



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**"Η εφαρμογή των LED στον φωτισμό δρόμων και οι  
προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας".**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Παναγιώτης Τ. Νικολάου

Επιβλέπων : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής, Σχολή ΗΜΜΥ, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## "Η εφαρμογή των LED στον φωτισμό δρόμων και οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας".

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Παναγιώτης Τ. Νικολάου

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

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

.....  
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παύλος Γεωργιάκης

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013



.....  
Δημήτριος Παναγιώτης Τ. Νικολάου

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

Copyright © Δημήτριος Παναγιώτης Τ. Νικολάου 2013

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## *Ευχαριστίες*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Τοπαλή για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, όταν μου ανέθεσε την διπλωματική αυτή εργασία, έχοντας ως μόνη διαπίστευση την όρεξη και το αυξανόμενο ενδιαφέρον μου για το αντικείμενο του φωτισμού. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την συμπαράσταση και τις υποδείξεις του, καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής.*

*Η παρούσα προσπάθεια αφιερώνεται στην οικογένεια μου και τους φίλους μου, που με στήριζαν και με στηρίζουν. Ιδιαίτερα θα ήθελα να αναφερθώ στον πατέρα μου, ο οποίος με ώθησε και μου κίνησε το ενδιαφέρον να ασχοληθώ με το αντικείμενο του φωτισμού.*





## Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά την μελέτη της προοπτικής εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση νέας τεχνολογίας φωτιστικών φωτοεκπεμπουσών διόδων ή κοινώς LED. Η τεχνολογία στερεάς κατάστασης φωτισμού SSL ανοίγει νέους ορίζοντες και προοπτικές στον φωτισμό αυτοκινητόδρομων και αστικών δρόμων.

Η μελέτη μας αρχίζει με την εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού, καθώς και με την ανάλυση των υπάρχουσών τεχνολογιών λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε με λεπτομέρεια όλες τις πτυχές της τεχνολογίας των φωτιστικών LED ως ημιαγωγοί. Δίνουμε μεγάλη έμφαση στην διαχείριση της παραγόμενης θερμότητας από τα LED, παρουσιάζοντας τις επιπτώσεις της στην διάρκεια ζωής αλλά και στην απόδοση του κυκλώματος.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τα στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, ώστε μια μελέτη φωτισμού δρόμου να θεωρείται ενεργειακά αποδοτική, οπτικά κατάλληλη και περιβαλλοντικά φιλική (ανάλυση φαινομένου φωτορύπανσης). Επιπρόσθετα δίνουμε μεγάλη έμφαση στην σημασία της επιλογής της κατάλληλης εκπομπής ακτινοβολίας ή αλλιώς θερμοκρασία χρώματος (ανάλυση μεσοπικής φωτομετρίας). Το φάσμα εκπομπής ακτινοβολίας της φωτεινής πηγής έχει συνδεθεί με αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και κυρίως, στην καταστολή της παραγωγής και έκκρισης της ουσίας μελατονίνης.

Συνεχίζοντας, με βάση το ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 13201 επιλέξαμε τέσσερις συχνές για τα ελληνικά δεδομένα κατηγορίες φωτισμού και με βάση τις παραμέτρους τους, καθορίσαμε τυπικές γεωμετρίες δρόμου για την κάθε μια. Έχοντας ως βάση αυτές τις διαστάσεις, διενεργήσαμε προσομοιώσεις σε μια σειρά από παραλλαγές των τυπικών δρόμων και συντάξαμε τους χάρτες αποτελεσμάτων ικανότητας των φωτιστικών LED. Ως επέκταση υπολογίσαμε και το ποσοστό της εξοικονομούμενης ενέργειας σε κάθε κατηγορία φωτισμού για τις περιπτώσεις των τυπικών δρόμων. Τέλος σχολιάζουμε και συνοψίζουμε τα αποτελέσματα μας, δίνοντας παράλληλα ερεθίσματα για προέκταση της υπάρχουσας ανάλυσης.

## Λέξεις – Κλειδιά

LED, εξοικονόμηση ενέργειας, φωτορύπανση, φωτισμός δρόμων, αποδοτικός φωτισμός, θερμοκρασία χρώματος, μελατονίνη, χάρτες αποτελεσμάτων, οπτική σχεδίαση, θερμική απόδοση, μεσοπική συνάρτηση ευαισθησίας.

## **Abstract**

The purpose of the current thesis is to examine the potentials of energy savings in road lighting, with the implementation of the all new LED technology. The Solid State Lighting technology opens up and widens new horizons in the way we perceive lighting technology.

Our study begins with an introduction to illumination fundamentals and with the analysis of the current road-way lighting technologies. Next we fully analyze the LED lighting technology covering all of its aspects. We stress as of extreme importance the heat dissipation management issue of the LED, underlining the setbacks that can be induced in LEDs' lifetime and efficacy.

Moreover, we present the necessary data and variables that should be considered when designing a new roadway/street lighting project. A street lighting project in order to be successful needs to be energy efficient, optically appropriate and eco-friendly. Extra attention has been given upon the light pollution phenomenon and we proposed ways of management. In advance, we underlined the importance of the Correlated Color Temperature, which describes the spectral power distribution of the irradiant. The higher the CCT is, the more the implications are, concerning health issues, and specifically melatonin suppression.

Furthermore, according to EU EN 13201, we chose four different lighting categories, which are quite often in the Greek territory. Based on their lighting requirements we created four different road geometries, which posed as typical roads. Based on them, we conducted several computer based simulations in a range of altered typical streets, and created the result maps of LED performance. In addition we calculated the potential energy savings ratio for each lighting category, in terms of its typical street geometry. Finally we discussed and commented on our results as well as giving hints for future research.

## **Key – Words**

LED, energy savings, light pollution, roadway lighting, street lighting, efficient lighting, Correlated Color Temperature, melatonin suppression, maps of LED performance, optical design, heat management, Unified Photometry

## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού.....	15
1.1	Όραση και φωτισμός.....	15
1.2	Θερμοκρασία χρώματος-ποιότητα χρώματος φωτεινής πηγής .....	16
1.3	Θεμελιώδεις έννοιες τεχνολογίας φωτισμού.....	17
1.4	Βασικές έννοιες που αφορούν άμεσα τον φωτισμό δρόμων.....	18
1.4.1	Αντίθεση (Contrast).....	18
1.4.2	Θάμβωση .....	20
1.4.3	Χρόνος αντίληψης και αντίδρασης .....	20
2	Οι φωτεινές πηγές και ο φωτισμός δρόμων.....	23
2.1	Φωτισμός δρόμων: Ιστορική αναδρομή μέσα από την Νέα Υόρκη.....	23
2.2	Η εξέλιξη των ηλεκτρικών λαμπτήρων φωτισμού δρόμων .....	24
2.3	Ανάλυση βασικών τεχνολογιών λαμπτήρων φωτισμού δρόμων.....	26
2.3.1	Εισαγωγή στα είδη φωτεινών πηγών.....	26
2.3.2	Λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης.....	27
2.3.3	Λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης .....	29
2.3.4	Λαμπτήρες ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης .....	31
2.3.5	Λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων .....	33
3	Φωτιστικά σώματα δρόμου και κατηγοριοποιήσεις.....	37
3.1	Γενικά για τα φωτιστικά δρόμου .....	37
3.2	Κατηγοριοποίηση φωτιστικών με βάση την κατανομή φωτός.....	38
3.3	Κατηγοριοποίηση φωτιστικών με βάση την μηχανική αντοχή τους. ....	40
3.4	Πιστοποιητικά Ασφαλείας και Επιδόσεων E.E.....	43
3.4.1	Πρότυπα EN E.E. που αφορούν τον φωτισμό.....	43
3.4.2	Ευρωπαϊκή Νομοθεσία που επηρεάζει το φωτισμό .....	45
4	Ανάλυση τεχνολογίας LED και οπτικών συστημάτων.....	47
4.1	Εισαγωγή .....	47
4.2	Τεχνολογία LED -φωτοεκπέμπουσες δίοδοι.....	47

4.3	Υπολογισμός της διάρκειας ζωής του LED.....	50
4.4	Επίδραση θερμότητας στην λειτουργία των LED.....	51
4.4.1	Γενικές συνέπειες αύξησης θερμοκρασίας.....	51
4.4.2	Θερμοκρασία και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.....	53
4.4.3	Θερμοκρασία και οπτική συμπεριφορά.....	53
4.5	Διαχείριση θερμότητας LED.....	54
4.5.1	Μελέτη θερμικής αγωγιμότητας COB LED της εταιρίας CITIZEN.....	55
4.6	Τα οπτικά μέσα LED (φακοί) και ο φωτισμός δρόμων.....	56
4.6.1	Τα οπτικά συστήματα και οι σύγχρονες απαιτήσεις.....	56
4.6.2	Παράμετροι αξιολόγησης και αξιοπιστίας φακών LED.....	57
4.6.3	Τα είδη των φακών στον οδοφωτισμό.....	59
4.7	Σχεδίαση οπτικών συστημάτων με την μέθοδο της ιχνηλάτησης.....	61
4.7.1	Συνεχής ιχνηλάτηση (Sequential ray tracing).....	62
4.7.2	Ασυνεχής Ιχνηλάτηση( Non sequential ray tracing).....	63
4.8	Ανησυχίες για την χρήση SSL ως τεχνολογία φωτισμού δρόμων.....	66
5	Βασικά στοιχεία αποδοτικού φωτισμού δρόμων.....	71
5.1	Εισαγωγή στον εξωτερικό φωτισμό-φωτισμό δρόμων.....	71
5.2	Μελέτη φωτισμού δρόμων.....	72
5.2.1	Εισαγωγή.....	72
5.2.2	Γενικοί τύποι χρήσης περιοχών.....	73
5.2.3	Κατηγοριοποίηση Οδοστρώματος.....	73
5.2.4	Διατάξεις ιστών οδοφωτισμού.....	76
5.2.5	Βασική ορολογία μελέτης φωτισμού δρόμου.....	77
5.3	Συντελεστής συντήρησης ( Maintenance factor).....	78
5.4	Ποιότητα και ομοιομορφία.....	81
5.5	Αλγόριθμος σχεδιασμού συστήματος οδικού φωτισμού.....	81
5.6	Μαθηματικός Υπολογισμός Λαμπρότητας στο Οδόστρωμα για Δοσμένη Διάταξη....	83
5.6.1	Υπολογισμός της Μειωμένης Λαμπρότητας Οδοστρώματος.....	83

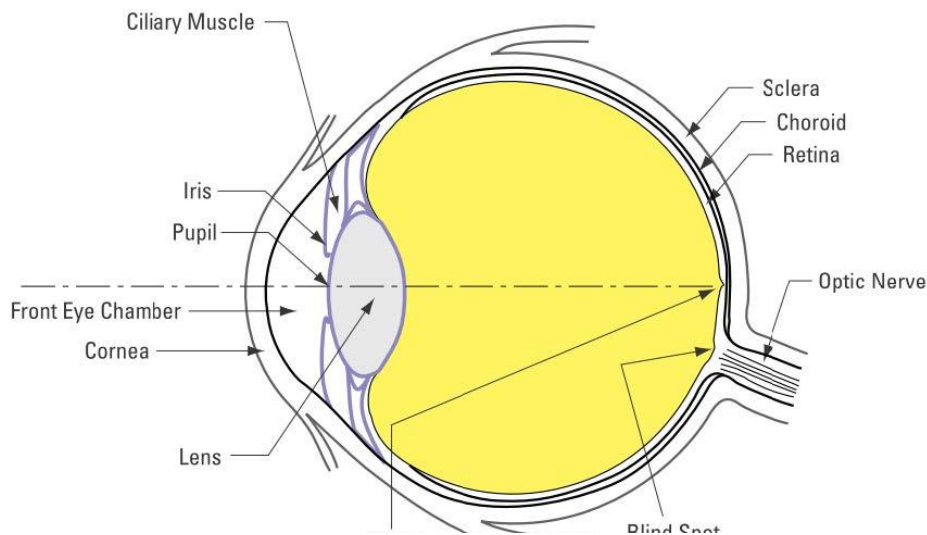
5.6.2	Μέθοδος Υπολογισμού Λαμπρότητας και Έντασης Φωτισμού σε ένα υπό μελέτη τμήμα δρόμου.....	85
5.7	Δημιουργία αλγορίθμου για την βέλτιστη οπτική και ενεργειακή απόδοση στον φωτισμό δρόμων με LED.....	88
6	Φωτισμός δρόμων και αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον.....	89
6.1	Φωτισμός δρόμων και περιβάλλον.....	89
6.2	Φωτορύπανση και ενεργειακές απώλειες.....	95
6.3	Φωτισμός δρόμων και ζωντανοί οργανισμοί.....	97
7	Μεσοπικός σχεδιασμός και φάσμα εκπομπής ακτινοβολίας φωτεινής πηγής.....	99
7.1	Μεσοπική φωτομετρία.....	99
7.2	Συντελεστής S/P (S/P ratio).....	101
7.3	Θερμοκρασία χρώματος-ενοποιημένη φωτομετρία και οδικός φωτισμός, θετικές επιδράσεις.....	102
7.3.1	Ενοποιημένη φωτομετρία.....	103
7.3.2	Δείκτης S/P και οπτική οξύτητα ανθρώπινου οφθαλμού.....	104
7.3.3	Θερμοκρασία χρώματος- Μεσοπική σχεδίαση και εξοικονόμηση ενέργειας..	107
7.4	Θερμοκρασία χρώματος, οδικός φωτισμός και αρνητικές επιπτώσεις.....	109
7.4.1	Εισαγωγή.....	109
7.4.2	Υψηλή θερμοκρασία χρώματος και αστρική παρατήρηση.....	109
7.4.3	Θερμοκρασία χρώματος και βιολογικές συνέπειες.....	111
8	Επιλογή κατηγορίας φωτισμού με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN13201/2004.....	115
8.1	Εισαγωγή.....	115
8.2	Οι κατηγορίες φωτισμού.....	116
8.3	Εφαρμογή του προτύπου για την μελέτη τυπικών οδικών αρτηριών.....	118
8.3.1	Κατηγορία φωτισμού CE4.....	118
8.3.2	Κατηγορία Φωτισμού ME3c.....	120
8.3.3	Κατηγορία Φωτισμού ME4a.....	121
8.3.4	Κατηγορία Φωτισμού ME2.....	123
9	Χάρτες αποτελεσμάτων ικανότητας LED και εξοικονόμηση ενέργειας.....	125

9.1	<i>Εισαγωγή στην διαδικασία αξιολόγησης .....</i>	125
9.2	<i>Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτιστικών LED σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.....</i>	126
9.3	<i>Επιλεχθείσες κατηγορίες φωτισμού και οι τυπικοί δρόμοι που προκύπτουν .....</i>	130
9.3.1	<i>Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού CE4.....</i>	131
9.3.2	<i>Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού ME3c .....</i>	132
9.3.3	<i>Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού ME4a.....</i>	133
9.3.4	<i>Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού ME2 .....</i>	133
9.4	<i>Χάρτες ικανοτήτων φωτιστικών LED.....</i>	134
9.5	<i>Τεχνολογία LED και εξοικονόμηση ενέργειας σε τυπικές περιπτώσεις δρόμων- Σύγκριση με φωτιστικά HPS-HID.....</i>	149
9.5.1	<i>Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατηγορία φωτισμού CE4.....</i>	150
9.5.2	<i>Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατηγορία φωτισμού ME3c .....</i>	150
9.5.3	<i>Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατηγορία φωτισμού ME4a.....</i>	151
9.5.4	<i>Συγκεντρωτική παρουσίαση εξοικονόμησης ενέργειας με φωτιστικά LED.....</i>	153
9.6	<i>Περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση της ενοποιημένης φωτομετρίας.</i>	154
9.7	<i>Οικονομική ανάλυση μιας εγκατάστασης συστήματος φωτισμού.....</i>	155
10	<i>Συμπεράσματα- προοπτικές για την χρήση των LED στον φωτισμό δρόμων.....</i>	161
11	<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</i>	165
12	<i>Βιβλιογραφία.....</i>	170

# 1 Εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού

## 1.1 Όραση και φωτισμός

Η όραση είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία που ακόμα και σήμερα δεν είναι απολύτως γνωστή. Περιλαμβάνει ακαριαία επικοινωνία του οφθαλμού και του εγκεφάλου μέσω ενός μεγάλου δικτύου νευρώνων και άλλων κυττάρων. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή το φως όταν πέφτουν πάνω στο ανθρώπινο μάτι διέρχονται από μια σειρά οργάνων και φίλτρων προτού καταλήξουν στο αμφιβληστροειδή.



