAI

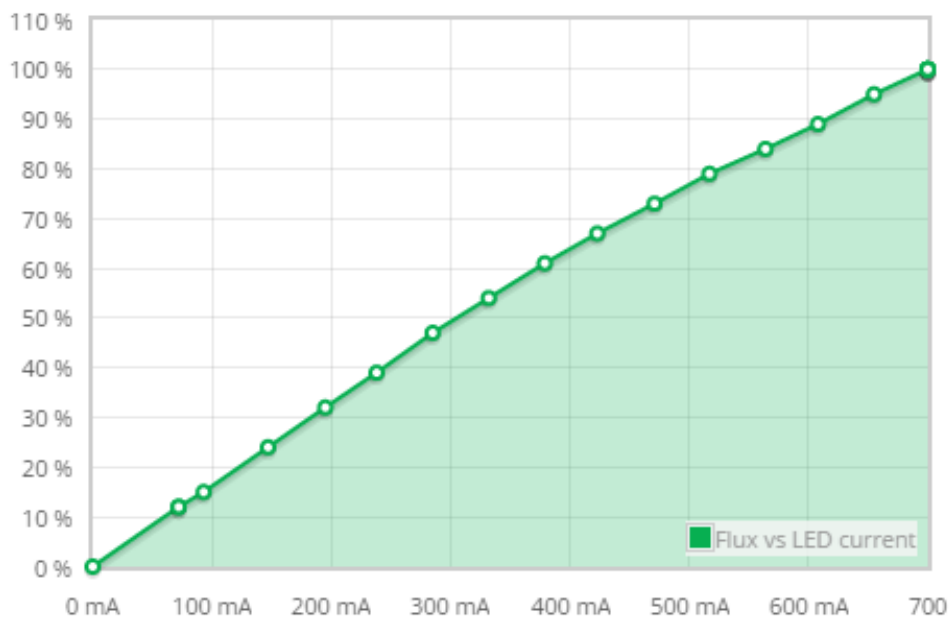
Το ποσοστό της αντίστοιχης ισχύος για κάθε ποσοστό φωτεινής ροής για τον συγκεκριμένο driver της εταιρείας LG έχει υπολογιστεί από τον κατασκευαστή του φωτιστικού και απεικονίζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 8.4: Γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ φωτεινής ροής και ισχύος

Το 73% της φωτεινής ροής που επιλέξαμε αντιστοιχεί σε ποσοστό 66% της ονομαστικής ισχύος, δηλαδή σε 91,74 Watt.

Ακόμα έχει καθοριστεί η σχέση που συνδέει την φωτεινή ροή και το ρεύμα οδήγησης των LED.



Εικόνα 8.5: Γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ φωτεινής ροής και ρεύματος οδήγησης

Το 73% της φωτεινής ροής αντιστοιχεί σε ρεύμα οδήγησης 470 mA.

8.10 Εξοικονόμηση ενέργειας και οικονομικό όφελος σε σχέση με την προηγούμενη εγκατάσταση

Στον Πίνακα 8.10 υπολογίζεται η εξοικονόμηση ενέργειας και το ετήσιο οικονομικό όφελος ανά φωτιστικό σώμα και ανά Τμήμα μέσω της σύγκρισης μεταξύ της προηγούμενης εγκατάστασης φωτισμού με λαμπτήρες HPS και της προτεινόμενης με φωτιστικά τεχνολογίας LED.

Στο Τμήμα 1 εγκαταστάθηκαν 14 φωτιστικά AMPERA MIDI ισχύος 139 W και στο Τμήμα 2 εγκαταστάθηκαν 8 ίδια φωτιστικά με ρυθμισμένη την φωτεινή ροή τους στο 73% της αρχικής και τελική ισχύ 91,74 W.

Η ισχύς του ελεγκτή περιοχής (SeCo) είναι 15 W και επιμερίστηκε στο σύνολο των 22 φωτιστικών. Η ισχύς του ελεγκτή φωτιστικού (LuCo) είναι 0.8 W. Συνεπώς, η συνολική ισχύς του Φ/Σ τεχνολογίας LED προσαυξάνεται κατά:

$$0,8W + (15W / 22) = 1,48 W \text{ ανά } \Phi/\Sigma$$

Τα φωτιστικά σώματα υπολογίζεται ότι λειτουργούν 14 ώρες την ημέρα κατά τη χειμερινή περίοδο και 9 ώρες την ημέρα κατά τη θερινή περίοδο. Συνολικά, θεωρούμε πως λειτουργούν 4198 ώρες / έτος.

Η προηγούμενη εγκατάσταση φωτισμού του κόμβου Ριτσώνας αποτελούταν από φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούν λαμπτήρα ισχύος 250 W. Η συνολική ισχύς του φωτιστικού ανερχόταν σε 300 W, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών των οργάνων έναυσης και ελέγχου (οι οποίες ανέρχονται σε 20%).

Με βάση το τιμολόγιο της Γ.Γ.Δ.Ε. (Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων) για τα κόστη συντήρησης Η/Μ εγκαταστάσεων οδικών έργων προκύπτουν τα στοιχεία στον Πίνακα 8.9 παρακάτω.

Πίνακας 8.9: Κόστη συντήρησης ανά είδος εργασίας Φ/Σ σύμφωνα με Γ.Γ.Δ.Ε.

Κωδικός άρθρου	Είδος εργασίας	Τιμή μονάδας (€)
62.10.10.02	Καθαρισμός Φ/Σ σε ύψος άνω των 8,0 m από το δάπεδο εργασίας	25,00
62.10.26.03	Αντικατάσταση λαμπτήρα ατμού Νατρίου υψηλής πίεσης Ισχύος 250 W	30,50
62.10.20.01	Πυκνωτής διόρθωσης συντελεστή ισχύος	10,00
62.10.20.02	Αντιπαρασιτικός πυκνωτής	1,80
62.10.20.03	Στραγγαλιστικό πηνίο (BALLAST)	30,00
62.10.20.05	Εναυστήρας χωρίς εκκινητή (STARTER)	25,00
62.10.20.06	Λυχνιολαβή	3,40

Όσον αφορά τη συχνότητα για κάθε είδος εργασίας σε περίοδο 10 ετών, εκτιμάται ότι ο λαμπτήρας αντικαθίσταται 3 φορές στα 10 χρόνια, τα υπόλοιπα όργανα του Φ/Σ αντικαθίστανται 1 φορά στα 10 χρόνια και καθαρισμός Φ/Σ γίνεται 3 φορές στα

10 χρόνια. Συνεπώς, το κόστος συντήρησης του φωτιστικού είναι ίσο με 206,7 € στη 10ετία ή 20,67 € / έτος.