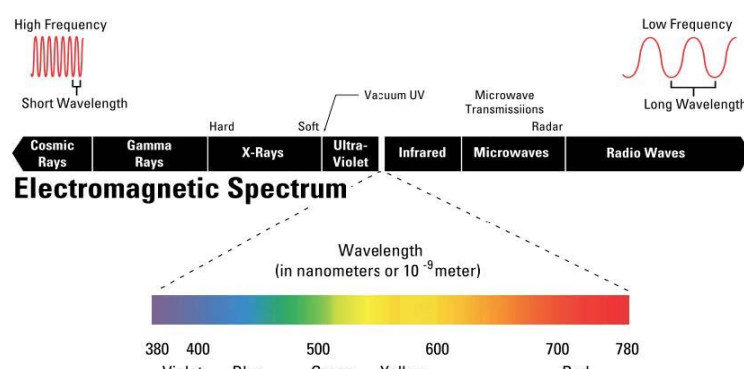
Εικόνα 1-1 Η δομή του ανθρώπινου οφθαλμού

Πάνω στον αμφιβληστροειδή υπάρχουν δυο είδη φωτοευαίσθητων κυττάρων, τα κωνία και τα ραβδία, τα οποία έχουν παρόμοια δομή αλλά ενεργοποιούνται σε διαφορετικές εντάσεις φωτισμού. Τα κωνία είναι υπεύθυνα για την λειτουργία της κεντρικής όρασης και ο αριθμός τους υπολογίζεται σε 70 εκατομμύρια. Ακόμη υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη κωνίων, καθένα από τα οποία είναι εξειδικευμένο στο να ανιχνεύει αποκλειστικά το μπλε, το κόκκινο και το πράσινο.

Σε χαμηλές εντάσεις φωτισμού ενεργοποιούνται τα ραβδία τα οποία δεν έχουν την δυνατότητα αναγνώρισης χρωμάτων. Ανέρχονται σε 120 εκατομμύρια και είναι υπεύθυνα για την λειτουργία της περιφερειακής όρασης. Όπως θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενα κεφάλαια υπάρχουν έρευνες που φανερώνουν εξάρτηση της απόδοσης των ραβδίων από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που δέχονται.

Η προσαρμογή του οφθαλμού στην κατάσταση φωτισμού γίνεται στον αμφιβληστροειδή, καθώς το μάτι ρυθμίζεται με βάση την μεταβαλλόμενη φωτεινότητα του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα τα φώτα ενός άλλου αυτοκινήτου, η ύπαρξη συστήματος φωτισμού κ.α. Έχουν αναγνωριστεί τρεις τύποι όρασης:

- Φωτοπική, χαρακτηρίζεται η όραση στην οποία είναι ενεργοποιημένα τα κωνία και έχουμε πλήρη ικανότητα των χρωμάτων. Η όραση αυτή εμφανίζεται για λαμπρότητες μεγαλύτερες των  $5\text{cd}/\text{m}^2$  σύμφωνα με την CIE.
- Μεσοπική, χαρακτηρίζεται η όραση στην οποία έχουμε ταυτόχρονη λειτουργία των κωνίων και των ραβδίων. Η περιοχή λειτουργίας της μεσοπικής όρασης είναι από  $0.001\text{cd}/\text{m}^2 \leq L \leq 5\text{cd}/\text{m}^2$  [CIE 2010]
- Σκοτοπική, χαρακτηρίζεται η όραση στην οποία έχουμε λειτουργία μόνο των ραβδίων και δεν έχουμε δυνατότητα αναγνώρισης χρωμάτων. Η περιοχή λειτουργίας της είναι  $L \leq 0.001\text{cd}/\text{m}^2$



Εικόνα 1-2 Περιοχή ορατής ακτινοβολίας

Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί διεξοδικά η προσαρμογή του ματιού στις καταστάσεις φωτισμού, καθώς και το πώς η φωτομετρία θα εκμεταλλευτεί την μεσοπική όραση του ανθρώπου για την παραγωγή ενός νέου συστήματος μέτρησης της φωτεινότητας [ CIE 2010].

## 1.2 Θερμοκρασία χρώματος-ποιότητα χρώματος φωτεινής πηγής

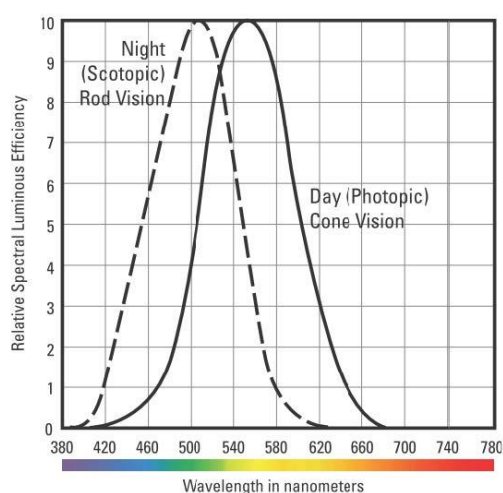
Η θερμοκρασία χρώματος είναι το μέτρο για να περιγραφεί το χρώμα και η απόχρωση των φωτεινών πηγών. Μετρείται σε βαθμούς Kelvin και ισοδυναμεί με την



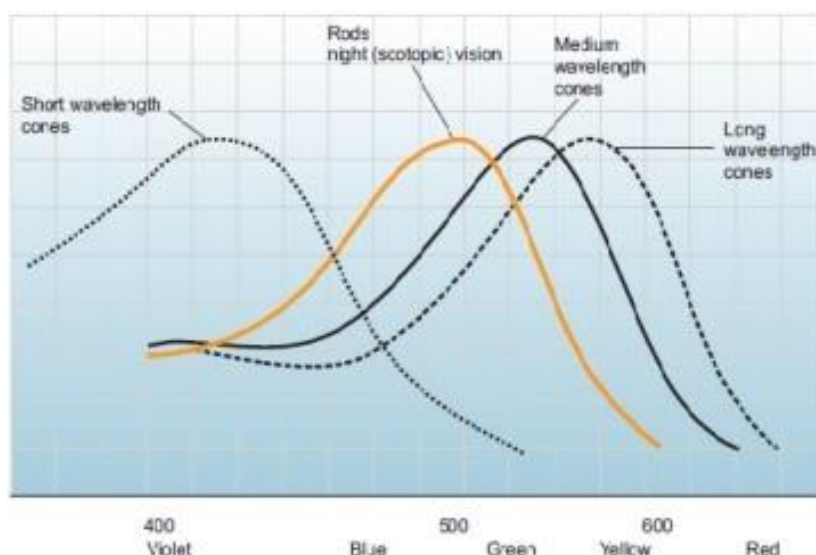
αντίστοιχη θερμοκρασία στην οποία όταν βρεθεί το μέλαν σώμα του Planck θα παράγει φως ίδιου χρώματος με την μετρούμενη φωτεινή πηγή.

Με τον όρο μέλαν σώμα εννοούμε ένα θεωρητικό μοντέλο σώματος το οποίο έχει την δυνατότητα να απορροφά όλα τα μήκη κύματος ακτινοβολίας που δέχεται, δεν ανακλά τίποτα και εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και όλε τις διευθύνσεις.

Η ποιότητα χρώματος αποτελεί την ικανότητα της φωτεινής πηγής να αναπαράγει ρεαλιστικά το χρώμα ενός αντικειμένου. Εκφράζεται από τον δείκτη χρωματικής απόδοσης Ra ή CRI και παίρνει τιμές από το 0 έως το 100. Όσο πιο χαμηλές τιμές παίρνει ο δείκτης τόσο πιο κακή είναι η αναπαράσταση των χρωμάτων από την φωτεινή πηγή.



Εικόνα 1.3 Καμπύλες ευαισθησίας ανθρώπινης όρασης



Εικόνα 1.4 Φασματική ευαισθησία φωτοκύτταρων ανθρώπινου οφθαλμού

### 1.3 Θεμελιώδεις έννοιες τεχνολογίας φωτισμού

Φωτεινή ροή (Luminous Flux): Η φωτεινή ροή  $\Phi$  ορίζεται ως η φωτεινή ενέργεια που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή ανά μονάδα χρόνου. Το μέγεθος αυτό ουσιαστικά αναπαριστά την φωτεινή ενέργεια που εκπέμπει ένας λαμπτήρας υπό την κανονικοποίηση της φωτοπικής συνάρτησης ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού. Μετρείται σε lumen (lm)

Φωτεινή ένταση(luminous intensity): Η φωτεινή ένταση είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που εκφράζει το πόση φωτεινή ροή διοχετεύεται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση του χώρου από την φωτεινή πηγή. Η φωτεινή ένταση  $I$  προς μια κατεύθυνση παρατηρήσεως είναι ο λόγος της εξερχόμενης φωτεινής ροής  $\Phi$  από κάποια φωτεινή πηγή διαμέσου ενός κοίλου κώνου απείρως μικρού ανοίγματος, προς την τιμή της στερεάς γωνίας από την οποία διέρχεται η φωτεινή ροή αυτή. Μετρείται σε  $lm/sr$

Ένταση φωτισμού επιφάνειας  $E$  (illuminance): Η ένταση φωτισμού μιας επιφάνειας είναι η φωτεινή ροή που προσπίπτει ανά μονάδα επιφάνειας. Μετρείται σε  $lm/m^2 = Lux$

Λαμπρότητα (luminance): Η λαμπρότητα ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής έντασης  $I$  στην κατεύθυνση του παρατηρητή προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας της πηγής την οποία βλέπει ο παρατηρητής. Η λαμπρότητα είναι το μόνο βασικό φωτομετρικό μέγεθος το οποίο γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. Χαρακτηρίζει την φωτεινότητα της επιφάνειας και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάκλαση της. Από τον ορισμό της λαμπρότητας γίνεται αντιληπτό πως πρόκειται για διανυσματικό μέγεθος και αλλάζει με την θέση του παρατηρητή. Μετρείται σε  $cd/m^2$

Φωτεινή απόδοση φωτεινής πηγής( luminous efficiency): Η έννοια της απόδοσης μιας φωτεινής πηγής είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας αξιολόγησης της, καθώς εκφράζει την ποσότητα των παραγόμενων lumen ανά καταναλισκόμενο W. Μετρείται σε  $lm/W$

## **1.4 Βασικές έννοιες που αφορούν άμεσα τον φωτισμό δρόμων.**

Στην παράγραφο αυτή θα αναλύσουμε συγκριμένες έννοιες τεχνολογίας φωτισμού, οι οποίες βρίσκουν άμεσα εφαρμογή στην τεχνολογία φωτισμού δρόμων.

### **1.4.1 Αντίθεση (Contrast)**

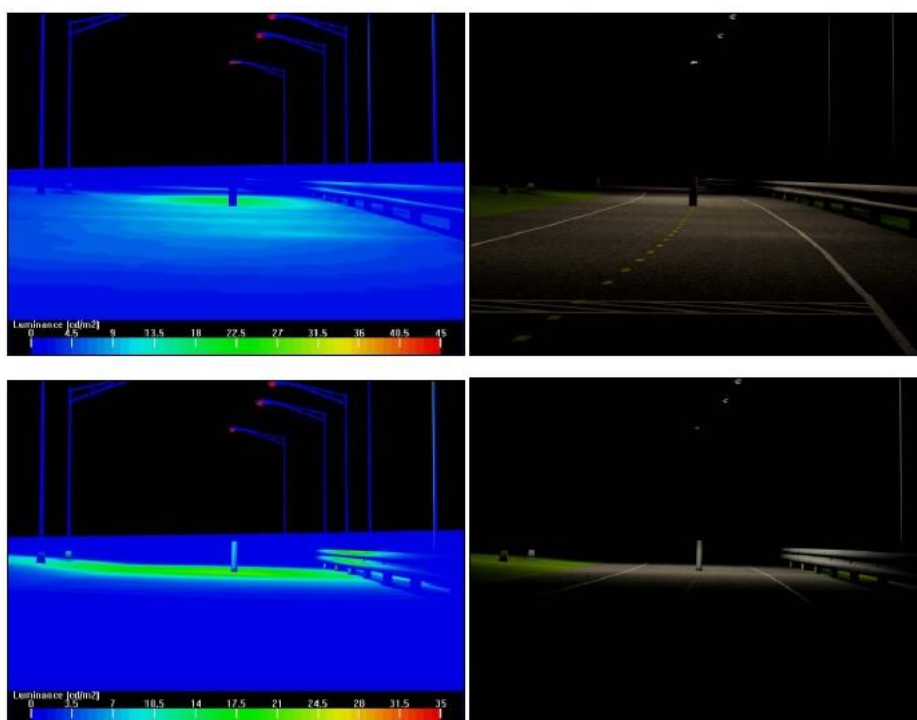
Τα αντικείμενα γίνονται αντιληπτά στο δρόμο λόγω της αντίθεσης που παρουσιάζουν σε σχέση με το περιβάλλον. Από την σκοπιά της λαμπρότητας, ένα αντικείμενο το οποίο είναι πιο «σκούρο» από το περιβάλλον του θα έχει μια αρνητική αντίθεση, ενώ ένα αντικείμενο το οποίο είναι πιο «φωτεινό» από το περιβάλλον του θα έχει θετική

αντίθεση. Στην εικόνα το επάνω δεξιά αντικείμενο έχει αρνητική αντίθεση( πιο σκούρο από το περιβάλλον του) , ενώ στην κάτω αριστερά εικόνα, το αντικείμενο έχει θετική αντίθεση( πιο φωτεινό από το περιβάλλον του).

Η σχέση με την οποία υπολογίζουμε την αντίθεση-contrast είναι (Weber Contrast):

$$Contrast = \frac{L_{object} - L_{background}}{L_{background}}$$

όπου,  $L_{object}$  είναι η λαμπρότητα του αντικειμένου και  $L_{background}$  η λαμπρότητα του παρακείμενου χώρου.



*Εικόνα 1-3 Η σημασία της αντίθεσης στην αναγνώριση των αντικειμένων*

Στην περίπτωση του αντικειμένου με την αρνητική αντίθεση, μπορούμε προσεγγιστικά να θεωρήσουμε πως η τιμή του contrast του είναι -0.95. Το πόσο αντίθεση χρειαζόμαστε για να αντιληφθούμε ένα αντικείμενο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η λαμπρότητα του δρόμου, η ηλικία, θάμβωση κ.α. Αυτό το ελάχιστο ποσό αντίθεσης καλείται κατώφλι αντίθεσης (threshold contrast). Βασίζεται στην πιθανότητα αναγνώρισης ενός αντικειμένου τουλάχιστον τις μισές φορές παρατήρησης (50%)

Ο σκοπός του οδο φωτισμού είναι να παράγει θετική αντίθεση στα αντικείμενα του δρόμου μεγαλύτερη από την τιμή του κατωφλίου αντίθεσης. Έρευνες έχουν δείξει ότι

η καλή ορατότητα στο δρόμο μπορεί να επιτευχθεί όταν το κοντράστ είναι 3 με 4 φορές πάνω από το κατώφλι αντίθεσης.

Επιπρόσθετα μια άλλη σημαντική παράμετρος αντίθεσης είναι το χρώμα. Το χρώμα αυξάνει το κοντράστ και έτσι ο οδηγός αντιλαμβάνεται καλύτερα τα αντικείμενα και τους πεζούς. Βέβαια να σημειωθεί πως η επίδραση του χρώματος εξαρτάται από τα χρώματα των αντικειμένων και την ποιότητα απόδοσης χρωμάτων από το σύστημα φωτισμού.



*Εικόνα 1-4 Επίδραση χρώματος στην αναγνώριση αντικειμένων και πεζών*

#### **1.4.2 Θάμβωση**

Η έννοια της θάμβωσης και τα είδη της αναλύονται διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας. Η θάμβωση ως έννοια είναι μια συνάρτηση της πηγής φωτισμού και της λαμπρότητας του οδοστρώματος. Ένα αντικείμενο το οποίο είναι οριακά ορατό (κατώφλι αντίθεσης) χωρίς την ύπαρξη της θάμβωσης, θα σταματήσει να είναι, εάν υπάρχει και η θάμβωση.

Η CIE χρησιμοποιεί για την μέτρηση της θάμβωσης τον δείκτη TI (Threshold Increment) ο οποίος εκφράζει την ποσότητα αντίθεσης που πρέπει να προστεθεί στο αντικείμενο και το περιβάλλον ώστε να αυτό να επανέλθει σε ορατά επίπεδα με πιθανότητα 50%. Δηλαδή ο δείκτης TI είναι το ποσοστό που πρέπει να αυξηθεί το κοντράστ για να έρθει στην τιμή κατωφλίου αντίθεσης. Ο τρόπος υπολογισμού της τιμής του δείκτη TI γίνεται στο κεφάλαιο του φωτισμού δρόμων.

#### **1.4.3 Χρόνος αντίληψης και αντίδρασης**

Ο χρόνος τον οποίο κάνει ένας οδηγός για να αντιληφθεί μια απρόσμενη αλλαγή μπροστά του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το αναμενόμενο του

συμβάντος η νοητική φόρτιση, η ηλικία και άλλοι. Οι χρόνοι αντίδρασης με βάση την κατηγοριοποίηση Green είναι:

- Αναμενόμενο συμβάν, ο οδηγός είναι σε εγρήγορση και γνωρίζει ότι υπάρχει η πιθανότητα να φρενάρει. Ο χρόνος αντίδρασης του είναι 0.7 δευτερόλεπτα, από τα οποία τα 0.5 είναι η αντίληψη και 0.2 είναι ο χρόνος δράσης
- Μη αναμενόμενο συμβάν, ο οδηγός φρενάρει απότομα διότι ο μπροστινός του φρέναρε σε πορτοκαλί φανάρι χωρίς προηγούμενη ένδειξη. 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 βοηθά τον οδηγό να μειώνει τους χρόνους αντίληψης του απροσδόκητου φαινομένου αυξάνοντας την αντίθεση και την ορατότητα κατά συνέπεια.



## **2 Οι φωτεινές πηγές και ο φωτισμός δρόμων**

### **2.1 Φωτισμός δρόμων: Ιστορική αναδρομή μέσα από την Νέα Υόρκη**

Η πρώτη καταγραφή δημόσιου οδικού φωτισμού χρονολογείται τον 10<sup>ο</sup> αιώνα στην Cordoba της Ισπανίας, την τότε πρωτεύουσα της Μαυριτανικής αυτοκρατορίας. Τότε είχαν τοποθετηθεί φανάρια κηροζίνης σε όλους τους κεντρικούς δρόμους της πόλης.

Από εκείνη την εποχή η τεχνολογία γύρω από τον οδοφωτισμό έχει υποστεί πολλές αλλαγές. Από τα φανάρια με καύσιμο το λίπος και το κερί, το 15<sup>ο</sup> αιώνα στην Ευρώπη και την Αμερική, στις λάμπες φωταερίου του 19<sup>ου</sup> αιώνα και στις ηλεκτρικές λάμπες και στις πυράκτωσης στα τέλη του 1800 (αρχές 20<sup>ου</sup> αιώνα).

Η τελευταία δεκαετία είναι αυτή που σηματοδοτεί την αλλαγή στην τεχνολογία φωτισμού, καθώς η τεχνολογία των φωτοεκπεμπουσών διόδων (L.E.Ds) είναι σε στάδιο που μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του οδοφωτισμού.

Για να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε την εξέλιξη του φωτισμού δρόμων μέσα στους αιώνες θα χρησιμοποιήσουμε την ιστορία του δημόσιου φωτισμού της Νέας Υόρκης, Η.Π.Α. Το δίκτυο οδικού φωτισμού της Νέας Υόρκης αποτελείται από περισσότερα από 300.000 φωτιστικά σώματα , κατανεμημένα σε δρόμους, πλατείες, εθνικές οδούς.

Στην Αποικιακή Αμερική ο φωτισμός των δρόμων ήταν υπόθεση των κατοίκων και όχι της κυβέρνησης. Στην Ν. Υόρκη του 1697 το κόστος συντήρησης των φαναριών στους δρόμους το είχαν τα νοικοκυριά. Μάλιστα το κόστος κάθε φαναριού επιμερίζονταν ανά επτά οικογένειες. Την τεχνική υποστήριξη δηλαδή το άναμμα το βράδυ με πυρσούς και το σβήσιμο νωρίς το πρωί το αναλάμβαναν συγκεκριμένοι τεχνικοί, των οποίων αποτελούσε η αποκλειστική απασχόληση τους (Lamp Lighters).

Το 1762 η πολιτεία της Ν.Υ τοποθέτησε ξύλινους ιστούς επάνω στους οποίους φώτιζαν αμυδρά φανάρια έχοντας ως καύσιμο λίπος φάλαινας (whale oil lamps). Αξίζει να σημειωθεί πως για τα επόμενα χρόνια ο φωτισμός των δρόμων δεν ήταν αυτονόητος κάθε βράδυ καθώς η λειτουργία του βασιζόνταν σε ημερολόγιο το οποίο έδειχνε τις νύκτες που προβλέπονταν έντονο φως φεγγαριού. Έτσι ανεξαρτήτως από τις καιρικές συνθήκες (ομίχλη, συννεφιά κλπ.) τα φώτα έμεναν σβηστά εάν ημερολογιακά το φως του φεγγαριού ήταν έντονο.

Από το 1893 στην πολιτεία της Ν.Υ υπήρχαν εγκατεστημένες ήδη 1500 ηλεκτρικές λάμπες να φωτίζουν τους δρόμους και τις πλατείες της πόλης. Μέσα στα επόμενα 100 χρόνια νέες τεχνολογίες έκαναν την εμφάνιση τους, από τις λάμπες πυρακτώσεως (incandescent lamps) στους λαμπτήρες υψηλής εκκένωσης (HID lamps). Κάθε τεχνολογικό βήμα καθιστούσε τον φωτισμό δρόμων πιο αποτελεσματικό πιο αποδοτικό και φυσικά πιο ασφαλή.

Το 1999 το υπουργείο Μεταφορών της πολιτείας (NYCDOT) άρχισε να αντικαθιστά τους λαμπτήρες HPS με καινούργια μοντέλα, πιο αποδοτικά. Από το 2001 έως το 2009, η πόλη αντικατέστησε σταδιακά όλους τους λαμπτήρες πυρακτώσεως των φαναριών με LED, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας κατά 81%. Υπολογίζεται ότι ο δημόσιος φωτισμός της πόλης καταλαμβάνει περίπου το 6% της καταναλισκόμενης ενέργειας. Το υπουργείο Μεταφορών είναι αποφασισμένο να εξοικονομήσει χρήματα μέσω της υιοθέτησης της τεχνολογίας LED στον φωτισμό δρόμων, γ' αυτό από το 2010 λειτουργούν πολλά πιλοτικά προγράμματα σε διάφορες συνοικίες της πόλης.

Η στροφή της Νέας Υόρκης σε ένα πιο αποδοτικό σύστημα φωτισμού δρόμου σηματοδοτεί την αλλαγή σε παγκόσμιο επίπεδο. Ήδη σε πολλές μεγάλες πόλεις ανά την υδρόγειο έχουν στηθεί προγράμματα αξιολόγησης και πιλοτικής εφαρμογής όπως στο Λονδίνο, το Παρίσι, το Χονγκ Κονγκ κ.α.

## **2.2 Η εξέλιξη των ηλεκτρικών λαμπτήρων φωτισμού δρόμων**

### **1880-1900**

Το 1880 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία των φωτιστικών δρόμου. Η ανακάλυψη των ηλεκτρικών λαμπτήρων την εποχή εκείνη σηματοδότησε μια νέα εποχή. Οι πρώτες λάμπες αποτελούσαν ουσιαστικά δυο ηλεκτρόδια μεταξύ των οποίων έρρεε μεγάλη ποσότητα ρεύματος. Μάλιστα ονομάστηκαν και «ηλεκτρικά κεριά». Η ποσότητα του φωτός που εξέπεμπαν ήταν τόσο μεγάλη που τα τοποθετούσαν σε πολύ ψηλούς ιστούς (20-45μ) και λειτουργούσαν ουσιαστικά ως φώτα πλημμύρας (flood lights)

### **1900-1930**

Η λάμπα πυρακτώσεως είχε μόλις κάνει την εμφάνιση της και είχε γίνει ευρέως αποδεκτή. Την περίοδο αυτή πολλές πόλεις ανά τον κόσμο χρησιμοποίησαν τους λαμπτήρες πυρακτώσεως για τον φωτισμό του οδικού τους δικτύου. Το μεγάλο



μέχρι σήμερα πλεονέκτημα της λάμπας πυρακτώσεως είναι η υψηλή της χρωματική απόδοση ενώ το μειονέκτημα της είναι η κατανάλωση ενέργειας.

- 1930-1940

Την περίοδο αυτή έκαναν την εμφάνιση τους οι λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι δεν μπόρεσαν να καθιερωθούν στον φωτισμό δρόμων, λόγω της έλλειψης κατευθυντικότητας του φωτός τους πράγμα που σήμαινε ότι μπορούσαν να τοποθετηθούν μόνο με πολύ χαμηλούς ιστούς.

- 1940-1960

Το 1948 εισήχθησαν στην αγορά οι λαμπτήρες υδραργύρου (mercury vapor, MV) και η χρήση τους εξαπλώθηκε κυρίως λόγω της μεγαλύτερης φωτεινότητας τους. Τα μειονεκτήματα όμως των λαμπτήρων ατμών υδραργύρου είναι αρκετά και το βασικότερο πρόβλημα τους είναι η πτώση της απόδοσης τους σε σύντομο χρονικό διάστημα. Σε συνδυασμό με το πρόβλημα της διαχείρισης του υδραργύρου που περιέχουν ως απόβλητο, άρχισαν σταδιακά να αντικαθίστανται από λαμπτήρες, Αλογονιδίων Μετάλλων( Metal Halide, MH), Ατμών Υψηλής Πίεσης (High Pressure Sodium, HPS) και Επαγωγής ( Induction Fixtures)

- 1960-1970

Η δεκαετία αυτή ανήκει στην τεχνολογία των λαμπτήρων Αλογονιδίων Μετάλλων( Metal Halide, MH) καθώς η χρήση τους γνωρίζει μεγάλη άνθηση. Τα πλεονεκτήματα τους ήταν η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους και η εξαιρετική τους χρωματική απόδοση σε σχέση με τους λαμπτήρες Ατμών Υδραργύρου. Οι λαμπτήρες MH χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα για φωτισμό διασταυρώσεων λόγω της πολύ υψηλής ποιότητας αναπαραγωγής χρώματος (δείκτης CRI) που διαθέτουν.

- 1970-2000

Κατά την διάρκεια της περιόδου αυτής η τεχνολογία των λαμπτήρων Ατμών Υψηλής Πίεσης (High Pressure Sodium, HPS) έγινε η κυρίαρχη τεχνολογία στις εφαρμογές φωτισμού δρόμων αντικαθιστώντας όλες τις προηγούμενες. Η λαμπτήρες HPS έδωσαν την σημερινή πορτοκαλοκίτρινη εικόνα των πόλεων μας. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 έκαναν την εμφάνιση τους οι λαμπτήρες επαγωγής οι οποίοι αποτελούσαν την πολλά υποσχόμενη τεχνολογία λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων τους ( χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, μεγάλη

διάρκεια ζωής, υψηλός δείκτης χρωματικής απόδοσης κ.α.). Όμως η περιεκτικότητα τους σε υδράργυρο και η ευαισθησία τους σε υψηλές θερμοκρασίες έκανε την ζήτηση τους να ατονήσει.

Τα φωτιστικά HPS τύπου Cobra Head γίνονται τα κυρίαρχα φωτιστικά σώματα δρόμων ανά τον κόσμο.

▪ 2000-σήμερα

Η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και τα υψηλά κόστη ενέργειας δημιουργούν την ανάγκη για φωτιστικά πιο αποδοτικά με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η περίοδος που διανύουμε μπορεί να θεωρηθεί και ως μεταβατική όσον αφορά την τεχνολογία φωτισμού δρόμων, καθώς είναι η περίοδος που τα LED αρχίζουν την επέλαση τους.

## **2.3 Ανάλυση βασικών τεχνολογιών λαμπτήρων φωτισμού δρόμων**

### **2.3.1 Εισαγωγή στα είδη φωτεινών πηγών**

Ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τεχνητού φωτός διακρίνουμε δύο κατηγορίες φωτεινών πηγών:

- Πυρακτώσεως, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην πυράκτωση νήματος με βάση το νόμο του Joule. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν χρειάζονται βοηθητικές διατάξεις για να λειτουργήσουν.
- Εκκενώσεως, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στα φαινόμενα εκκενώσεως. Το φως προέρχεται από τον ιονισμό και τη διέγερση ατόμων του στοιχείου που βρίσκεται μέσα στο λαμπτήρα και το οποίο δίνει την ονομασία του στο λαμπτήρα. Ανάλογα με την πίεση που επικρατεί στο θάλαμο εκκενώσεως διακρίνουμε τους λαμπτήρες εκκενώσεως σε δυο κατηγορίες:
  - ✓ Λαμπτήρες Υψηλής Πιέσεως, στους οποίους επικρατεί πίεση περίπου 200mm Hg
  - ✓ Λαμπτήρες Χαμηλής Πιέσεως, στους οποίους επικρατεί πίεση περίπου 5-10mm Hg

Η διέγερση του αερίου παρουσιάζει σημαντικές λειτουργικές διαφορές σε σύγκριση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως και ιδιαίτερα ότι παρουσιάζουν «αρνητική αντίσταση» της εκκένωσης αερίου. Γι' αυτό το λόγο για να λειτουργήσουν οι λαμπτήρες εκκενώσεως πρέπει να συνδέσουμε σε σειρά στο κύκλωμα τους μια

διάταξη γνωστή ως στραγγαλιστικό πηνίο ή το λεγόμενο Ballast. Εξάιρεση στον κανόνα αποτελούν οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσεως στους οποίους αντί στραγγαλιστικού πηνίου χρησιμοποιείται αυτομετασχηματιστής.

Τα στραγγαλιστικά πηνία διακρίνονται σε ηλεκτρομαγνητικά και σε ηλεκτρονικά υψηλής συχνότητας και χαμηλής συχνότητας. Τα τελευταία διακρίνονται σε κανονικά και ρυθμιζόμενα (dimnable).

Η διάρκεια ζωής και η φωτεινή ισχύς του λαμπτήρα βασίζονται στην κατάλληλη επιλογή του ballast το οποίο θα πρέπει να παρέχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Ο βοηθητικός εξοπλισμός καταναλώνει ισχύ και ο συνολικός λόγος  $lm/W$  είναι μικρότερος από αυτόν του λαμπτήρα.

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει την τάση έναυσης όλων των λαμπτήρων εκκένωσης και σε κάποιες περιπτώσεις υψηλότερες τάσεις έναυσης από τις ονομαστικές συστήνονται για εγκαταστάσεις εξωτερικού φωτισμού σε κρύα κλίματα. Τα ballasts σε εφαρμογές φωτισμού οδικών δικτύων είναι σχεδιασμένα ώστε να παρέχουν την αναγκαία τάση για την έναυση και λειτουργία σε θερμοκρασίες έως και  $-29^{\circ}C$ .

### **2.3.2 Λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης**

Οι λάμπες ατμών υψηλής πίεσης οφείλουν το φως τους στο ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τους ατμούς νατρίου. Οι λαμπτήρες αυτοί είναι κατασκευασμένοι με δυο σωλήνες, ο ένας μέσα στον άλλον. Ο εσωτερικός σωλήνας είναι κατασκευασμένος από πολυκρυσταλλική αλουμίνα, που είναι ανθεκτική στο νάτριο σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει μεγάλο σημείο τήξης. Αυτό το υλικό, το οποίο είναι διαφανές, παρέχει μεγάλη απόδοση εκπομπής φωτός (μεγαλύτερη από 90%). Η κατασκευή ενός τέτοιου λαμπτήρα φαίνεται στο σχήμα

Η πολυκρυσταλλική αλουμίνα δεν μπορεί να λιώσει χωρίς να σπάσει. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο σφράγισμα. Μπορεί να είναι είτε από γυαλί, είτε από ατσάλι. Αυτά τα υλικά προσδίδουν στην αλουμίνα μεγάλη αντοχή στο νάτριο υψηλής θερμοκρασίας. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κεραμικό σφράγισμα. Ο σωλήνας περιέχει ξένο ως αέριο έναυσης, και μια μικρή ποσότητα μίγματος νατρίου και υδραργύρου, το οποίο είναι μερικώς ατμοποιημένο όταν ο λαμπτήρας βρεθεί σε θερμοκρασία λειτουργίας. Ο υδράργυρος λειτουργεί ως αέριο απομόνωσης και αυξάνει την πίεση και την τάση λειτουργίας του λαμπτήρα.