Τα Φ/Σ τεχνολογίας LED έχουν μηδενικό κόστος συντήρησης, λόγω 10 χρόνων εγγύησης από τον κατασκευαστή και χάνουν το 20% της φωτεινής ροής τους στις 100.000 ώρες λειτουργίας (L80)

Πίνακας 8.10: Εξοικονόμηση ενέργειας και ετήσιο οικονομικό όφελος ανά Φ/Σ και ανά τμήμα

Τμήμα 1 (Τμήμα Α/Κ στην λωρίδα επιβράδυνσης προς Ριτσώνα)		Υφιστάμενη Εγκατάσταση Φωτισμού	Προτεινόμενη Εγκατάσταση Φωτισμού
Ισχύς ανά φωτιστικό	(W)	250	139
Απώλειες ηλεκτρικών μερών	(W)	50	0,8+0,68=1,48
Απώλειες γραμμών (2%)	(W)	6	2,81
Συνολική Καταναλισκόμενη Ισχύς	(W)	306	143,29
Ωρες λειτουργίας ανά έτος	(h)	4198	
Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	1284,59	601,53
Κόστος Ενέργειας	(€/kWh)	0,14	
Ετήσιο Κόστος Καταναλισκόμενης Ενέργειας	(€)	179,84	84,21
Ετήσιο Κόστος Συντήρησης	(€)	20,67	0
Εξοικονόμηση Ενέργειας	(kWh)	683,06	
Εξοικονόμηση Ενέργειας	(%)	53,17	
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	115,63	
Τμήμα 2 (Τμήμα προσέγγισης προς Ριτσώνα)		Υφιστάμενη Εγκατάσταση Φωτισμού	Προτεινόμενη Εγκατάσταση Φωτισμού
Ισχύς ανά φωτιστικό	(W)	250	91,74
Απώλειες ηλεκτρικών μερών	(W)	50	0,8+0,68=1,48
Απώλειες γραμμών (2%)	(W)	6	1,86
Συνολική Καταναλισκόμενη Ισχύς	(W)	306	95,08
Ωρες λειτουργίας ανά έτος		4.198	
Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	1.284,59	399,15
Κόστος Ενέργειας	(€/kWh)	0,14	
Ετήσιο Κόστος Καταναλισκόμενης Ενέργειας	(€)	179,84	55,88
Ετήσιο Κόστος Συντήρησης	(€)	20,67	0
Εξοικονόμηση Ενέργειας	(kWh)	885,44	
Εξοικονόμηση Ενέργειας	(%)	68,93	
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	144,63	

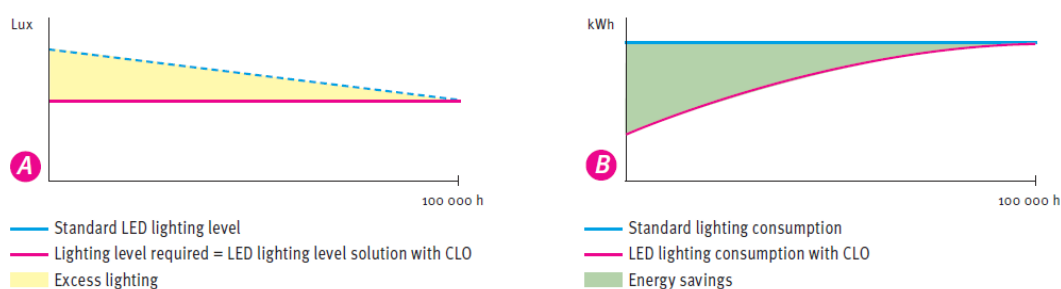
8.11 Σενάρια ρύθμισης φωτεινότητας και περαιτέρω προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας

8.11.1 Σύστημα Διατήρησης της Φωτεινής Ροής

Μια πολύ σημαντική λειτουργία του φωτιστικού AMPERA MIDI είναι η λειτουργία Σταθερού Εκπεμπόμενου Φωτός (CLO – Constant Lumen Output).

Με την πάροδο του χρόνου η φωτεινή ροή των φωτιστικών τεχνολογίας LED μειώνεται. Συγκεκριμένα, τα φωτιστικά AMPERA MIDI χάνουν το 20% της φωτεινής ροής τους μετά από 100.000 ώρες λειτουργίας για ρεύμα οδήγησης 700mA. Θέτοντας συντελεστή συντήρησης MF=0,8, τα αποτελέσματα της φωτομετρικής μελέτης και για τα δύο τμήματα της εγκατάστασης καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις στις 100.000 ώρες.

Για ένα συμβατικό φωτιστικό, αυτή η υποτίμηση της φωτεινής ροής με την πάροδο των χρόνων έχει ως άμεση συνέπεια ανούσια κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 8.6: Εξοικονόμηση Ενέργειας με Σύστημα CLO

Αντίθετα τα φωτιστικά της σειράς AMPERA λειτουργούν τελείως διαφορετικά, διατηρώντας σταθερή φωτεινή ροή με τον χρόνο. Ελέγχονται με ακρίβεια και αυτόνομα οι ανάγκες ενέργειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των φωτιστικών ούτως ώστε να παρέχουν συνεχώς το απαιτούμενο επίπεδο φωτεινής ροής.

Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας 10% ανά φωτιστικό σώμα.

Πίνακας 8.11: Συγκριτικός πίνακας για φωτιστικά με και χωρίς λειτουργία CLO

Τμήμα 1		Φωτιστικά AMPERA χωρίς CLO	Φωτιστικά AMPERA με CLO
Ετήσια κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	601,53	541,38
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(kWh)	683,06	743,21
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(%)	53,17	57,86
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	115,63	124,72

Τμήμα 2		Φωτιστικά AMPERA χωρίς CLO	Φωτιστικά AMPERA με CLO
Ετήσια κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	399,15	359,24
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(kWh)	885,44	925,36
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(%)	68,93	72,04
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	144,63	150,22

8.11.2 Προτεινόμενο σενάριο dimming

Με δεδομένο ότι η κυκλοφοριακή ροή δεν παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της νύχτας, αλλά παρατηρείται μια διακύμανση προτάθηκε στην Νέα Οδό ένα σενάριο ρύθμισης της φωτεινότητας για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας. Λόγω έλλειψης δεδομένων όσον αφορά την ωριαία διακύμανση κυκλοφοριακού φόρτου, έγινε μια εκτίμηση της διακύμανσης αυτής και προτάθηκε το παρακάτω προφίλ dimming με βάση το πρότυπο EN 13201 και την τεχνική έκθεση CIE 115-2010, ώστε να γίνει ένας ενδεικτικός υπολογισμός των προοπτικών εξοικονόμησης ενέργειας της εγκατάστασης.

Θεωρήθηκαν τέσσερα χρονικά διαστήματα: από την στιγμή που ανάβουν τα φωτιστικά μέχρι το τέλος της βραδινής αιχμής (Δt_1), από το τέλος της βραδινής αιχμής μέχρι τα μεσάνυχτα (Δt_2), από τα μεσάνυχτα μέχρι την αρχή της πρωινής αιχμής (Δt_3), από την αρχή της πρωινής αιχμής μέχρι το σβήσιμο των φωτιστικών (Δt_4).

Οι κλάσεις φωτισμού για κάθε χρονική περίοδο και για κάθε τμήμα επιλέγονται με την βοήθεια των παρακάτω πινάκων:

Πίνακας 8.12: Επιλογή κλάσης για κάθε χρονική περίοδο για το Τμήμα 1

Παράμετρος	Επιλογές	Σταθμισμένη Τιμή V_w	Επιλεχθείσα Σταθμισμένη Τιμή V_w			
			Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
Όριο Ταχύτητας	Πολύ υψηλή	2				
	Υψηλή	1	1	1	1	1
	Μέτρια	-1				
	Χαμηλή	-2				
Κυκλοφοριακή ροή	Υψηλή	1	1			1
	Μέτρια	0		0	0	
	Χαμηλή	-1				
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Μικτή με υψηλό ποσοστό μη μηχανοκίνητων	2				
	Μικτή	1				
	Μόνο μηχανοκίνητα	0	0	0	0	0

Ύπαρξη διαζώματος	Όχι	1					
	Ναι	0	0	0	0	0	
Πυκνότητα διασταυρώσεων	Υψηλή	1					
	Μέτρια	0	0	0	0	0	
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα	1					
	Μη παρόντα	0	0	0	0	0	
Λαμπρότητα περιβάλλοντος χώρου	Υψηλή	1					
	Μέτρια	0					
	Χαμηλή	-1	-1	-1	-1	-1	
Δυσκολία πλοήγησης	Πολύ Δύσκολη	2					
	Δύσκολη	1	1	1	1	1	
	Εύκολη	0					
			V_{ws}	2	1	1	2
			$M=6 - V_{ws}$	M4	M5	M5	M4