Το εξωτερικό γυάλινο κάλυμμα είναι κενό και ο ρόλος του είναι να αποτρέπει αντίδραση των μεταλλικών μερών του εσωτερικού σωλήνα, αλλά και να διατηρεί τη θερμοκρασία του απομονώνοντας τον από τις περιβαλλοντικές θερμοκρασίες.

Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης εκπέμπουν ακτινοβολία σε όλο το ορατό φάσμα, σε αντίθεση με της χαμηλής πίεσης που εκπέμπουν κυρίως στα 589 nm. Αυξάνοντας την πίεση του νατρίου, πρακτικά αυξάνεται το ποσοστό της ακτινοβολίας σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Όμως, η διάρκεια ζωής και η απόδοση μειώνονται.

Λόγω της μικρής διαμέτρου των σωλήνων των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης, δεν μπορεί να τοποθετηθεί ηλεκτρόδιο έναυσης μέσα στο σωλήνα. Αντί γι' αυτό, τροφοδοτείται παλμός υψηλής συχνότητας. Μερικοί ειδικοί λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης χρησιμοποιούν ένα ειδικό μίγμα αερίων έναυσης (ένα συνδυασμό από αργό και νέο που απαιτεί χαμηλότερη τάση έναυσης απ' ότι κάθε αέριο χωριστά).

Εφόσον ο λαμπτήρας ατμών νατρίου υψηλής πίεσης δεν περιέχει ηλεκτρόδιο έναυσης, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται ένας παλμός υψηλής τάσης και συχνότητας που ιονίζει το ξένο, το οποίο είναι το αέριο έναυσης. Μόλις λειτουργήσει, ο λαμπτήρας ζεσταίνεται μέχρι να αποκτήσει τη μέγιστη απόδοση του σε περίπου δέκα λεπτά, κατά την διάρκεια των οποίων το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός αλλάζει μέχρι να σταθεροποιηθεί.

Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης έχουν τάση που μεταβάλλεται με την ισχύ. Γι' αυτό έχουν καθοριστεί οι παράμετροι λειτουργίας για μέγιστη και ελάχιστη ισχύ. Στο σχήμα φαίνονται τα όρια τάσης και ισχύος για λαμπτήρα ατμών νατρίου υψηλής πίεσης ονομαστικής ισχύος 450W. Τα όρια αυτά σχηματίζουν ένα πλάγιο παραλληλόγραμμο στο σύστημα συντεταγμένων τάσης- ισχύος. Μεσολαμβάνουν τέσσερα βασικά κυκλώματα που είναι σχεδιασμένα να διατηρούν το σημείο λειτουργίας του λαμπτήρα μέσα στο «τραπεζοειδές». Προκειμένου να γίνει έναυση του τόξου, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα έναυσης τροφοδοτεί ένα παλμό τάσης και παράγει περίπου 4000V πλάτος τάσης για ένα λαμπτήρα 1000W και 2500V πλάτος τάσης για λαμπτήρες άλλης ισχύος, τουλάχιστον μια φορά σε κάθε κύκλο στα 60Hz έως να λειτουργήσει ο λαμπτήρας.

Ο μέσος χρόνος ζωής ενός λαμπτήρα καθορίζεται από το χρόνο εκείνο μετά τον οποίο το 50% μιας μεγάλης ομάδας λαμπτήρων είναι ακόμα σε λειτουργία. Η διαδικασία μέτρησης της διάρκειας ζωής περιλαμβάνει κύκλους λειτουργίας με 11 ώρες λαμπτήρες σε λειτουργία και μία ώρα σβηστούς. Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης έχουν ηλεκτρόδια παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη μικρότερη διάμετρο του τόξου του λαμπτήρα, δίνει στους λαμπτήρες ατμών νατρίου πολύ καλή διατήρηση των lumen.

Η διάρκεια ζωής αυτών των λαμπτήρων περιορίζεται από μια αργή αύξηση της τάσης του λαμπτήρα που επιδρά αρνητικά στην διάρκεια ζωής τους. Αυτή η αύξηση κυρίως προκαλείται από το μαύρισμα του γυαλιού εξαιτίας των εκπομπών του ηλεκτροδίου. Το μαύρισμα αυτό απορροφά ακτινοβολία, η οποία θερμαίνει τα άκρα του γυάλινου περιβλήματος και εξατμίζει επιπρόσθετη ποσότητα νατρίου. Έτσι αυξάνεται η πίεση και κατά συνέπεια η τάση. Άλλοι λόγοι που προκαλούν την αύξηση της τάσης είναι η διάχυση του νατρίου από τα στεγανοποιημένα άκρα του σωλήνα και η είσοδος σκόνης και ακαθαρσιών μέσα στο σωλήνα.

Όταν το στραγγαλιστικό πηνίο δεν μπορεί πλέον να τροφοδοτήσει τάση επαρκή για την επανέναυση του τόξου κατά την διάρκεια κάθε μισού ηλεκτρικού κύκλου, ο λαμπτήρας θα σβήσει. Όταν κρυώσει θα λειτουργήσει ξανά και θα ζεσταθεί μέχρι εκείνο το σημείο που η τάση θα αυξηθεί τόσο που το στραγγαλιστικό πηνίο δεν θα μπορεί να την υποστηρίξει.

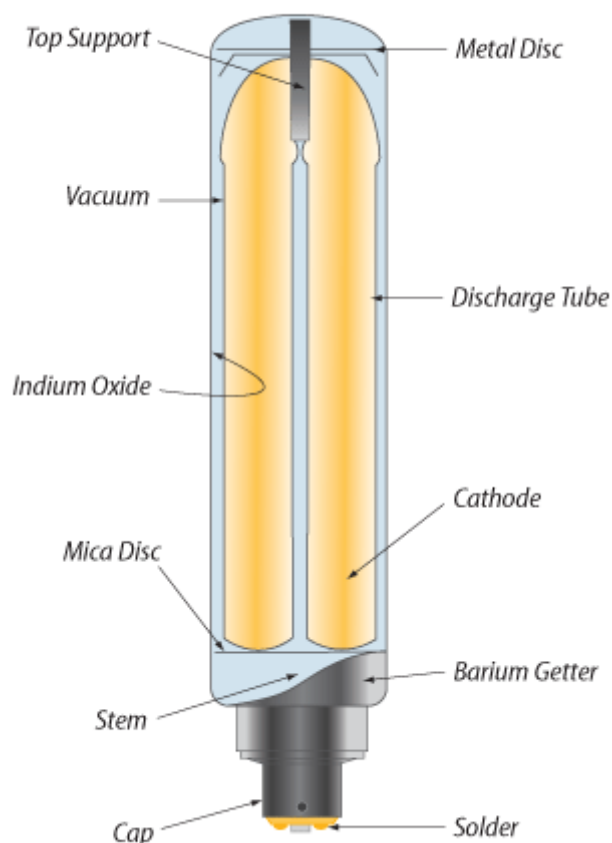
Συνήθως, ο χρόνος ζωής ενός λαμπτήρα ατμών νατρίου υψηλής πίεσης είναι περίπου 24000 ώρες και εξαρτάται κυρίως από τον σχεδιασμό του λαμπτήρα.

### **2.3.3 Λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης**

Υπάρχουν δυο είδη λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης: επίμηκες και σχήμα U. Ο επιμήκης λαμπτήρας έχει σωλήνα εκκένωσης με δυο άκρα, με καλά σφραγισμένα ηλεκτρόδια σε κάθε άκρο. Ο σωλήνας εκκένωσης του είναι φτιαγμένος από ειδικό γυαλί, ανθεκτικό στο νάτριο και είναι καλυμμένος από ένα εξωτερικό περίβλημα μέσα στο οποίο υπάρχει κενό. Ο τύπος U έχει τον σωλήνα εκκένωσης αναδιπλωμένο σε σχήμα φουρκέτας και τα άκρα του είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο.

Είναι διαθέσιμα δυο είδη του τύπου U που βασίζονται σε διαφορετικές μεθόδους διατήρησης ομοιόμορφης κατανομής του νατρίου στο σωλήνα εκκένωσης. Εφόσον οι λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης περιέχουν μεταλλικό νάτριο, το μέταλλο θα τείνει να στερεοποιηθεί στα ψυχρότερα σημεία του σωλήνα που βρίσκονται στην περιοχή αναδίπλωσης του. Αν αυτό δεν ελεγχθεί, το συσσωρευμένο νάτριο στα ψυχρά σημεία θα οδηγήσει σε σχηματισμό τμημάτων τόξου νέου και

## Low-Pressure Sodium



Εικόνα 2-1 Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης

μονοχρωματικό και αποτελείται από μια διπλή γραμμή κοντά στο κέντρο του ορατού φάσματος στα 589,0 και 589,6 nm. Το αέριο έναυσης είναι το νέο, με μικρά πρόσθετα αργού, ξένου ή ηλίου. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος σε φωτεινή ροή, η πίεση του νατρίου πρέπει να είναι της τάξεως των 0,7Pa, που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνος εκκένωσης περίπου 260°C. Οποιαδήποτε απόκλιση από αυτήν την πίεση επηρεάζει την απόδοση. Για να διατηρηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας για την συγκεκριμένη πίεση, ο σωλήνας εκκένωσης, συνήθως βρίσκεται στο κενό.

αργού αφού δεν θα υπάρχει επαρκές ατμοποιημένο νάτριο. Υπάρχουν δυο τρόποι ελέγχου του φαινομένου:

Ο ένας είναι να κατασκευαστούν λακκάκια στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα εκκένωσης ώστε να υπάρξουν εναλλακτικά ψυχρά σημεία πιο ομοιόμορφα κατανεμημένα. Ένας άλλος τρόπος ελέγχου είναι η χρήση ενός θερμοανακλαστικού φιλμ κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού περιβλήματος.

Στους λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης το τόξο δημιουργείται από το αεριοποιημένο νάτριο. Το φως παράγεται από το τόξο νατρίου χαμηλής πίεσης, που είναι σχεδόν

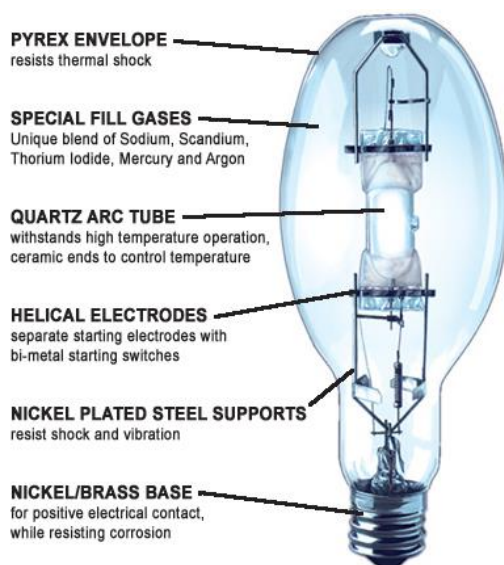
Ο απαιτούμενος χρόνος ανάμεσα στην έναυση και στην μέγιστη απόδοση είναι εφτά με δεκαπέντε λεπτά. Μόλις λειτουργήσει ο λαμπτήρας, το εκπεμπόμενο φως έχει το χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα λόγω της εκκένωσης του νέου, και βαθμιαία μετατρέπεται σε κίτρινο όσο εξατμίζεται το νάτριο. Η θερμή επανεκκίνηση είναι καλή και οι περισσότεροι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης ανάβουν αμέσως μετά τη διακοπή και επανατροφοδότηση ηλεκτρικής ισχύος.

### 2.3.4 Λαμπτήρες ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης

Στους λαμπτήρες υδραργύρου, το φως παράγεται από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των ατμών υδραργύρου. Εφόσον ο υδράργυρος έχει χαμηλή πίεση εξάτμισης σε θερμοκρασία δωματίου, και ακόμη χαμηλότερη όταν έχει κρύο, χρησιμοποιείται ένα μικρό μέρος αργού, το οποίο ιονίζεται πιο εύκολα, για να διευκολυνθεί η έναυση. Το αρχικό τόξο σχηματίζεται από τον ιονισμό του αργού. Η θερμότητα που παράγει προκαλεί τη μερική εξάτμιση του υδραργύρου, και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ατμοποιηθεί όλος ο υδράργυρος.

Οι περισσότεροι λαμπτήρες υδραργύρου είναι κατασκευασμένοι με δυο περιβλήματα: το εσωτερικό περίβλημα που περιβάλλει το σχηματιζόμενο τόξο και το εξωτερικό περίβλημα που:

- Προστατεύει το σωλήνα εκκένωσης από εξωτερικές επιδράσεις και μεταβολές της θερμοκρασίας.
- Περιέχει αδρανές αέριο που αποτρέπει την οξείδωση των εσωτερικών τμημάτων και ακόμη αυξάνει την τάση αποκοπής.
- Λειτουργεί σαν φίλτρο για να απομονώνει ακτινοβολία συγκεκριμένων μηκών κύματος (UV-B, UV-C)



Εικόνα 2-2 Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης

Η πίεση λειτουργίας του λαμπτήρα υδραργύρου είναι υψηλή για τη χαρακτηριστική φασματική διανομή ισχύος του. Γενικά, υψηλότερη πίεση λειτουργίας μετακινεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος το μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Στην ορατή περιοχή το φάσμα του υδραργύρου αποτελείται από πέντε βασικές γραμμές που έχουν σαν αποτέλεσμα ένα κυανοπράσινο φως( 404,7, 435,8, 546,1, 577 και 579 nm με αποδόσεις από 30 έως 65 lm/W χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες των στραγγαλιστικών πηνίων.

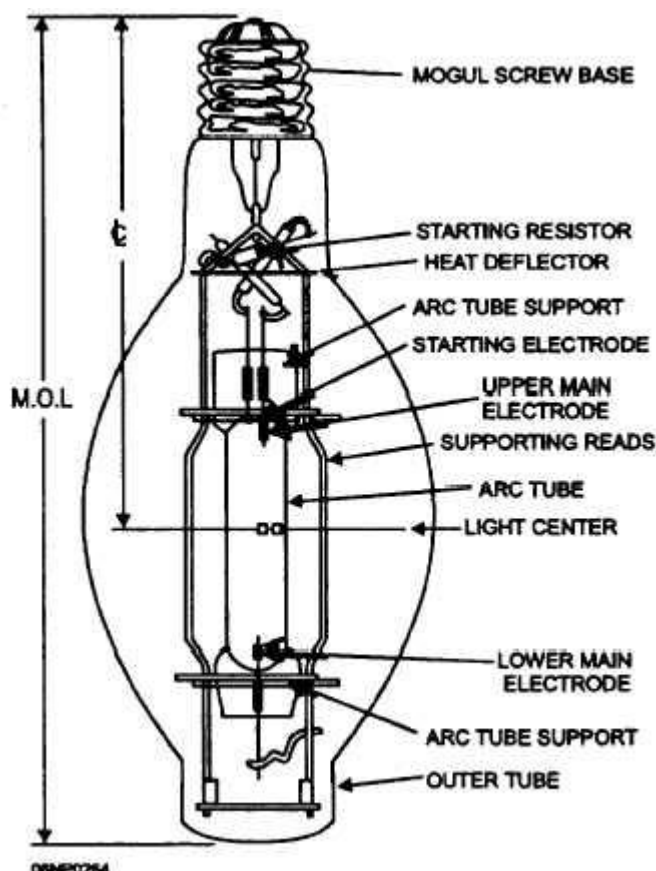
Ένα σημαντικό ποσοστό της εκπεμπόμενης ενέργειας από το τόξο υδραργύρου είναι στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος. Με τη χρήση φωσφορικών καλυμμάτων στην εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού περιβλήματος, ένα τμήμα της υπεριώδους ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ορατό φως. Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι λαμπτήρες αυτού του τύπου είναι επικαλυμμένοι με φώσφορο που εκπέμπει ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (πορτοκαλοκόκκινο). Έτσι βελτιώνεται η απόδοση και ο προσδιορισμός των χρωμάτων. Ο φώσφορος μπορεί να αναμειχθεί με άλλα στοιχεία ώστε να παράγει πιο ψυχρά ή πιο θερμά χρώματα.