Πίνακας 8.13: Απαιτήσεις κλάσεων και αποτελέσματα προσομοίωσης για το Τμήμα 1

Χρονική Περίοδος	Κλάση	Απαιτήσεις κλάσης					Ποσοστό dimming	Αποτελέσματα προσομοίωσης				
		L_{av} (cd/m ²)	U_o	U_i	f_{π} (%)	R_s		L_{av} (cd/m ²)	U_o	U_i	f_{π} (%)	R_s
Δt_1	M4	0,75	0,40	0,60	15	0,5	0%	0,75	0,46	0,9	0	0,67
Δt_2	M5	0,50	0,35	0,40	15	0,5	25%	0,56	0,46	0,9	0	0,67
Δt_3	M6	0,30	0,35	0,40	20	0,5	50%	0,38	0,46	0,9	1	0,67
Δt_4	M4	0,75	0,40	0,60	15	0,5	0%	0,75	0,46	0,9	0	0,67

Πίνακας 8.14: Επιλογή κλάσης για κάθε χρονική περίοδο για το Τμήμα 2

Παράμετρος	Επιλογές	Σταθμισμένη Τιμή V_w	Επιλεχθείσα Σταθμισμένη Τιμή V_w			
			Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
Όριο Ταχύτητας	Πολύ υψηλή	2				
	Υψηλή	1				
	Μέτρια	-1	-1	-1	-1	-1
	Χαμηλή	-2				
Κυκλοφοριακή ροή	Υψηλή	1	1			1
	Μέτρια	0		0		
	Χαμηλή	-1			-1	
Σύνθεση κυκλοφοριακής ροής	Μικτή με υψηλό ποσοστό μη μηχανοκίνητων	2				
	Μικτή	1	1	1	1	1
	Μόνο μηχανοκίνητα	0				
Ύπαρξη διαζώματος	Όχι	1	1	1	1	1
	Ναι	0				
Πυκνότητα διασταυρώσεων	Υψηλή	1				
	Μέτρια	0	0	0	0	0
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα	1				
	Μη παρόντα	0	0	0	0	0
Λαμπρότητα περιβάλλοντος	Υψηλή	1				
	Μέτρια	0				

χώρου	Χαμηλή	-1	-1	-1	-1	-1	
Δυσκολία πλοήγησης	Πολύ Δύσκολη	2					
	Δύσκολη	1	1	1	1	1	
	Εύκολη	0					
			V_{ws}	2	1	0	2
			$M=6 - V_{ws}$	M4	M5	M6	M4

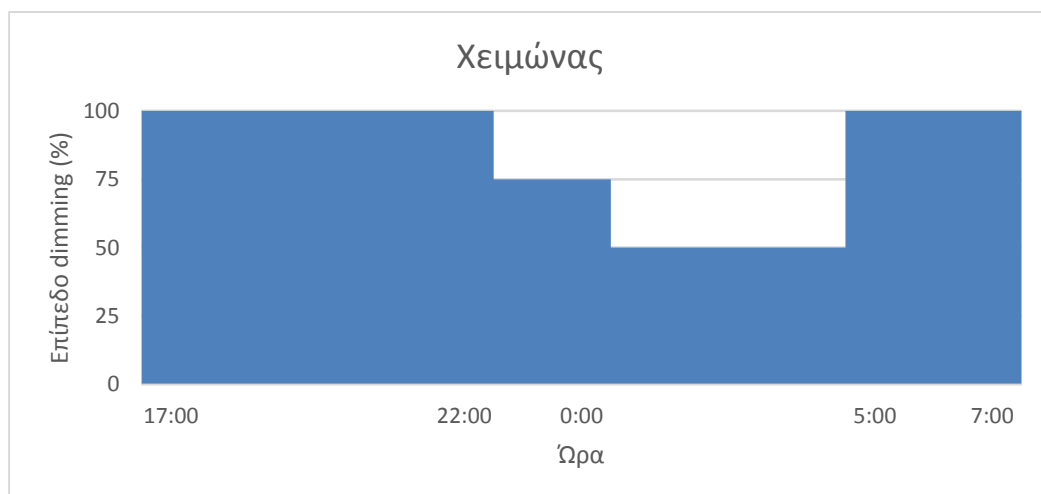
Πίνακας 8.15: Απαιτήσεις κλάσεων και αποτελέσματα προσομοίωσης για το Τμήμα 2

Χρονική Περίοδος	Κλάση	Απαιτήσεις κλάσης					Ποσοστό dimming	Αποτελέσματα προσομοίωσης				
		L_{av} (cd/m^2)	U_o	U_i	f_{T1} (%)	R_s		L_{av} (cd/m^2)	U_o	U_i	f_{T1} (%)	R_s
Δt_1	M4	0,75	0,40	0,60	15	0,5	0%	0,79	0,48	0,9	9	0,69
Δt_2	M5	0,50	0,35	0,40	15	0,5	25%	0,59	0,48	0,9	9	0,69
Δt_3	M6	0,30	0,35	0,40	20	0,5	50%	0,40	0,48	0,9	10	0,69
Δt_4	M4	0,75	0,40	0,60	15	0,5	0%	0,79	0,48	0,9	9	0,69

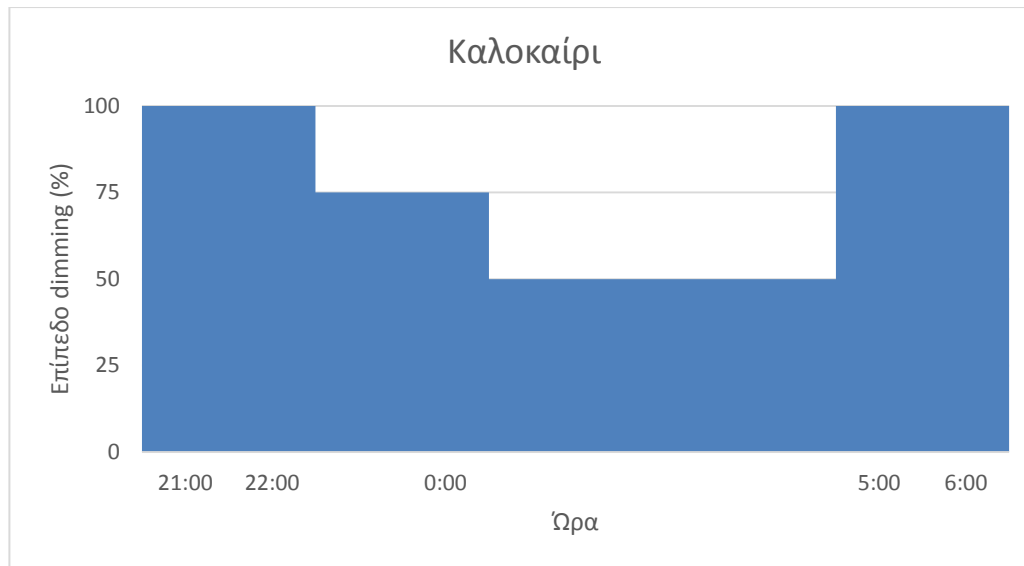
Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο και την CIE, τα όρια για τα υπόλοιπα κριτήρια ποιότητας θα πρέπει να είναι αυτά της κανονικής κλάσης του δρόμου, δηλαδή της κλάσης με το υψηλότερο επίπεδο λαμπρότητας (M4).

Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας της εφαρμογής, προτείνεται ως κατώτατο επίπεδο dimming το 50% για λόγους ασφαλείας.

Σε αυτήν την περίπτωση εξετάζεται η επίδραση της ρύθμισης της φωτεινότητας στην εξοικονόμηση ενέργειας της εγκατάστασης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία CLO.



Εικόνα 8.7: Ημερήσιο προφίλ ρύθμισης της φωτεινής ροής κατά την χειμερινή περίοδο



Εικόνα 8.8: Ημερήσιο προφίλ ρύθμισης της φωτεινής ροής κατά την θερινή περίοδο

Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για αυτό το σενάριο υπολογίζεται στον παρακάτω πίνακα. Θεωρήθηκε ότι η χειμερινή περίοδος διαρκεί 181 ημέρες (φθινόπωρο, χειμώνας), ενώ η εαρινή 184 ημέρες.

Πίνακας 8.16: Πίνακας υπολογισμού ετήσιας κατανάλωσης ανά Φ/Σ με dimming

Τμήμα 1	Φωτεινή Ροή (%)	Ισχύς (%)	Ισχύς (W)	Ώρες/ημέρα	Ώρες/έτος	Κατανάλωση Ενέργειας (kWh)
Χειμερινή Περίοδος	100	100	143,29	7	1267	181,55
	75	68,33	97,91	2	362	35,44
	50	43	61,61	5	905	55,76
Καλοκαιρινή Περίοδος	100	100	143,29	7	368	52,73
	75	68,33	97,91	2	368	36,03
	50	43	61,61	5	920	56,69
ΣΥΝΟΛΟ						418,20
Τμήμα 2	Φωτεινή Ροή (%)	Ισχύς (%)	Ισχύς (W)	Ώρες/ημέρα	Ώρες/έτος	Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας (kWh)
Χειμερινή Περίοδος	100	100	95,08	7	1267	120,47
	75	68,33	64,97	2	362	23,52
	50	43	40,88	5	905	37,00
Καλοκαιρινή Περίοδος	100	100	95,08	2	368	34,99
	75	68,33	64,97	2	368	23,91
	50	43	40,88	5	920	37,61
ΣΥΝΟΛΟ						277,50

Ακολουθεί ο συγκριτικός πίνακας για την εξοικονόμηση ενέργειας και το ετήσιο οικονομικό όφελος στην περίπτωση ρύθμισης της φωτεινής ροής.

Πίνακας 8.17: Συγκριτικός πίνακας για φωτιστικά με και χωρίς λειτουργία dimming

Τμήμα 1		Φωτιστικά AMPERA χωρίς λειτουργία dimming	Φωτιστικά AMPERA με λειτουργία dimming
Ετήσια κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	601,53	418,2003191
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(kWh)	683,06	866,39
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(%)	53,17	67,44
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	115,63	141,96
Τμήμα 2		Φωτιστικά AMPERA χωρίς λειτουργία dimming	Φωτιστικά AMPERA με λειτουργία dimming
Ετήσια κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	399,15	277,4965897
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(kWh)	885,44	1007,09
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(%)	68,93	78,40
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	144,63	161,66

8.11.3 Constant Lumen Output σε συνδυασμό με προτεινόμενο σενάριο dimming

Συνδυάζοντας την δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών LED με την λειτουργία Σταθερού Εκπεμπόμενου Φωτός (CLO) του φωτιστικού AMPERA οι προοπτικές εξοικονόμησης είναι ακόμα μεγαλύτερες. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χάρη στην λειτουργία CLO επιτυγχάνεται 10% επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας.

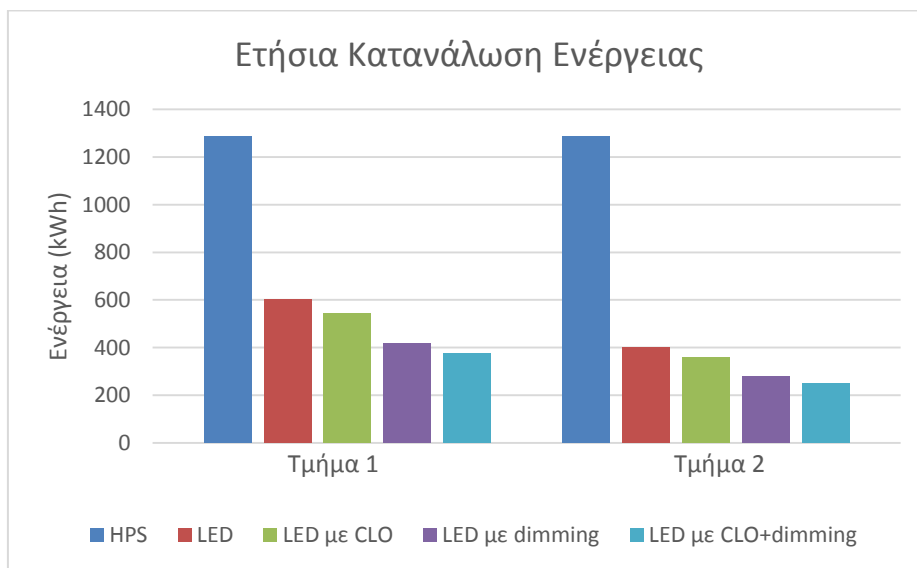
Πίνακας 8.18: Συγκριτικός πίνακας για φωτιστικά με και χωρίς συνδυαστική λειτουργία dimming και CLO

Τμήμα 1		Φωτιστικά AMPERA χωρίς λειτουργία dimming + CLO	Φωτιστικά AMPERA με λειτουργία dimming+CLO
Ετήσια κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	601,53	376,38
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(kWh)	683,06	908,21
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(%)	53,17	70,70
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	115,63	147,82
Τμήμα 2		Φωτιστικά AMPERA χωρίς λειτουργία dimming + CLO	Φωτιστικά AMPERA με λειτουργία dimming+CLO
Ετήσια κατανάλωση Ενέργειας	(kWh)	399,15	249,75
Εξοικονόμηση Ενέργειας	(kWh)	885,44	1034,84

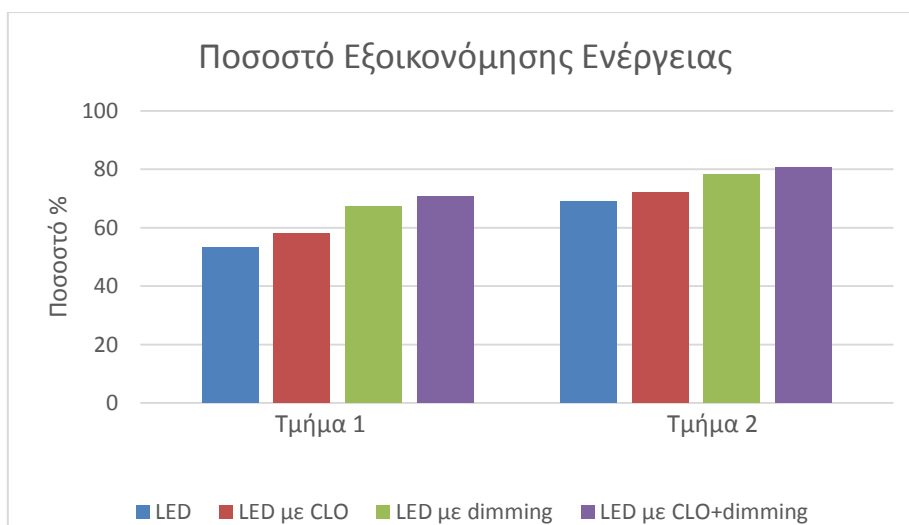
σε σχέση με φωτιστικά HPS			
Εξοικονόμηση Ενέργειας σε σχέση με φωτιστικά HPS	(%)	68,93	80,56
Ετήσιο οικονομικό όφελος	(€)	144,63	165,55