Η μορφή των λαμπτήρων υδραργύρου που υπάρχει στο εμπόριο μπορεί να είναι τύπου κώδωνα ή τύπου επιμήκους σωλήνα. Βασικό μειονέκτημα τους είναι η υποβάθμιση της φωτεινής έντασης σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας. Σε πολλές περιπτώσεις οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου λειτουργούν για πολύ καιρό μετά τον εκτιμώμενο χρόνο λειτουργίας, αλλά για την ίδια παροχή ισχύος αποδίδουν πολύ πιο θαμπό φως.

Άλλο ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι αποδίδουν φωτισμό κυανοπράσινης απόχρωσης. Οι λαμπτήρες υδραργύρου χρησιμοποιούνται συνήθως για φωτισμό δρόμων, βιομηχανικών χώρων, σταδίων, πλατειών και γενικότερα εξωτερικών χώρων. Ο συγκεκριμένος τύπος λαμπτήρων προτιμάται σε περιπτώσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος.



### 2.3.5 Λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων



Εικόνα 2-3 Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων

και επαναλαμβάνεται ο κύκλος.

Οι εμπορικά διαθέσιμοι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων έχουν αποδόσεις από 75 έως 125 lm/W, χωρίς να υπολογίζουμε τις απώλειες των ballast. Σχεδόν όλα τα είδη των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων με λευκό φως παράγουν απόδοση χρώματος εξίσου καλή ή και ανώτερη από αυτή που παράγουν οι λαμπτήρες υδραργύρου με επικάλυψη φωσφόρου.

Τα ακτινοβολούντα μέταλλα που χρησιμοποιούνται έχουν επιλεκτικά φασματικά χαρακτηριστικά εκπομπής. Ορισμένα παράγουν ένα μήκος κύματος και άλλα ακτινοβολούν ένα πλήθος διακριτών μηκών κύματος. Για να μπορέσουμε να επιτύχουμε ένα πλήρες και ισορροπημένο φάσμα χρησιμοποιούνται δυο βασικοί συνδυασμοί αλογόνων

- ✓ Σκανδίου και νατρίου
- ✓ Δυσπροσίου, ολμίου και θαλίου

Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων είναι παρόμοιοι στην κατασκευή τους με τους λαμπτήρες υδραργύρου. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι ο σωλήνας εκκένωσης περιέχει διάφορα μεταλλικά αλογονίδια επιπρόσθετα με τον υδράργυρο και το αργό. Όταν οι ατμοί των αλογονιδίων του μετάλλου πλησιάσουν τον πυρήνα της εκκένωσης, που έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία, διασπώνται σε αλογόνα και μέταλλα. Τα μέταλλα ακτινοβολούν στο δικό τους φάσμα, ενώ τα άτομα αλογόνου κινούνται προς τα τοιχώματα του σωλήνα που είναι πιο ψυχρά, επανασυνδέονται

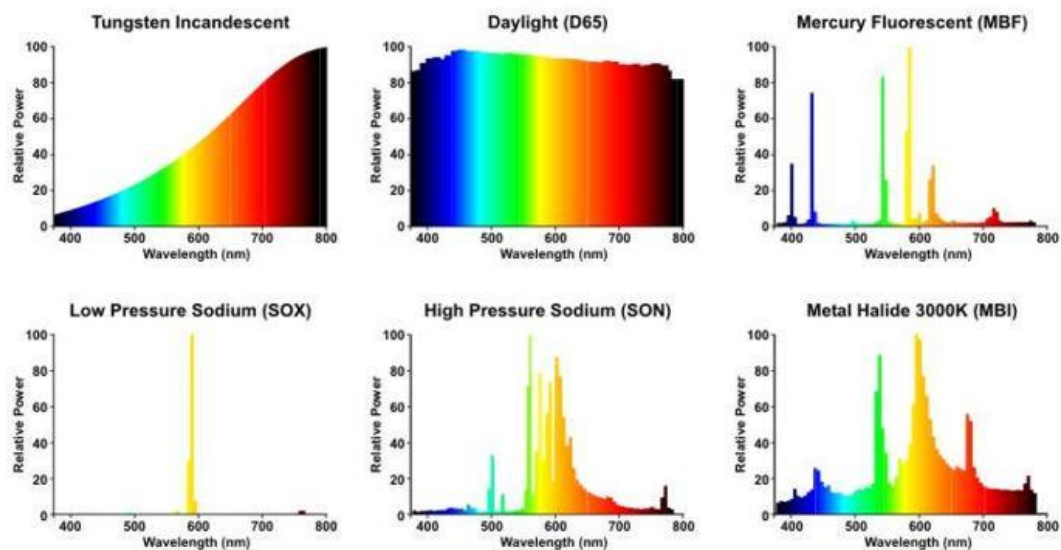
Με την τεχνική των μεταλλικών αλογονιδίων μπορούν να παραχθούν συγκεκριμένα χρώματα. Νάτριο για πορτοκαλί, θάλιο για πράσινο, ίνδιο για μπλε και σίδηρος για υπεριώδες. Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων είναι επίσης διαθέσιμοι και με επικάλυψη φωσφόρου στο εξωτερικό περίβλημα για επιπρόσθετη ρύθμιση του χρώματος καθώς επίσης και για μείωση της θερμοκρασίας χρώματος του λαμπτήρα.

Η μέθοδος έναυσης των περισσότερων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων πάνω από 150W είναι ίδια με αυτή των λαμπτήρων υδραργύρου. Παρ' όλα αυτά εξαιτίας της παρουσίας των αλογονιδίων, η απαιτούμενη τάση έναυσης για αρκετούς τύπους λαμπτήρων είναι υψηλότερη απ' ότι στους λαμπτήρες υδραργύρου.

Κατά την εκκίνηση και καθώς ο λαμπτήρας θερμαίνεται παρατηρούνται αλλαγές στο χρωματισμό του. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην εξάτμιση των αλογόνων μέχρι σε κάποιο σημείο να αποκατασταθεί το χρώμα ισορροπίας. Ο χρόνος που απαιτείται για χρωματική και ηλεκτρική ισορροπία είναι 2-10 λεπτά.

Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τους λαμπτήρες υδραργύρου, έτσι ο χρόνος ψύξης και μείωσης της πίεσης του ατμού είναι μεγαλύτερος. Ο χρόνος επανέναυσης για τον λόγο αυτό είναι περίπου 15 λεπτά. Η μέση διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων κυμαίνεται από 7,500 μέχρι και 20,000 ώρες.

Παρέχουν συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές φωτεινές πηγές. Αποδίδουν καλύτερη ποιότητα φωτισμού σε σχέση με τους λαμπτήρες υδραργύρου και νατρίου και προσφέρουν ποικιλία θερμοκρασιών χρώματος, καλύπτοντας μεγάλο μέρος των απαιτήσεων. Δημιουργούν ένα ευχάριστο περιβάλλον, πιο φιλικό προς την αισθητική του ανθρώπου.



*Εικόνα 2-4 Φάσματα εκπομπής ακτινοβολίας διάφορων συμβατικών φωτεινών πηγών*

Στην Εικόνα 2-4 μπορούμε να παρατηρήσουμε τα διαφορετικά φάσματα ακτινοβολίας των συμβατικών τεχνολογιών λαμπτήρων φωτισμού και να αντιληφθούμε την σημασία του εύρους εκπομπής στην χρωματική απόδοση της φωτεινής πηγής.

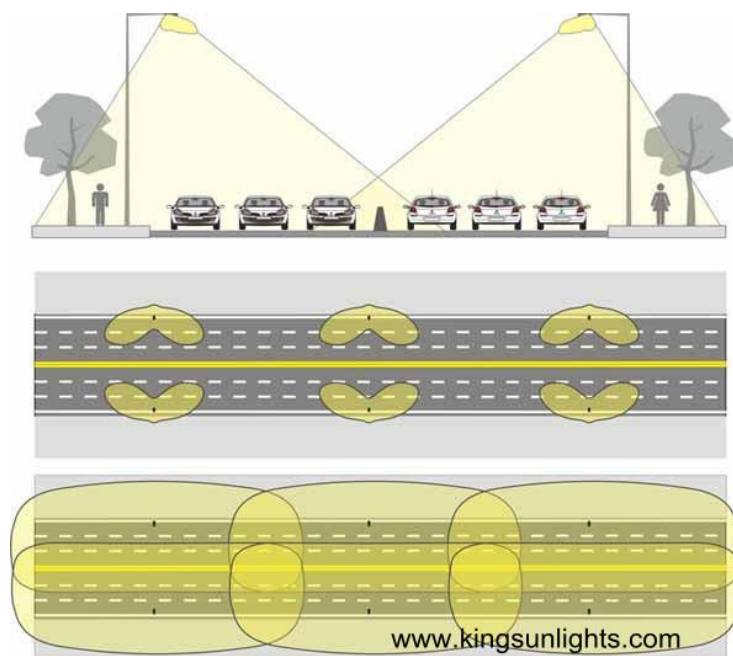


### 3 Φωτιστικά σώματα δρόμου και κατηγοριοποιήσεις

#### 3.1 Γενικά για τα φωτιστικά δρόμου

Τα φωτιστικά που σχεδιάζονται για χρήση σε φωτισμό δρόμων, έχουν ως σκοπό να παρέχουν χαμηλής θάμβωσης φωτισμό έτσι ώστε οι χρήστες για τους οποίους απευθύνεται ο δρόμος να παρατηρούν το δρόμο, τους πεζούς, αντικείμενα στο δρόμο και λοιπά οχήματα. Η επιλογή του σωστού για τις απαιτήσεις του δρόμου φωτιστικού, βασίζεται σε πολλούς παράγοντες όπως η οριζόντια και η κάθετη κατανομή του φωτός του φωτιστικού, η απόσταση των ιστών του δρόμου, το ύψος των ιστών, και λοιπές τεχνικές δυσκολίες. Επιπρόσθετα η επιλογή του φωτιστικού θα πρέπει να στοχεύει προς την κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης της φωτορύπανσης.

Πλέον παράλληλα με όλους τους παραπάνω παράγοντες ένας μελετητής θα πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψιν του την απόδοση του φωτιστικού, την κατανάλωση ενέργειας καθώς και την διάρκεια ζωής του. Τα φωτιστικά τεχνολογίας LED συνδυάζουν όλα τα παραπάνω και τα επόμενα χρόνια θα αντικαταστήσουν τα συμβατικά φωτιστικά, δηλαδή αυτά με λαμπτήρες HID.

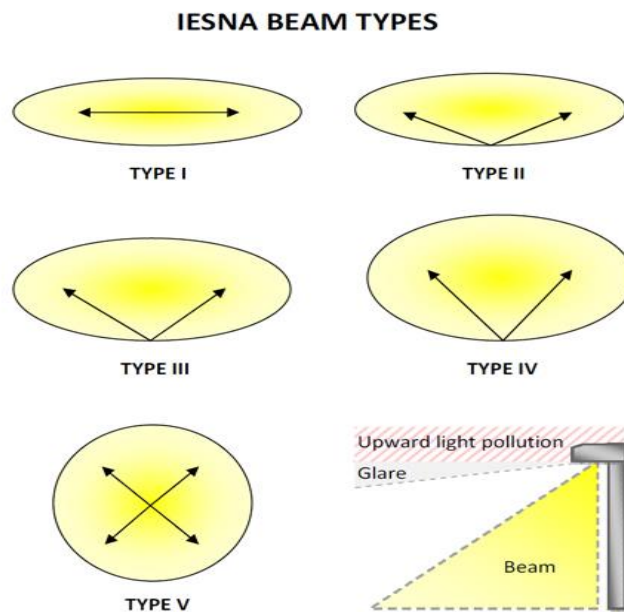


Εικόνα 3-1 Παράδειγμα φωτισμού με συγκεκριμένο τύπο διάδοσης φωτός

### 3.2 Κατηγοριοποίηση φωτιστικών με βάση την κατανομή φωτός

Τα φωτιστικά δρόμου κατηγοριοποιούνται με βάση τρία κριτήρια:

- I. **Την Κάθετη Κατανομή Φωτός (Lateral Light Distribution).** Η εγκάρσια κατανομή φωτός του φωτιστικού, δηλαδή αυτή που είναι κάθετη στον αυτοκινητόδρομο μπορεί να διαχωριστεί σε πέντε τύπους ανάλογα με τον τρόπο φωτισμού. Ο τύπος I είναι μακρύς και στενός και εφαρμόζεται σε στενούς δρόμους. Ο τύπος III συναντάται πιο συχνά και απευθύνεται σε αυτοκινητόδρομους με μεγαλύτερο πλάτος και περισσότερες από 2 λωρίδες κυκλοφορίας. Ο τύπος IV φωτίζει περισσότερο το δρόμο παρά το πεζοδρόμιο (Curb), ο τύπος V είναι συμμετρικός. Πολλοί κατασκευαστές φωτιστικών έχουν κατασκευάσει και τον τετραγωνικό τύπο V που χρησιμοποιείται ευρέως σε χώρους στάθμευσης.



Εικόνα 3-2 Τύποι κατανομής φωτός κατά IESNA

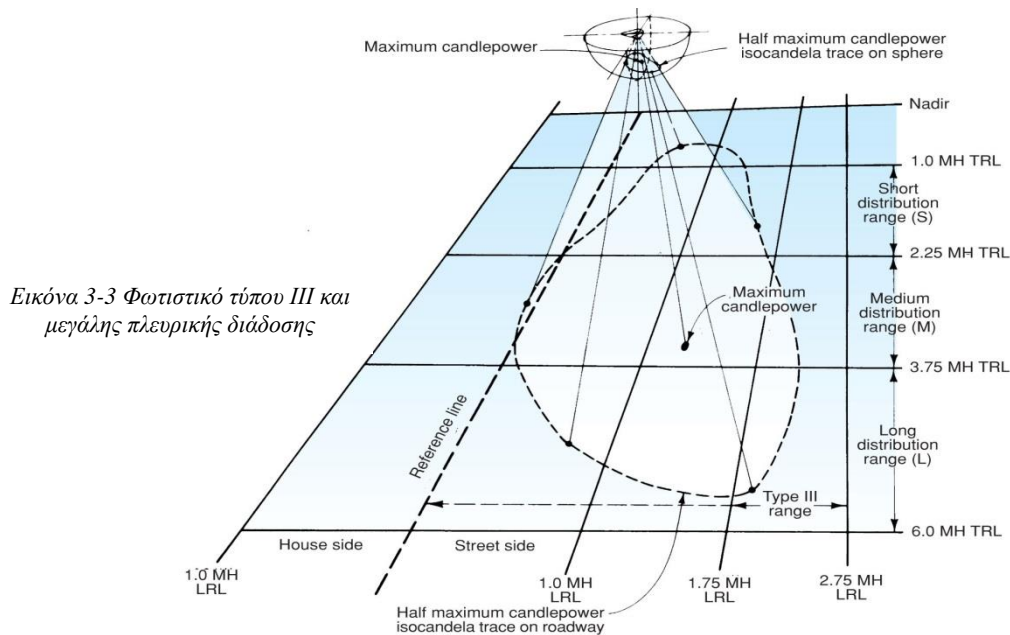
- II. **Διαμήκης Κατανομή Φωτός (Longitudinal ή Vertical Light Distribution).** Η διαμήκης κατανομή περιγράφει πόσο μακριά φτάνει το φως του φωτιστικού κατά μήκος του δρόμου. Ουσιαστικά πρόκειται για την μέγιστη γωνία του πολικού διαγράμματος στο επίπεδο C0-C180. Οι τύποι που συναντάμε συνήθως είναι οι μικρού ανοίγματος, οι μεσαίου, και οι μεγάλου. Ο πιο συνήθης τύπος είναι αυτός του μεσαίου ανοίγματος, διότι με τα φωτιστικά μικρού ανοίγματος χρειαζόμαστε μικρή απόσταση ιστών και με το μεγάλο

άνοιγμα οδηγούμαστε κοντά στην κατηγορία ημι-αποκοπής ( θα αναλυθεί παρακάτω) και σε επικίνδυνη για τους οδηγούς θάμβωση.

Συγκεκριμένα τα όρια για την πλευρική κατανομή φωτός είναι:

- Μικρή πλευρική διάδοση : 1.0 MH μέχρι 2.25 MH
- Μεσαία πλευρική διάδοση : 2.25 MH μέχρι 3.75 MH
- Μεγάλη πλευρική διάδοση: 3.75 μέχρι 6.0 MH

Όπου MH είναι το ύψος ανάρτησης του φωτιστικού.