8.11.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων

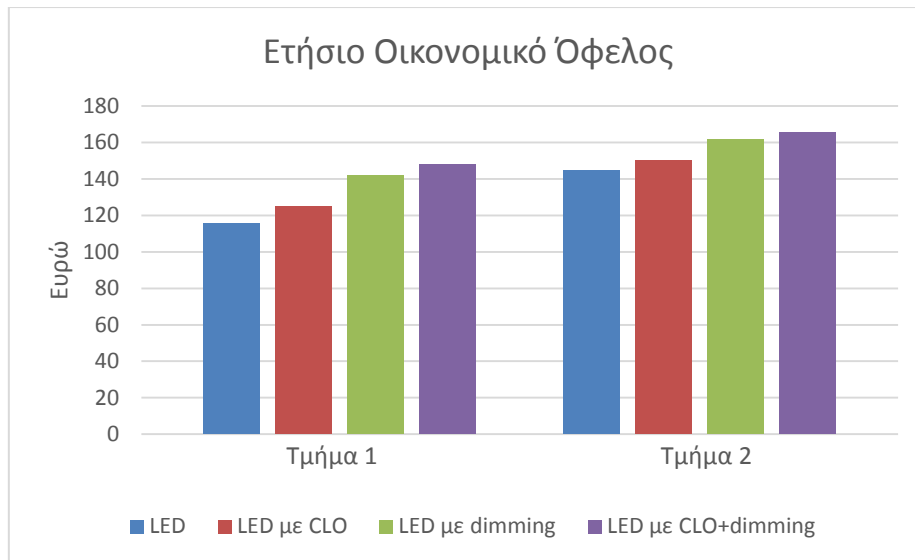
Στον παρακάτω γράφημα συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων που αναλύθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 8.9: Γραφική αναπαράσταση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά Φ/Σ σε κάθε περίπτωση



Εικόνα 8.10: Γραφική αναπαράσταση του ποσοστού εξοικονόμησης ανά Φ/Σ σε κάθε περίπτωση



Εικόνα 8.11: Γραφική αναπαράσταση του ετήσιου οικονομικού οφ ανά Φ/Σ σε κάθε περίπτωση

8.12 Αξιολόγηση επένδυσης

Προκειμένου να αξιολογηθεί σωστά η βιωσιμότητα της επένδυσης αρκεί να υπολογιστεί η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) και να γίνει μια εκτίμηση για τον χρόνο αποπληρωμής της αρχικής επένδυσης. Η αξιολόγηση της επένδυσης έγινε με βάση το πρώτο σενάριο, δηλαδή χωρίς να συνυπολογίζεται η εξοικονόμηση λόγω του dimming και της λειτουργίας CLO του driver. Επίσης, μελετάται σε βάθος δεκαετίας διότι η κάλυψη εγγύησης των προσφερόμενων φωτιστικών σωμάτων AMPERA MIDI είναι δεκαετής. Να σημειωθεί πως εάν γίνει επέκταση μετά τη δεκαετία τα κέρδη που αποκομίζονται είναι μεγαλύτερα.

Καθαρή Παρούσα Αξία

Η ΚΠΑ υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του αθροίσματος της παρούσας αξίας των v Καθαρών Ταμειακών Ροών (ΚΤΡ) και του κόστους της επένδυσης, όπως δίνεται και από τον ακόλουθο τύπο:

$$ΚΠΑ = \sum_{k=1}^v \frac{ΚΤΡ_k}{(1+i)^k} - K_0$$

όπου

$ΚΠΑ$	η Καθαρή Παρούσα Αξία
$ΚΤΡ_k$	οι Καθαρές Ταμειακές Ροές το έτος k
K_0	η αρχική επένδυση
v	Η διάρκεια ζωής του επενδυτικού σχεδίου
i	το επιτόκιο προεξόφλησης

Αρχική Επένδυση Κ₀

Στην προκειμένη περίπτωση είναι το κεφάλαιο που πρόκειται να επενδυθεί για την αγορά Η/Μ εξοπλισμού για το φωτισμό του Α/Κ Ριτσώνας.

Καθαρές Ταμειακές Ροές

Οι Καθαρές Ταμειακές Ροές λογίζονται ίσες με το αναμενόμενο ετήσιο οικονομικό όφελος, το οποίο πρόκειται να προκύψει από τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας της εγκατάστασης και από τη διαφορά μεταξύ του ετήσιου κόστους συντήρησης της υφιστάμενης εγκατάστασης και του ετήσιου κόστους συντήρησης της νέας εγκατάστασης.

Η ετήσια μείωση κόστους ενέργειας ανά μονάδα Φ/Σ και ανά ορισμένη περιοχή καθώς και το ετήσιο κόστος συντήρησης της υφιστάμενης και της νέας εγκατάστασης συνοψίζονται στον Πίνακα 8.19.

Πίνακας 8.19: Ετήσια μείωση κόστους ενέργειας και ετήσια κόστη συντήρησης ανά μονάδα Φ/Σ και ανά ορισμένη περιοχή

Τμήμα	Ετήσια μείωση κόστους ενέργειας (€ / Φ/Σ)	Ετήσιο κόστος συντήρησης υφιστάμενων Φ/Σ (€ / Φ/Σ)	Ετήσιο κόστος συντήρησης καινούριων Φ/Σ (€ / Φ/Σ)	Καθαρές Ταμειακές Ροές (€ / Φ/Σ)
Τμήμα 1	115,63	20,67	0	136,30
Τμήμα 2	144,63	20,67	0	165,30

Επιτόκιο Προεξόφλησης

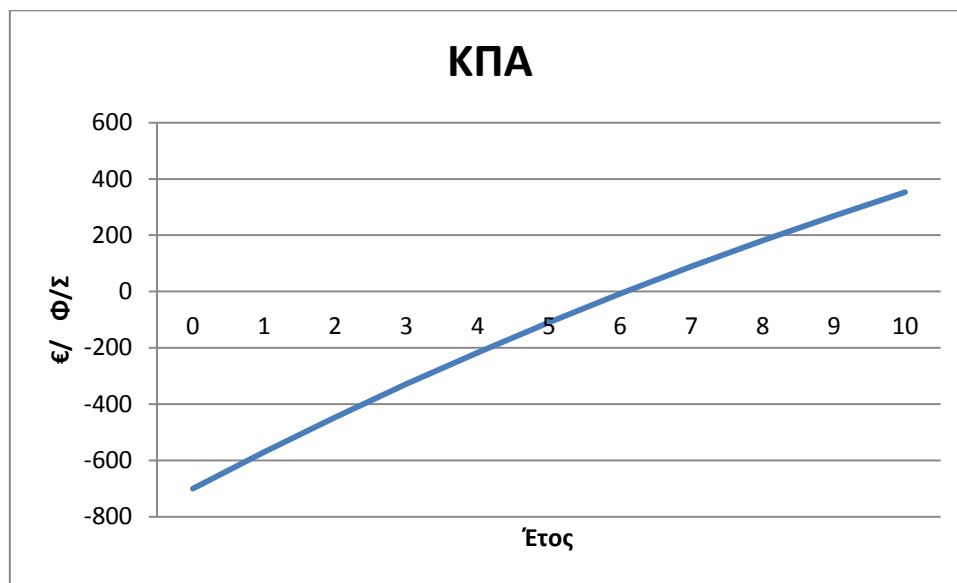
Το επιτόκιο προεξόφλησης είναι η ελάχιστη αποδεκτή απόδοση και εξαρτάται, εκτός από τον πληθωρισμό, από το κόστος κεφαλαίου και από τον επιχειρηματικό κίνδυνο που έχει η επένδυση. Στην παρούσα περίπτωση το επιτόκιο προεξόφλησης θεωρείται ίσο με 5%.

Αποτελέσματα αξιολόγησης επένδυσης

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διαμορφώνεται ο Πίνακας 8.20 για τις προεξοφλημένες ταμειακές ροές και υπολογίζεται η ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) το έτος ν σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 1.

Πίνακας 8.20: ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) το έτος ν σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 1

Έτος k	Αρχική επένδυση K_0 (€ / Φ/Σ)	KTP_k (€ / Φ/Σ)	$\frac{KTP_k}{(1+i)^k}$ (€ / Φ/Σ)	KPA_k (€ / Φ/Σ)
0	700,00			-700,00
1		136,3	129,81	-570,19
2		136,3	253,44	-446,56
3		136,3	371,18	-328,82
4		136,3	483,31	-216,69
5		136,3	590,11	-109,89
6		136,3	691,82	-8,18
7		136,3	788,68	88,68
8		136,3	880,94	180,94
9		136,3	968,80	268,80
10		136,3	1052,47	352,47



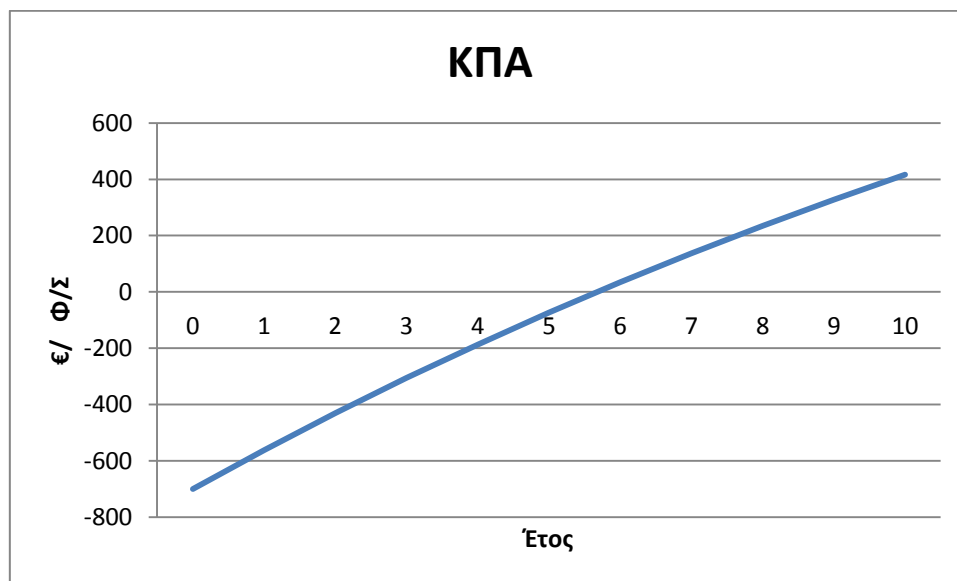
Εικόνα 8.12: Καμπύλη ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 1

Λαμβάνοντας υπόψη το επιτόκιο προεξόφλησης ίσο με 5%, υπολογίζεται ότι η ΚΠΑ στο τέλος του έκτου έτους γίνεται 51,48 €, πράγμα που σημαίνει πως η απόσβεση της αρχικής επένδυσης γίνεται κατά τη διάρκεια του έκτου έτους, δηλαδή μετά από περίπου 5,9 έτη.

Ομοίως, για το Τμήμα 2 υπολογίζεται η KPA_{10} στο τέλος του 10^{ου} έτους σε € ανά Φ/Σ και γίνεται μια προσεγγιστική εκτίμηση του χρόνου αποπληρωμής της αρχικής επένδυσης.

Πίνακας 8.21: ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) το έτος ν σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 2

Έτος k	Αρχική επένδυση K_0 (€ / Φ/Σ)	KTP_k (€ / Φ/Σ)	$\frac{KTP_k}{(1+i)^k}$ (€ / Φ/Σ)	$ΚΠΑ_k$ (€ / Φ/Σ)
0	700,00			-700,00
1		144,63	137,74	-562,26
2		144,63	268,93	-431,07
3		144,63	393,86	-306,14
4		144,63	512,85	-187,15
5		144,63	626,17	-73,83
6		144,63	734,10	34,10
7		144,63	836,88	136,88
8		144,63	934,77	234,77
9		144,63	1028,00	328,00
10		144,63	1116,79	416,79



Εικόνα 8.13: Καμπύλη ΚΠΑ ανά μονάδα της επένδυσης (σε € / Φ/Σ) σε σταθερές τιμές και με πραγματικό επιτόκιο προεξόφλησης για το Τμήμα 2

Παρατηρείται ότι η απόσβεση της αρχικής επένδυσης γίνεται στο τέλος του έκτου έτους.

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της ΚΠΑ δε συνυπολογίστηκε η υπολειμματική αξία του εξοπλισμού της εγκατάστασης φωτισμού. Ο υπολογισμός της θα συνεισέφερε στη μείωση του χρόνου απόσβεσης της αρχικής επένδυσης και στις δυο περιπτώσεις καθώς ο προσφερόμενος εξοπλισμός είναι κατασκευασμένος κάτω από τις αυστηρότερες προδιαγραφές ποιότητας και απόδοσης.

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα και Προοπτικές για τα Συστήματα Διαχείρισης Προσαρμοστικού Φωτισμού

Ο εξωτερικός φωτισμός είναι χρήσιμο και αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής στις σύγχρονες πόλεις. Ο φωτισμός δρόμων, χώρων στάθμευσης και δημόσιων χώρων επεκτείνει τις ανθρώπινες δραστηριότητες κατά την διάρκεια της νύχτας παρέχοντας ασφάλεια στους πολίτες. Ωστόσο, η κατανάλωση των φωτιστικών οδοφωτισμού είναι αρκετά μεγάλη και επιβαρύνει τόσο το περιβάλλον όσο και τον προϋπολογισμό των Δήμων. Για τον λόγο αυτό, οι δημοτικές αρχές πολύ συχνά επιλέγουν περιορίσουν τον φωτισμό των δημόσιων χώρων, διακυβεύοντας την ασφάλεια των περαστικών.

Ο προσαρμοστικός φωτισμός έρχεται να επιλύσει αυτό το πρόβλημα. Τα συστήματα προσαρμοστικού φωτισμού καθιστούν τον εξωτερικό φωτισμό περισσότερο βιώσιμο, αποδοτικό, ασφαλή και προσιτό οικονομικά. Επιπλέον, βελτιώνουν την ποιότητα ζωής των ανθρώπων και οδηγούν τις πόλεις πιο κοντά στην επίτευξη του τριπλού ευρωπαϊκού ενεργειακού στόχου 20-20-20 (20% μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, 20% αύξηση του ποσοστού ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για την κάλυψη των αναγκών της Ευρώπης και 20% περισσότερη αποτελεσματικότητα στην χρήση ενέργειας σε όλη την ΕΕ έως το 2020).

Τα συστήματα τηλεδιαχείρισης προσαρμοστικού φωτισμού παρουσιάζουν και άλλα πλεονεκτήματα, όπως είναι η μείωση της φωτορύπανσης και η δυνατότητα συνολικής επίβλεψης και απομακρυσμένης διαχείρισης των φωτιστικών σωμάτων. Ακόμα και τα αρνητικά σημεία αυτής της τεχνολογίας, που περιγράφονται στο δεύτερο κεφάλαιο, αποτελούν μάλλον προκλήσεις που σταδιακά θα ξεπεραστούν παρά σοβαρά μειονεκτήματα.