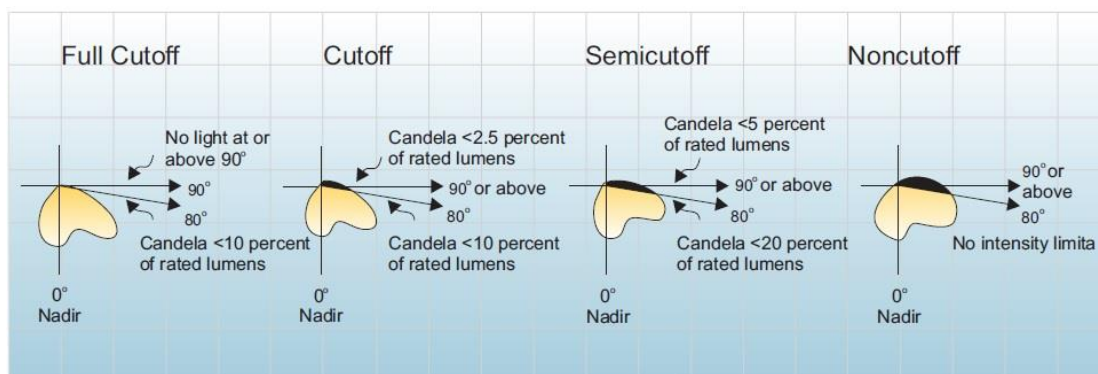


### III. Έλεγχος της διάδοσης του φωτός πάνω από την περιοχή της μέγιστης έντασης φωτισμού.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι οπτικών συστημάτων φωτιστικών, που προσφέρουν διαφορετικούς βαθμούς ελέγχου. Αυτοί περιλαμβάνουν τα εξής: μη αποκοπή (non cutoff), ημι-αποκοπή( semi cutoff), αποκοπή (cutoff), πλήρους αποκοπής ( full cutoff).

Το οπτικό σύστημα μη αποκοπής επιτρέπει στο φως να εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Πολλά διακοσμητικά φωτιστικά σώματα είναι μη αποκοπής και συνήθως χρησιμοποιούνται για να φωτίσουν δέντρα δημιουργώντας πρόβλημα φωτορύπανσης. Τα φωτιστικά μη αποκοπής δεν χρησιμοποιούνται για φωτισμό δρόμων.

Το οπτικό σύστημα ημι-αποκοπής επιτρέπει στο μεγαλύτερο μέρος του φωτός να εκπέμπεται κάτω από τις 90°, αλλά και ένα μικρό ποσοστό μέχρι και 5% να εκπέμπεται πάνω από τις 90°. Τα φωτιστικά αυτά είναι αρκετά αποτελεσματικά στο να διαχέουν το φως σε μια μεγάλη κατευθυνόμενη περιοχή του δρόμου. Συνήθως τοποθετούνται σε ψηλούς ιστούς για να αποφεύγεται η θάμβωση των οδηγών.



Εικόνα 3-4 Ο διαχωρισμός των φωτιστικών με βάση τον βαθμό ελέγχου στην φωτεινή δέσμη

Το σύστημα της αποκοπής έχει περισσότερο ελεγχόμενο φωτισμό από τα ημι-αποκοπής. Το ποσοστό που επιτρέπει να διαφύγει πάνω από τις 90° είναι λιγότερο από 2,5%. Τα φωτιστικά αποκοπής μπορούν να συναντηθούν για παράδειγμα σε χώρους στάθμευσης όπου επιδιώκεται μεγάλη απόσταση ιστών.

Ο έλεγχος πλήρους αποκοπής δεν επιτρέπει στο φως να διαφύγει πέρα από τις 90°. Η ικανότητα του να κατευθύνει το φως στο έδαφος με αυστηρά καθορισμένο τρόπο έχει αυξήσει την χρήση του για λόγους μειωμένης θάμβωσης αλλά και φωτορύπανσης. Τα φωτιστικά πλήρους αποκοπής για να μπορέσουν να καλύψουν τις απαιτήσεις σε ομοιομορφίες των κανονισμών οδοφωτισμού πρέπει συνήθως να τοποθετούνται σε μεγαλύτερο ύψος από τα φωτιστικά αποκοπής και ημι-αποκοπής

### **3.3 Κατηγοριοποίηση φωτιστικών με βάση την μηχανική αντοχή τους.**

Ένας ασφαλής τρόπος κατηγοριοποίησης των φωτιστικών δρόμου με βάση την αντοχή τους σε περιβαλλοντικές επιδράσεις είναι ο δείκτης IP. Χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία φωτισμού και θεωρείται πλέον αξιόπιστος.

#### Δείκτης Προστασίας IP



Ο δείκτης IP (Ingress Protection Code) κατατάσσει και βαθμονομεί το επίπεδο προστασίας από εισβολές στερεών αντικειμένων (συμπεριλαμβανομένων και ανθρώπινων μερών όπως δάκτυλα), σκόνης, υγρών σε μηχανικές δομές με ηλεκτρικό περιεχόμενο. Θεσπίστηκε από την International Electro technical Commission (IEC)

Τα ψηφία του κώδικα φανερώνουν την συμμόρφωση με τις δοκιμασίες που επιβάλλονται από τα συμβεβλημένα εργαστήρια.

### Μορφή Κώδικα

Πίνακας 3-1 Επεξήγηση κώδικα προστασίας IP

Ένδειξη IP	Προστασία έναντι στερεών αντικειμένων	Προστασία έναντι υγρών	Μηχανική Αντοχή	Άλλες προστασίες
IP	0-6	0-8	0-9	Γράμμα
Υποχρεωτικό	Υποχρεωτικό	Υποχρεωτικό	Δεν χρησιμοποιείται πλέον	Προαιρετικό

### Διαβάθμιση Αντοχής σε σωματίδια

Πίνακας 3-2 Διαβάθμιση αντοχής σε στερεά σωματίδια

Πρώτο Ψηφίο	Μέγεθος αντικειμένου	Προστασία έναντι (Παραδείγματα)
0	-	Δεν προσφέρει προστασία
1	>50mm	Προστασία από μεγάλα τμήματα του σώματος
2	>12.5mm	Προστασία από είσοδο δακτύλων ή παρόμοιων αντικειμένων
3	>2.5mm	Προστασία από εργαλεία, καλώδια, βίδες
4	>1.0mm	Προστασία από τα περισσότερα καλώδια, βίδες κ.α.
5	Προστασία από σκόνη	Μερική είσοδος σκόνης χωρίς να επηρεάζει άμεσα την λειτουργία της συσκευής
6	Αποκλεισμός σκόνης	Πλήρης προστασία από στερεή εξωτερική επίδραση (στεγανότητα συσκευής)

Διαβάθμιση Προστασίας έναντι εισόδου υγρών.

Πίνακας 3-3 Διαβάθμιση προστασίας έναντι υγρών

Δεύτερο Ψηφίο	Προστασία από	Ορισμός
0	Απροστάτευτο	-
1	Προστασία έναντι κάθετης πτώσης σταγόνων νερού	Δεν υπάρχουν επιπτώσεις από την κάθετη πτώση σταγόνων
2	Προστασία έναντι κάθετης πτώσης νερού, όταν το αντικείμενο έχει κλίση 15°	Δεν υπάρχουν βλαβερές επιπτώσεις κατά την διεξαγωγή της δοκιμασίας
3	Προστατευμένο έναντι ψεκαζόμενου νερού	Νερό που ψεκάζεται υπό γωνία έως 60° δεν έχει βλαβερές επιπτώσεις
4	Προστατευμένο έναντι νερού	Νερό που πετάγεται στο φωτιστικό από κάθε κατεύθυνση δεν έχει βλαβερές συνέπειες
5	Προστατευμένο έναντι εκτοξευμένου νερού	Νερό που εκτοξεύεται στο φωτιστικό από κάθε κατεύθυνση δεν έχει βλαβερές συνέπειες
6	Προστατευμένο έναντι ισχυρά εκτοξευμένου νερού	Νερό που εκτοξεύεται με μεγάλη ισχύ στο φωτιστικό από κάθε κατεύθυνση δεν έχει βλαβερές συνέπειες
7	Προστατευμένο έναντι προσωρινής βύθισης σε νερό	Καμία είσοδος νερού στο φωτιστικό όταν αυτό βυθίζεται προσωρινά σε νερό με συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και χρόνου
8	Προστατευμένο έναντι μόνιμης βύθισης σε νερό	Καμία είσοδος νερού στο φωτιστικό όταν αυτό βυθίζεται μόνιμα σε νερό με συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και χρόνου

Έτσι για παράδειγμα ένα φωτιστικό με δείκτη *IP66* έχει προστασία που προσδιορίζεται από τους παραπάνω πίνακες.

### **3.4 Πιστοποιητικά Ασφαλείας και Επιδόσεων Ε.Ε.**

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει κανόνες ασφαλείας αλλά και επιδόσεων για την χρήση των φωτιστικών δρόμων εντός της επικράτειας της. Υπάρχουν πολλά πρότυπα που πρέπει τα φωτιστικά να συμμορφώνονται.

Συμμόρφωση προς τα πρότυπα ασφαλείας των προϊόντων επιτρέπει τη σήμανση *CE* και με πρόσθετη συμμόρφωση προς τις επιδόσεις σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να εξασφαλίσει την *ENEC* σήμανση ποιότητας.

Παραθέτουμε τα πρότυπα της Ε.Ε. τα οποία πρέπει να ακολουθούνται από τους κατασκευαστές φωτιστικών σωμάτων.

#### **3.4.1 Πρότυπα EN Ε.Ε. που αφορούν τον φωτισμό.**

*Πίνακας 3-4 Πρότυπα ασφαλείας και επίδοσης για τις υπάρχουσες τεχνολογίες λαμπτήρων*

Τεχνολογία Λαμπτήρων	Πρότυπα Ασφάλειας	Πρότυπα Επίδοσης
Γραμμικός Φθορισμού(Linear Fluorescent)	EN61195	EN60081
Συμπαγής Φθορισμού(Compact Fluorescent)	EN61199	EN60901
Υψηλής Εκκένωσης (High Pressure Sodium)	EN62035	EN60682
Αλογονιδίων Μετάλλων (Metal Halide)	EN62035	EN61167
Φωτοεκπέμπουσες Δίοδοι (Light Emission Diodes, LED)	EN62031	Σε προετοιμασία

Πίνακας 3-5 Πρότυπα ασφαλείας και επίδοσης για τα συστήματα ελέγχου

Σύστημα Ελέγχου	Πρότυπα Ασφάλειας	Πρότυπα Επίδοσης
Γραμμικός Φθορισμού (Linear Fluorescent)	EN61347	EN60929/ EN 60921
Συμπαγής Φθορισμού (Compact Fluorescent)	EN61347	EN60929/ EN 60921
Υψηλής Εκκένωσης (High Pressure Sodium)	EN61347	EN60923
Πυκνωτές (Capacitors)	EN60048	EN61049
Φωτοεκπέμπουσες Δίοδοι (Light Emission Diodes, LED)	EN61347	EN 61049
Συσκευή Εκκίνησης (Starting Device)	EN 61347	EN60927
Λαμπτήρα Πυράκτωσης (Filament Lamp)	EN61347	EN61047

Πίνακας 3-6 Πρότυπα ασφαλείας που διέπουν την λειτουργία των φωτιστικών ως σύνολο

Σύστημα Φωτιστικού	Ασφάλεια
Κατασκευή Φωτιστικού (Luminaire Construction)	EN 60598
Εκπομπή EMC ( EMC emission)	EN 55015
Αντοχή EMC ( EMC immunity)	EN 61547
Ηλεκτρικά Κυκλώματα (Electric Track)	EN 60570
Ιστοί Οδοφωτισμού (Road Lighting columns)	EN 40
Αρμονικές (Harmonics)	EN 61000-3-2
Φωτοβιολογική Ασφάλεια (Photobiological Safety)	EN 62471

Να σημειωθεί πως όλα τα πρότυπα IEC, ISO, CEN ,CENELEC είναι αποδεκτά εντός της επικράτειας και δεν αποκλείονται από τα κράτη μέλη.

### **3.4.2 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία που επηρεάζει το φωτισμό**

Η Ε.Ε. έχει θεσπίσει πολλές οδηγίες και κανονισμούς που βρίσκουν εφαρμογή στο φωτισμό. Στις οδηγίες αυτές συμπεριλαμβάνονται κάποιες που είναι υποχρεωτικές στην τήρηση τους από τα κράτη μέλη και κάποιες άλλες οι οποίες είναι ανοικτές σε τροποποιήσεις. Μερικές από τις πιο σημαντικές είναι:

- Απαιτήσεις Οικολογικού Σχεδιασμού των Προϊόντων που καταναλώνουν Ενέργεια ( Eco- Design requirements of Energy related Products, ERP )
- Ενεργειακή Επισήμανση Οικολογικών Προϊόντων ( Energy Labeling of Eco-Design Products)
- Οδηγία Χαμηλής Τάσης (Low Voltage Directive, LDV)
- Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC)
- Εναπόθεση Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού(Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)
- Απαγόρευση Επικίνδυνων Συστατικών(Restriction of hazardous Substances, RoHS)
- Οδηγία Ενεργειακού Σχεδιασμού( Energy Service Directive, ESD)
- Καταγραφή, Αξιολόγηση, Εξουσιοδότηση και Περιορισμός των Χημικών (REACH)



## **4 Ανάλυση τεχνολογίας LED και οπτικών συστημάτων**

### **4.1 Εισαγωγή**

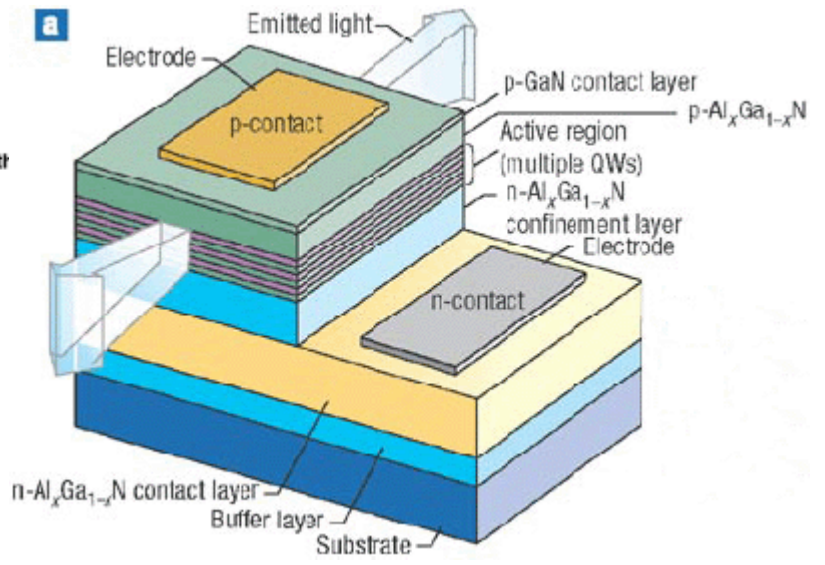
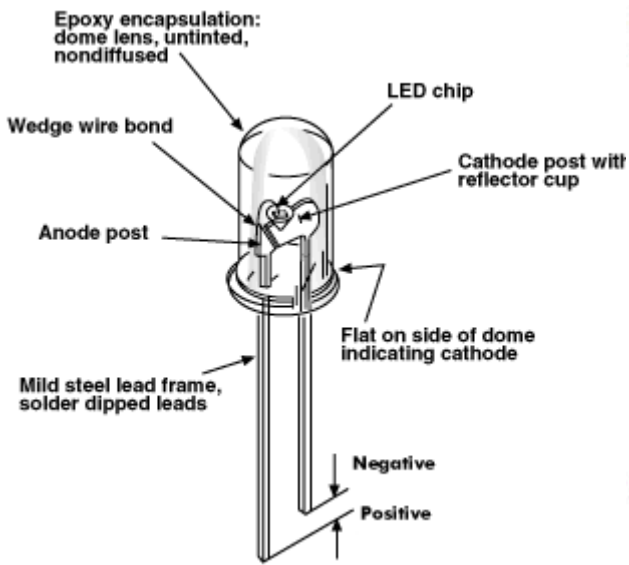
Η τεχνολογία φωτισμού όπως την γνωρίζαμε μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλαπλές και σημαντικές αλλαγές που αύξησαν σημαντικά την απόδοση της, καθιστώντας εφικτή την χρήση της τεχνολογίας με επιτυχία στις υπάρχουσες εφαρμογές φωτισμού. Παρ' όλες αυτές τις αλλαγές όμως, σήμερα υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω βελτιστοποίηση που θα στοχεύει στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και κατά συνέπεια σε εξοικονόμηση πόρων και μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για φωτισμό ανέρχεται σε 19% σε παγκόσμιο επίπεδο και σε 14% στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Καθώς στην Ευρώπη καταργούνται σταδιακά οι λαμπτήρες πυράκτωσης, πρέπει να αντικατασταθούν από νέες, ενεργειακά αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες φωτισμού. Ο φωτισμός στερεάς κατάστασης (Solid State Lighting, SSL) είναι η πιο πρωτοποριακή τεχνολογία που αναδύεται στην αγορά. Βασίζεται σε φως εκπεμπόμενο από ημιαγώγιμα υλικά, τα οποία μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε φως, και περιλαμβάνει τις διόδους φωτισμού LED και OLED.