Με την ανάπτυξη των συστημάτων εξωτερικού φωτισμού με δυνατότητα dimming και την αυξανόμενη εγκατάσταση τους στην Ευρώπη, έγινε επιτακτική η ανάγκη αναθεώρησης του προτύπου EN 13201 για τον οδοφωτισμό, ώστε να διευκολύνεται η εφαρμογή του προσαρμοστικού φωτισμού. Το 2014 εκδόθηκε η αναθεώρηση του πρώτου μέρους του προτύπου. Το αναθεωρημένο πρότυπο αποτελεί ένα θεσμικό πλαίσιο για την εφαρμογή του δυναμικού οδοφωτισμού και διευκολύνει σημαντικά την διαδικασία επιλογής του κατάλληλου σεναρίου dimming για έναν δρόμο.

Η μελέτη περίπτωσης στο Κεφάλαιο 8 αφορά την αντικατάσταση φωτιστικών HPS με LED σε συνδυασμό με την εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης στον Ανισόπεδο Κόμβο Ριτσώνας της εθνικής οδού Αθηνών-Λαμίας. Το προτεινόμενο σενάριο dimming επιλέχθηκε με βάση το αναθεωρημένο πρότυπο EN 13201-1/2014 και την Τεχνική Έκθεση CIE 115-2010. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για την νέα αυτή τεχνολογία. Συγκεκριμένα, επιτεύχθηκε εξοικονόμηση ενέργειας 67,44 % σε σχέση με την προηγούμενη εγκατάσταση στο Τμήμα 1 του Α/Κ και 78,4 % στο

Τμήμα 2. Το αντίστοιχο ετήσιο οικονομικό όφελος ήταν 141, 96 € για το Τμήμα 1 και 161,66 € για το Τμήμα 2.

Η εγκατάσταση αυτή δεν είναι η μοναδική εγκατάσταση συστήματος διαχείρισης φωτισμού στην Ελλάδα. Γενικότερα, στην Ευρώπη έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμα έργα και αναμένονται πολύ περισσότερα. Στις «Έξυπνες Πόλεις» (Smart Cities), όπου η τεχνολογία και οι τηλεπικοινωνίες αξιοποιούνται από τα δίκτυα και τις υπηρεσίες προς όφελος των πολιτών τα τηλε-διαχειριζόμενα δίκτυα οδοφωτισμού πρόκειται να κατέχουν εξέχουσα θέση.

Βιβλιογραφία

- [1] Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Λάμπρος Οικονόμου, Σταρούλα Κουρτέση, «Φωτοτεχνία», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010
- [2] CIE 140-2000, “Road Lighting Calculations”, CIE, 2000
- [3] Mark Green, “How Long Does It Take to Stop? Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times”, *Transportation Human Factors*, Vol. 2, Issue 3, 2000
- [4] E-street project, www.e-streetlight.com
- [5] Energy Saving Outdoor Lighting project (ESOLi), www.esoli.org
- [6] Globe at Night, www.globeatnight.org
- [7] Lighting Research Center, <http://www.lrc.rpi.edu>
- [8] International Commission on Illumination, CIE, eiv.cie.co.at
- [9] Merle F. Walker, “Light pollution in California and Arizona”, The University of Chicago Press, 1973
- [10] Franz Hölker, Christian Wolter, Elizabeth K. Perkin, Klement Tockner, “Light pollution as a biodiversity threat”, *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 25, No. 12, Δεκέμβριος 2010
- [11] Franz Hölker, Timothy Moss, Barbara Griefahn, Werner Kloas, Christian C. Voigt, Dietrich Henckel, Andreas Hänel, Peter M Kappeler, Stephan Völker, Axel Schwoppe, Steffen Franke, Dirk Uhrlandt, Jürgen Fischer, Reinhard Klenke, Christian Wolter, Klement Tockner, “The Dark Side of Light: A transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy”, *Ecology and Society*, Vol. 115, Iss. 4, Art. 13, 2010
- [12] Ron Chepesiuk, “Missing the Dark, Health Effects of Light Pollution”, *Focus*, Vol. 117, No. 1, Ιανουάριος 2009
- [13] A. De Almeida, B. Santos, B. Paolo, and M. Quicheron, “Solid state lighting review - Potential and challenges in Europe,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 34, Elsevier, 2014
- [14] International Dark-Sky Association, *Outdoor Lighting Code Handbook*, Tucson, International Dark-Sky Association, December 2000/September 2002
- [15] CIE 126-1997, “Guidelines for minimizing sky glow”, CIE, 1997
- [16] Ghazwan Al-Haji, “The Impact of New Street Lighting Technologies on Traffic Safety”, *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, Vol. 2, No. 3, Σεπτέμβριος 2014
- [17] CIE 180-2007, “Road Transport Lighting for Developing Countries”, CIE, 2007
- [18] R. Elvik, A. Høy, T. Vaa, M. Sørensen, “Handbook of Road Safety Measures”, Emerald Group Publishing Limited, Οκτώβριος 2009

- [19] CIE 93-1992, "Road Lighting as an Accident Countermeasure", CIE, 1992
- [20] AFE, "Moins d'éclairage pour moins d'accidents? Est-ce raisonnable?", Lux, No. 252, Μάρτιος/Απρίλιος 2009
- [21] P.O. Wanvik, "Road Lighting and Traffic Safety. Do we need road lighting?", Doctoral Theses, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Μάρτιος 2009
- [22] J.D. Bullough, "To illuminate or not to illuminate: Roadway lighting as it affects traffic safety at intersections", Accident Analysis and Prevention, Vol. 53, Απρίλιος 2013
- [23] Antal Haans, Yvonne A.W. de Kort, "Light distribution in dynamic street lighting: two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment and escape", Journal of Environmental Psychology Vol. 32, Ιούνιος 2012
- [24] K. Pease, "A review of street lighting evaluations: crime reduction effects", Crime Prevention Studies, Vol. 10, 1999
- [25] D.P. Harrington, B.C. Welsh, "Effects of improved street lighting on crime", Campbell Systematic Reviews, Σεπτέμβριος 2008
- [26] EN 13201-1, "Road Lighting-Part 1: Selection of Lighting Classes", European Committee for Standardization CEN, Ιούλιος 2004
- [27] EN 13201-2, "Road Lighting-Part 2: Performance Requirements", European Committee for Standardization CEN, Νοέμβριος 2003
- [28] EN 13201-3, "Road Lighting-Part 3: Calculation of Performance", European Committee for Standardization CEN, Νοέμβριος 2003
- [29] EN 13201-4, "Road Lighting-Part 4: Methods of Measuring Light Performance", European Committee for Standardization CEN, Νοέμβριος 2003
- [30] Προσχέδιο EN 13201-5, "Road Lighting-Part 5: Energy Efficiency Requirement", European Committee for Standardization CEN, Σεπτέμβριος 2007
- [31] CIE 115-2010, "Lighting of roads for motor and pedestrian traffic", CIE, 2010
- [32] EN 13201-1, "Road Lighting-Part 1: Selection of Lighting Classes", European Committee for Standardization CEN, Δεκέμβριος 2014
- [33] BS 5489-1:2013, "Code of practice for the design of road lighting-Part 1: Lighting of roads and public amenity areas", BSI, Δεκέμβριος 2012
- [34] Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07.

- [35] James Brodrick, "The LED Dimming Dilemma", Electrical Construction & Maintenance, Μάρτιος 2013
- [36] Jeff Y. Tsao, "Solid State Lighting, Lamps, chips and materials for tomorrow", IEEE Circuits and Devices Magazine, Μάιος/Ιούνιος 2004
- [37] Schréder Group, www.schreder.com
- [38] IESNA, Illuminating Engineering Society of North America, "The Lighting Handbook, Reference and Application", 9^η Έκδοση, IESNA, Νέα Υόρκη, 2000
- [39] International Dark-Sky Association, "Outdoor Lighting Code Handbook", Version 1.14, International Dark-Sky Association, Tucson, Δεκέμβριος 2000/Σεπτέμβριος 2002
- [40] Rakotomala F. Lovasoa, Randriamanantany A. Zely, Lucache D. Dorin, Danila Elena, "Energetic Aspects of the HID Ballast Used in Outdoor Lighting", IEEE International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Ρουμανία, Οκτώβριος 2012
- [41] Wei Yan, S.Y. Hui, "Dimming Characteristics of Large-Scale High-Intensity-Discharge (HID) Lamp Lighting Networks using a Central Energy-Saving System", IEEE Industry Applications Conference, IEEE, Οκτώβριος 2006
- [42] Henry Shu-Hung Chung, Ngai Man Ho, Wei Yan, Pok Wai Tam, S.Y. Hui, "Comparison of Dimmable Electromagnetic and Electronic Ballast Systems-An Assessment on Energy Efficiency and Lifetime", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 6, Δεκέμβριος 2007
- [43] S. O. Kasap, «Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων», Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2004
- [44] Δημήτριος Παναγιώτης Τ. Νικολάου, «Η εφαρμογή των LED στον φωτισμό δρόμων και οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013
- [45] Electronics For You, www.electronicsforu.com
- [46] F.R. Blaquez, E. Rebollo, F. Blaquez, C.A. Platero, P. Frias, "High Efficiency Voltage Regulator and Stabilizer for Outdoor Lighting Installations", IEEE 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), IEEE, Μάιος 2012
- [47] Craig DiLouie, "Dimming HID Lamps", Lighting Controls Association, Οκτώβριος 2004
- [48] L.F.F. Rakotomalala, Z. Randriamanantany, G. Chiriac, D.D. Lucache, "HID Lamps Dimming in the Public Lighting Installations Dominated by Magnetic Ballasts", Conference on Applied and Theoretical Electricity, IEEE, Craiova, Οκτώβριος 2014

- [49] Sielight, www.sielight.gr
- [50] Chien-Ming Huang, Tsorng-Juu Liang, Ray Lee Lin, Jiann-Fuh Chen, "A Novel Constant Power Control Circuit for HID Electronic Ballast", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 3, Μάιος 2007
- [51] Wei Yan, S.Y. Hui, "An Analysis Into the Dimming Control and Characteristic of Discharge Lamps", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 6, Νοέμβριος 2005
- [52] Xiaohong Cao, Wei Yan, S.Y. Hui, Shu-Hung Chung, "Dimming Control and Characteristics of High Frequency Operated metal Halide Lamps", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 13, Μάιος 2004
- [53] Yao-Te Huang, Horng Ching Hsiao, Yi-Hua Liu, Ching-Ran Lee, Li-Ling Lee, "A Novel Constant-Power Control", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 38, No. 6, Ιούνιος 2006
- [54] NEMA Lighting Systems Division Document, "Guidelines on the Application of Dimming to High-Intensity Discharge Lamps", National Electrical Manufacturers Association, Βιρτζίνια, Δεκέμβριος 2010
- [55] Gerry Moschopoulos, Praveen Jain, "Single-Phase, Single-Stage Power Factor Corrected Converter Topologies", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 1, IEEE, Φεβρουάριος 2005
- [56] Michael Poplawski, "LED Dimming: What you need to know":, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Η.Π.Α., Δεκέμβριος 2012
- [57] Lutron Electronics, Inc., www.lutron.com
- [58] Philips Lighting, www.lighting.philips.com
- [59] IES, Illuminating Engineering Society, "IES TM-23-11 - Lighting Control Protocols", IES, Απρίλιος 2011
- [60] Geoff Archenhold, "The Right Protocol", Mondo arc-The International Magazine for Designers with Light, Τεύχος 60, Απρίλιος-Μάιος 2011
- [61] DALI AG, Digital Addressable Lighting Interface, www.dali-ag.org
- [62] ZVEI-Division Luminaires Activity Group, "DALI Manual", DALI AG
- [63] P.F. Hein, "DALI-A Digital Addressable Lighting Interface for Lighting Electronics", Industry Applications Conference, IEEE, Σικάγο, Οκτώβρης 2001
- [64] Yuejun Zhang, Ping Zhou, Mingguang Wu, "Research on DALI and development of Master-Slave module", International Conference on Networking, Sensing and Control, IEEE, Ft. Lauderdale, 2006

- [65] C.F.Tsai, M.S. Young, "Pyroelectric infrared sensor based thermometer for monitoring indoor objects", Review of Scientific Instruments, AIP Publishing, Σεπτέμβριος 2003
- [66] Fabio Lecesse, Zbigniew Leonowicz, "Intelligent wireless street lighting system", Conference on Environmental and Electrical Engineering, IEEE, Μάιος 2012
- [67] Qin Li-jun, Shen Zi-zheng, Jiao Feng, "Intelligent Streetlight Energy-saving System Based on LonWorks Power Line Communication Technology", Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, IEEE, 2011
- [68] Ç., Atici, T. Özçelebi, and J. J. Lukkien, "System architecture for road lighting, International Conference on Consumer Electronics, IEEE, 2011
- [69] L. Jun, F. Cangxu, S. Xuesong, and Y. Aijun, "Street lamp control system based on power carrier wave", International Symposium on Intelligent Information Technology App. Workshop, 2008
- [70] ZigBee Alliance, www.zigbee.org
- [71] Li Lian, Li Li, "Wireless Dimming System for LED Street Lamp Based on Zigbee and GPRS", International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization, IEEE, 2012
- [72] Sagar Deo, Sachin Prakash, Asha Patil, "ZigBee-based Intelligent Street Lighting System", International Conference on Devices, Circuits and Systems, IEEE, 2014
- [73] IPSO Alliance, "6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture", White paper No. 3, 2009
- [74] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif και D. Tipper, "A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges", Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013.
- [75] TALQ Consortium, www.talq-consortium.org
- [76] Solucion Integral de Infraestructuras Urbanas, SIIUR project, www.siiur.com
- [77] M. Burgos-Payan, F.J. Correa-Moreno, J.M. Riquelme-Santos, "Improving the Energy Efficiency of Street Lighting. A case in the South of Spain", International Conference on the European Energy Market, IEEE, 2012
- [78] UVAX Concepts, www.uvax.es
- [79] TU Delft, <http://www.tudelft.nl/en/current/latest-news/article/detail/intelligente-straatverlichting-tu-delft-bespaart-tot-80-energie/>
- [80] Luminext, www.luminext.eu
- [81] Echelon, www.echelon.com
- [82] Lites Project, www.lites-project.eu/
- [83] C2 Smartlight, www.c2is.fi

[84] SPI, <http://www.spi.be/fr/services/projets-collaborations/geppadi-un-eclairage-intelligent>

[85] I.L.S. Illuminating Led-Lighting Systems, www.ils.com.gr

[86] Dimitrios Panagiotis T. Nikolaou, Varvara D. Tsiouri, Andreas L. Tsenekidis, Vasileios A. Evangelopoulos, "Energy efficiency improvement of a LED street lighting installation : An adaptive lighting case study in the town of Ierapetra, Crete", 6th Balkan Conference on Lighting, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015