Η τεχνολογία SSL χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε φωτεινούς σηματοδότες ρύθμισης κυκλοφορίας και σε φανούς αυτοκινήτων. Ήδη χρησιμοποιείται ευρύτερα σε φωτιζόμενες οθόνες και τηλεοράσεις και διεισδύει πλέον στην αγορά φωτισμού εν γένει. Τα προσεχή έτη, η τεχνολογία SSL θα γίνει η πιο ευέλικτη και ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία για γενικό φωτισμό και θα παρέχει φως υψηλής ποιότητας και οπτικής απόδοσης σε συνδυασμό με τις νέες αρχιτεκτονικές και σχεδιαστικές επιλογές για βελτιωμένη άνεση και ευεξία.

### **4.2 Τεχνολογία LED -φωτοεκπέμπουσες διόδους**

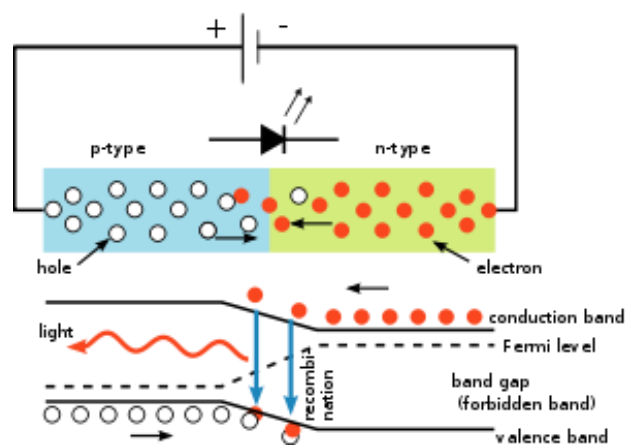
Οι φωτοεκπέμπουσες διόδους (Light emission diode/ LED) είναι συνδυασμός από ημιαγωγούς p-n. Όταν εφαρμοστεί τάση στους δυο ημιαγωγούς εκπέμπεται ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μπορεί να βρίσκεται είτε στο ορατό φάσμα είτε στο υπέρυθρο. Το επιθυμητό χρωματικό αποτέλεσμα προκύπτει από το συνδυασμό των ημιαγώγιμων υλικών.



Εικόνα 4-1 Διαφορετικές απεικονίσεις της κατασκευαστικής δομής ενός LED

Τα ημιαγωγικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των LED είναι υψηλής καθαρότητας με μικρές ποσότητες προσθέτων. Όπως αναφέρθηκε τα δυο κύρια υλικά κατασκευής είναι δυο:

- Ημιαγωγός τύπου n, ο οποίος έχει συγκεντρωμένη περίσσεια ηλεκτρονίων, δηλαδή αρνητικού φορτίου.
- Ημιαγωγός τύπου p, ο οποίος έχει περίσσεια οπών (έλλειμμα ηλεκτρονίων), δηλαδή θετικού φορτίου.

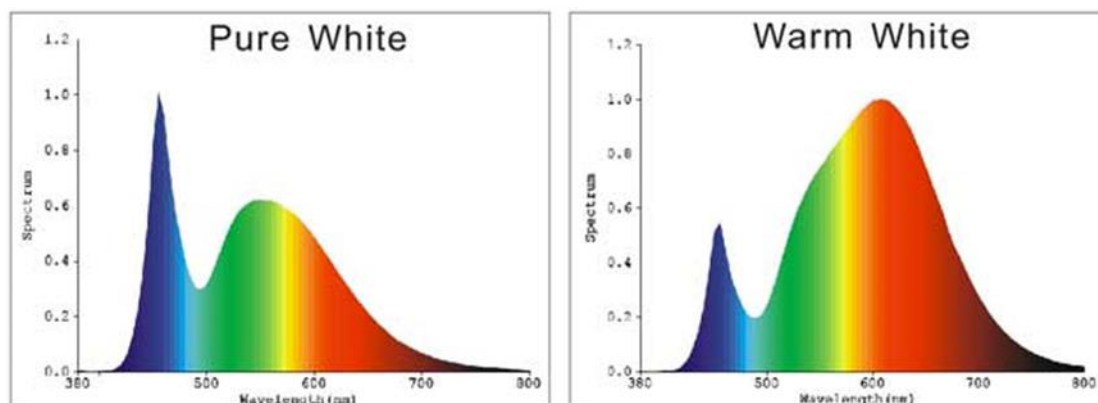


Εικόνα 4-2 Απεικόνιση αρχής λειτουργίας ενός LED.

Τα δυο υλικά αυτά διαχωρίζονται μέσα στο ίδιο κομμάτι του ημιαγωγού και σχηματίζουν ανάμεσα τους μια διεπιφάνεια (junction), η οποία έχει διαστάσεις της



τάξης των  $0,25\text{mm}^2$ . Εφαρμόζοντας τάση στα δυο άκρα έχουμε μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών προς την διεπιφάνεια. Κατά την επαφή των ηλεκτρονίων με τις οπές έχουμε απελευθέρωση ενέργειας, δηλαδή φωτονίων. Η τάση που εφαρμόζουμε είναι συνήθως 1-3V και το ρεύμα που διαρρέει είναι της τάξης των 1-100mA. Κατά την λειτουργία των LED παράγεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας, η οποία πρέπει να διαχυθεί στο περιβάλλον με την κατάλληλη τεχνολογία θερμικής διάχυσης ή κοινώς ψήκτρα.



Εικόνα 4-3 Φασματική διαφορά εκπομπής του ψυχρού λευκού με το ζεστό λευκό

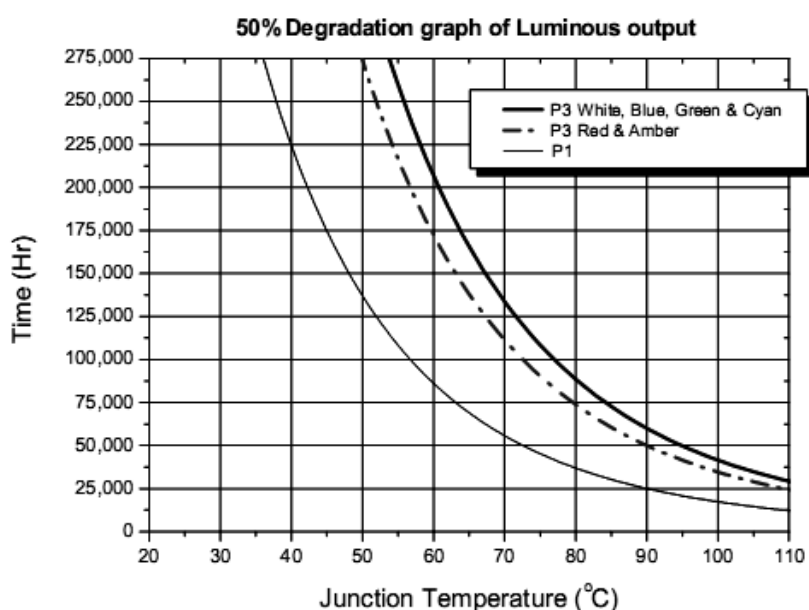
Το τελικό οπτικό αποτέλεσμα των λαμπτήρων LED εξαρτάται από το υλικό των ημιαγωγών, τα χημικά πρόσθετα και το περίβλημα του φωτιστικού σώματος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ημιαγωγοί είναι συνήθως ενώσεις φωσφόρου, αργιλίου, γαλλίου και ινδίου ή ενώσεις αργιλίου, γαλλίου και αρσενίου.

Το φάσμα ακτινοβολίας που παράγεται από την ψηφίδα του LED είναι πολύ μικρού φάσματος, σχεδόν μονοχρωματικό. Η διεύρυνση του φάσματος μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση φωσφόρων, οι οποίοι διεγείρονται από την ακτινοβολία του LED. Έκτος από κόκκινα πράσινα και πορτοκαλί LED, υπάρχουν και τα λευκά τα οποία είναι δυο ειδών:

- Στο πρώτο είδος γίνεται χρήση φωσφόρου, ο οποίος απορροφά το μπλε και το επανεκπέμπει ως λευκό.
- Στο δεύτερο είδος χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός από ψηφίδες οι οποίες εκπέμπουν διαφορετικό χρώμα( κόκκινο, πράσινο, μπλε ). Τα μεμονωμένα χρώματα αναμιγνύονται σε ένα ενιαίο λευκό χρώμα

Το πρώτο είδος είναι προτιμότερο από τους κατασκευαστές λόγω του ότι οι φώσφοροι μπορούν να ακτινοβολήσουν διάφορα είδη λευκού φωτός. Έτσι έχουμε

ποικιλία στις διαθέσιμες θερμοκρασίες χρώματος, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο και πρέπει να επιλέγεται σε άμεση συνάρτηση με την εφαρμογή.

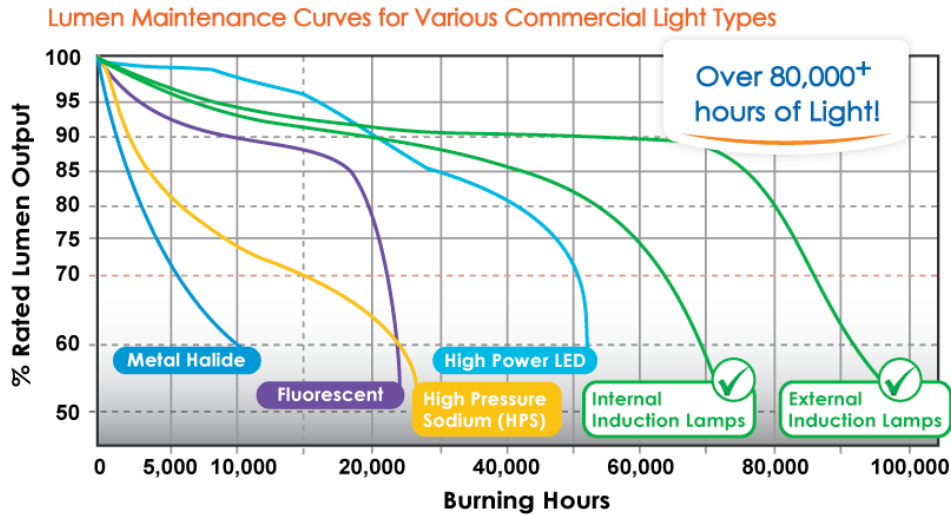


Εικόνα 4-4 Η εξάρτηση του αναμενόμενου χρόνου ζωής με την θερμοκρασία της διεπιφάνειας

Ο ονομαστικός χρόνος ζωής των LED με βάση τα στοιχεία των κατασκευαστών είναι από 50,000 μέχρι και 100,000 ώρες σε κάποιες περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με την θερμοκρασία κάτω από την οποία λειτουργεί το LED. Η διαχείριση της εκλυόμενης θερμότητας είναι θέμα ύψιστης σημασίας και δυσκολίας.

### **4.3 Υπολογισμός της διάρκειας ζωής του LED**

Η διάρκεια ζωής των LED υπολογίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το 50% μιας δοκιμαζόμενης ομάδας φωτιστικών για να χάσει το 30% της ονομαστικής του φωτεινής ροής (L70/B50). Αρχικά πρέπει να παρατηρήσουμε πως οι 50,000 ώρες είναι περίπου 8 χρόνια συνεχούς λειτουργίας. Ο ρυθμός ανανέωσης των LED είναι πολύ μικρός ( περίπου νέα μοντέλα κάθε έξι μήνες), έτσι δεν υπάρχει χρόνος για πραγματική μέτρηση της διάρκειας ζωής. Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η προέκταση στο μέλλον, μέσω στατιστικών μοντέλων, βραχυπρόθεσμων δεδομένων. Οι μετρήσεις που γίνονται στα εργαστήρια περιορίζονται το πολύ στις 5000 ώρες.



Εικόνα 4-5 Διατήρηση επιπέδου φωτεινής ροής διαφόρων τύπων φωτεινών πηγών

#### 4.4 Επίδραση θερμότητας στην λειτουργία των LED

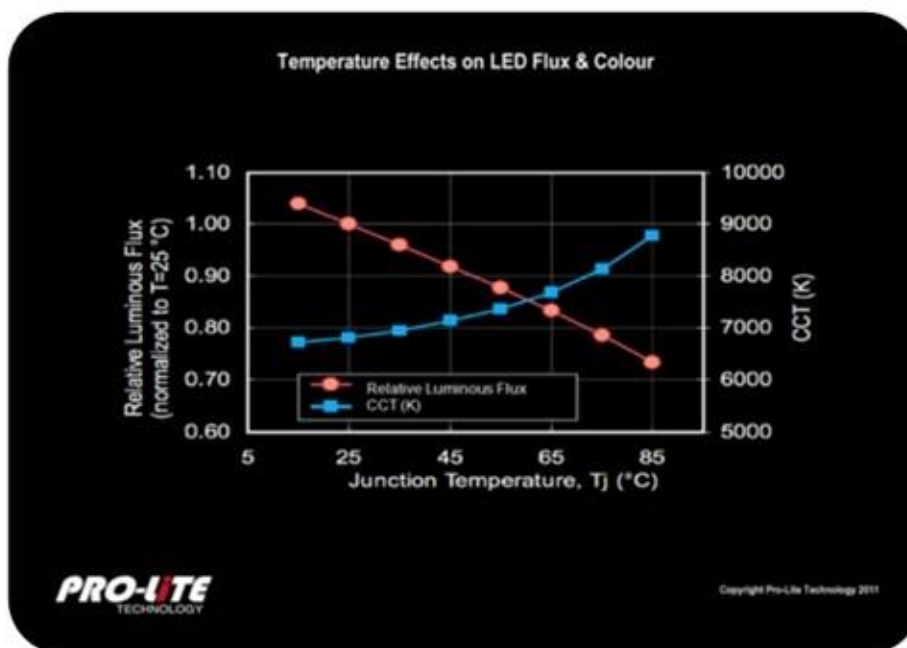
Σε αυτήν την ενότητα θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε την επίδραση που έχει η έκλυση θερμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της θερμοκρασίας στην απόδοση των LED.

##### 4.4.1 Γενικές συνέπειες αύξησης θερμοκρασίας

Το LED ως συσκευή αποτελείται από διάφορα επιμέρους εξαρτήματα. Υπάρχει η ψηφίδα η οποία εκλύει σχεδόν μονοχρωματική μπλε ακτινοβολία, ο φώσφορος ο οποίος απορροφά την μπλε, και επανακτινοβολεί λευκή με κάποιες απώλειες. Υπάρχει ακόμα ο προστατευτικός φακός της ψηφίδας, καθώς και η βάση στην οποία όλα τα παραπάνω τοποθετούνται. Όλα τα επιμέρους αυτά εξαρτήματα, συμβάλλουν με διαφορετικό τρόπο στην γήρανση του LED ως συνόλου λόγω θερμότητας.

Υπάρχουν πολλά υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της ψηφίδας. Οι κατασκευαστές LED σπάνια δίνουν πληροφορίες για την θερμική απόδοση των υλικών αυτών. Τα στοιχεία που παρέχουν αφορούν το LED ως σύνολο και όχι κάθε εξάρτημα ξεχωριστά. Υπάρχει μια απόλυτη θερμοκρασία πέραν της οποίας η ψηφίδα παύει να λειτουργεί. Όταν όμως η ψηφίδα βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη κάποιων ορίων, αλλάζει το φάσμα εκπομπής της πέραν του μονοχρωματικού μπλε. Ακόμη και μια μικρή αλλαγή στο φάσμα ακτινοβολίας της ψηφίδας έχει την δυνατότητα να επηρεάσει την ικανότητα του φωσφόρου να απορροφήσει την ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης του LED.

Οι φώσφοροι είναι τα συστατικά που επηρεάζονται πιο πολύ από την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Χάνουν την απόδοση τους όσον αφορά την απορρόφηση συγκεκριμένων μηκών κύματος ρίχνοντας την ολική απόδοση. Μάλιστα οι φώσφοροι που εκλύουν το κόκκινο χρώμα έχουν ιδιαίτερη ευαισθησία στην αύξηση της θερμοκρασίας, και η επίλυση αυτού του ζητήματος αποτελεί πεδίο επιστημονικής έρευνας.

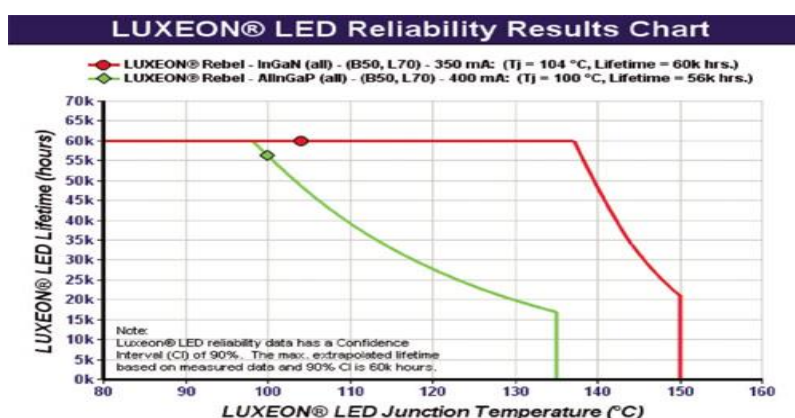


Εικόνα 4-6 Μεταβολή φωτεινής ροής / Θερμοκρασίας χρώματος με θερμοκρασία διεπιφάνειας

Ο προστατευτικός φακός της ψηφίδας του LED πρέπει να είναι ανθεκτικός και συνάμα οπτικά καθαρός. Η τελευταία παράμετρος είναι το πρόβλημα που προκύπτει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η έκθεση του φακού σε υψηλές θερμοκρασίες του προσδίδει ένα κιτρινωπό χρώμα, αλλάζοντας το φάσμα εκπομπής της ψηφίδας και κατά συνέπεια την απόδοση του LED. Επιπλέον, η βάση θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη να αντέχει υψηλές θερμοκρασίες και για μεγάλη διάρκεια. Σε μερικές περιπτώσεις παίρνει κιτρινωπό χρώμα και επηρεάζει με τον δικό του τρόπο την απόδοση του LED. Σε ανακοίνωση της η εταιρεία Cree το 2010 δήλωσε πως, «ο κύριος λόγος ποιοτικής υποβάθμισης και γήρανσης του LED είναι η ίδια του η βάση».

#### 4.4.2 Θερμοκρασία και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Η πιο άμεση επίδραση της θερμοκρασίας όσον αφορά την επίδοση των LED είναι η πτώση τάση πόλωσης τους. Το ποσοστό της πτώσης δεν είναι συγκεκριμένο και διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Τα περισσότερα τεχνικά φυλλάδια αναφέρουν πως η πτώσης της τάσης πόλωσης κυμαίνεται από  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$  έως  $-4\text{mV}/^\circ\text{C}$  χωρίς όμως να φανερώνουν κάποια χαρακτηριστική καμπύλη μεταξύ της θερμοκρασίας και της τάσης πόλωσης.



Εικόνα 4-7 Η αντοχή στην θερμοκρασία της διεπαφής για δυο διαφορετικά LED

Εάν το LED λειτουργεί υπό σταθερό ρεύμα, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, η τάση πόλωσης πέφτει. Κατά συνέπεια η πτώση τάσης προκαλεί πτώση της ηλεκτρικής ισχύος που απορροφά η συσκευή, και αυτή με την σειρά της μείωση της φωτεινής ροής της συσκευής.

Ένας τρόπος για να διατηρήσουμε την φωτεινή ροή ανέπαφη από την πτώση της τάσης πόλωσης, είναι να λειτουργούμε τις φωτοδιόδους υπό σταθερή ισχύ. Με αυτήν την μέθοδο θα πρέπει να αυξάνουμε το ρεύμα, ώστε το γινόμενο  $P = V \cdot I$  να παραμένει σταθερό.

#### 4.4.3 Θερμοκρασία και οπτική συμπεριφορά

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο κομμάτι της οπτικής, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι πολύπλευρη και αφορά όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του LED. Οι πιο άμεσες και σημαντικές επιδράσεις είναι στην φωτεινότητα και στην απόδοση σε lm/W. Ο συνήθης τρόπος να λειτουργούμε τα LED είναι υπό σταθερό ρεύμα. Αυτό έχει συνέπεια ότι με την πτώση της τάσης πόλωσης (υπό σταθερό ρεύμα) έχουμε πτώση της ισχύος του LED και επομένως και της φωτεινής ροής. Στα περισσότερα τεχνικά φυλλάδια παρέχεται η καμπύλη που συσχετίζει την

φωτεινότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι η μείωση της απόδοσης της συσκευής προέρχεται και από την μείωση της ισχύος αλλά και από την πτώση της απόδοσης των οπτικών του μέσων, δηλαδή του προστατευτικού φακού και κυρίως των φωσφόρων.

#### **4.5 Διαχείριση θερμότητας LED**

Η χρήση των LED στα φωτιστικά δρόμου και όχι μόνο, έχει αυξήσει την ανάγκη για παραγωγή φωτιστικών με μεγαλύτερη ισχύ, σε σύγκριση με τις μέχρι τώρα χρήσεις των LED. Τα συστήματα LED που συναντάμε στο εμπόριο αυτήν την στιγμή είναι δυο. Το πρώτο είναι το σύστημα συστοιχίας LED (LED array system) όπου πολλά LED βρίσκονται συνδεδεμένα και το δεύτερο είναι το σύστημα COB (chips on board) όπου πολλά LED είναι πακτωμένα μεταξύ τους και δίνουν την εντύπωση ενός μεγαλύτερου LED.

Σε οποιαδήποτε από τις δυο περιπτώσεις η ανάγκη για έλεγχο της εκλυόμενης θερμότητας είναι επιτακτική.

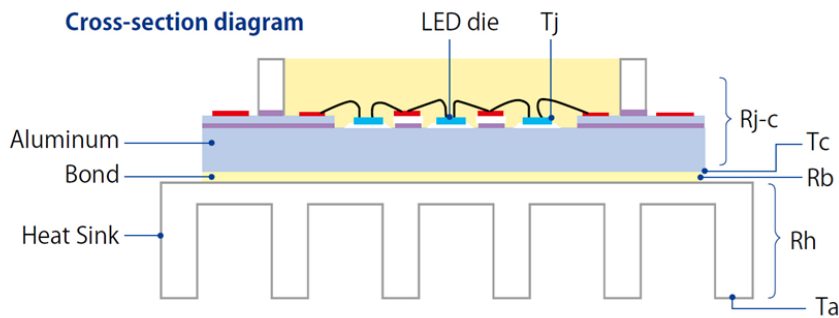
Τα LED ή φωτοεκπέμπουσες δίοδοι παράγουν φως και θερμότητα σε συνάρτηση με την ισχύ που τους παρέχουμε. Η επιφάνεια ενός συστήματος LED είναι πολύ μικρή και είναι σχεδόν αδύνατο η παραγόμενη θερμότητα να διαφύγει χωρίς εξωτερική επίδραση στο περιβάλλον

Έτσι κρίνεται απαραίτητη η χρήση εξωτερικού συστήματος ψύξης(heat sink) για να μπορεί το LED να διατηρείται σε φυσιολογικά επίπεδα θερμοκρασίας. Η απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας από το τσιπ των LED γίνεται μέσω της απαγωγής της θερμότητας.

Χαρακτηριστικό μέγεθος που μας ενδιαφέρει άμεσα η προσαρμογή του και η μελέτη του είναι η θερμοκρασία διεπιφάνειας (junction),  $T_j$  ( °C ). Η θερμοκρασία  $T_j$  πρέπει να ελέγχεται και να μην υπερβαίνει τις τιμές που δίνει ο κατασκευαστής των LED. Η θερμοκρασία στην διεπιφάνεια του LED συνδέεται άμεσα με τον χρόνο ζωής του LED, η υψηλή τιμή της δε μειώνει τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής του συστήματος και ρίχνει την απόδοση των LED. Στόχος όλων των κατασκευαστών φωτιστικών με βάση τα LED είναι η υιοθέτηση ενός αποτελεσματικού συστήματος ψύξης ώστε να μπορούν να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τις τεράστιες δυνατότητες της τεχνολογίας SSL ( solid state technology).

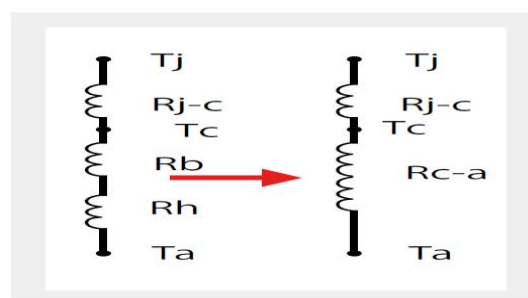
#### 4.5.1 Μελέτη θερμικής αγωγιμότητας COB LED της εταιρίας CITIZEN

Το chip των LED, σε μια εφαρμογή με χρήση της τεχνολογίας των COB LED, είναι τοποθετημένο πάνω σε φύλλα αλουμινίου σε μια προσπάθεια για μείωση της θερμικής αγωγιμότητας  $R_{j-c}$ . Η θερμοκρασία της βάσης αυτής ορίζεται ως  $T_c$  (case temperature) και είναι η θερμοκρασία ακριβώς κάτω από την επαφή των LED με το αλουμίνιο.



Εικόνα 4-8 Τομή ενός COB LED και απεικόνιση των ειδικών θερμικών αντιστάσεων

Παρατηρώντας την τομή ενός τέτοιου συστήματος βλέπουμε τα διάφορα υλικά που επιδρούν στην αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας από την διεπιφάνεια των LED. Η βάση των LED έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό σύστημα ψύξης μέσω θερμαγωγικού υλικού (grease) ειδικής θερμικής αντίστασης  $R_b$ , η οποία έχει σημαντικά μικρότερη τιμή σε σχέση με την ειδική αντίσταση που θα υπήρχε εάν η βάση των τσιπ ήταν τοποθετημένη απευθείας επάνω στην ψήκτρα.



$$T_j = R_{j-c} * Pd + T_c \quad (1)$$

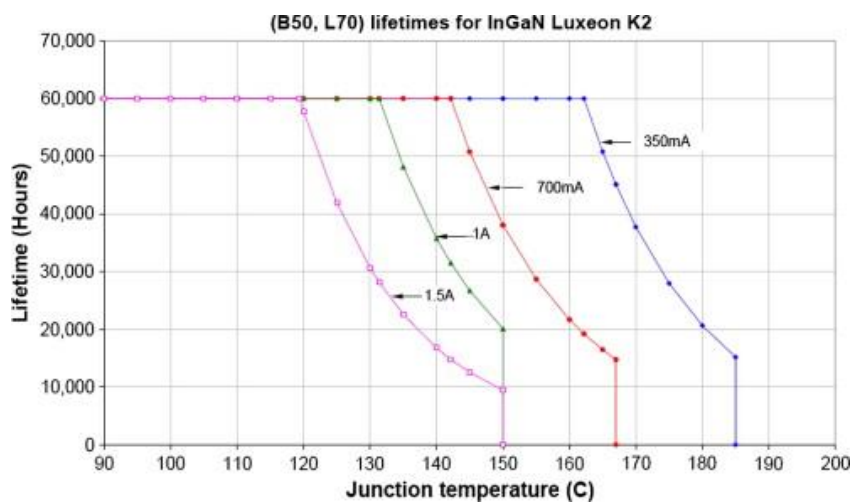
$$T_j = (R_{j-c} + R_c - a) * Pd + T_a \quad (2)$$

όπου,

- $T_j$ , η θερμοκρασία της διεπιφάνειας των LED ( $^{\circ}\text{C}$ )

- $R_{j-c}$ , η ειδική θερμική αντίσταση της βάσης αλουμινίου ( $^{\circ}C/W$ )
- $T_c$ , η θερμοκρασία της βάσης αλουμινίου
- $R_{c-a}$ , η ειδική θερμική αντίσταση του τμήματος ψήκτρα-θερμαγώγιμο υλικό
- $T_a$ , η θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient temperature)
- $P_d$ , η ισχύς που επιβάλλεται

Οι εξισώσεις 1,2 μας δείχνουν την συσχέτιση της θερμοκρασίας των διεπιφανειών των LED με την ισχύ. Παρατηρούμε πως η μεταξύ τους σχέση είναι γραμμική. Οι θερμικές αντιστάσεις του συστήματος ενός φωτιστικού LED είναι σε σειρά κατά συνέπεια όσο αυξάνουμε την ισχύ των LED θα έχουμε να αντιμετωπίσουμε μεγαλύτερα ποσά θερμότητας προς διαχείριση (heat conduction).



Εικόνα 4-9 Η θερμοκρασία διεπιφάνειας σχέση με την ένταση λειτουργίας του LED και την διάρκεια ζωής

## 4.6 Τα οπτικά μέσα LED (φακοί) και ο φωτισμός δρόμων

### 4.6.1 Τα οπτικά συστήματα και οι σύγχρονες απαιτήσεις

Οι σύγχρονες απαιτήσεις στον φωτισμό δρόμων εκφρασμένες μέσω των κανονισμών και οδηγιών, απαιτούν ποικιλία λύσεων και ευελιξία από την πλευρά της βιομηχανίας φωτισμού. Τα LED μέσω του μικρού του μεγέθους δίνουν την δυνατότητα για σχεδίαση φακών με μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα.

Η απόδοση των LED, η οποία κινείται με εκρηκτικούς ρυθμούς, πλέον καθιστά τα LED ικανά να ανταπεξέλθουν στις περισσότερες περιπτώσεις οδικού φωτισμού. Αυτό



που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όμως, δεν είναι μόνο κατά πόσο ένα φωτιστικό διαθέτει ικανοποιητική φωτεινή ροή, αλλά και πως η ροή αυτή κατανέμεται στο οδόστρωμα. Η σχεδίαση φακών οδοφωτισμού αποτελεί ερευνητική πρόκληση και η βελτιστοποίηση της σχεδίασης των φακών θα καθορίσει την κυριαρχία της τεχνολογίας SSL στον οδοφωτισμό και όχι μόνο.

Τα πιο πολλά φωτιστικά LED στην αγορά χρησιμοποιούν φακούς χαμηλής ποιότητας και ελλιπούς σχεδίασης με αποτέλεσμα ενώ η φωτεινή ροή του LED να είναι αρκετή, το φωτιστικό να μην φωτίζει το οδόστρωμα με την κατάλληλη ομοιομορφία. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι διότι η δέσμη φωτός που παράγει ο φακός είναι συγκεντρωμένη. Έτσι φωτίζει υπερβολικά την περιοχή κάτω από αυτό ενώ την ζώνη που βρίσκεται γύρω από αυτό πολύ λιγότερο.

Οι φακοί που προορίζονται για τον οδοφωτισμό θα πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από υλικά υψηλής ποιότητας, διότι πρέπει να ανταπεξέλθουν σε ακραίες καιρικές συνθήκες, σκόνη, υγρασία, ακτινοβολίες (UV , HR) παράγοντες που τους αλλοιώνουν και μειώνουν το χρόνο ζωής και την απόδοση τους.

Η εξέλιξη στην σχεδίαση των φακών είναι συνεχής. Η επίδραση του φακού στην λειτουργία του φωτιστικού είναι καθοριστική, καθώς το οπτικό μέσο είναι αυτό που καθορίζει το τελικό αποτέλεσμα, ανεξάρτητα από το πόσο καλά σχεδιασμένο είναι το φωτιστικό.

#### **4.6.2 Παράμετροι αξιολόγησης και αξιοπιστίας φακών LED**

Με τον όρο οπτικό σύστημα εκφράζουμε τον συνδυασμό του οπτικού μέσου (φακών) και της φωτεινής πηγής, LED. Υπάρχουν πολλοί παράμετροι που φανερώνουν εάν ένα οπτικό σύστημα είναι σωστά σχεδιασμένο και αποτελεσματικό για την χρήση που το χρειαζόμαστε. Οι κυριότεροι παράμετροι επιλογής φακού για το οπτικό σύστημα είναι :

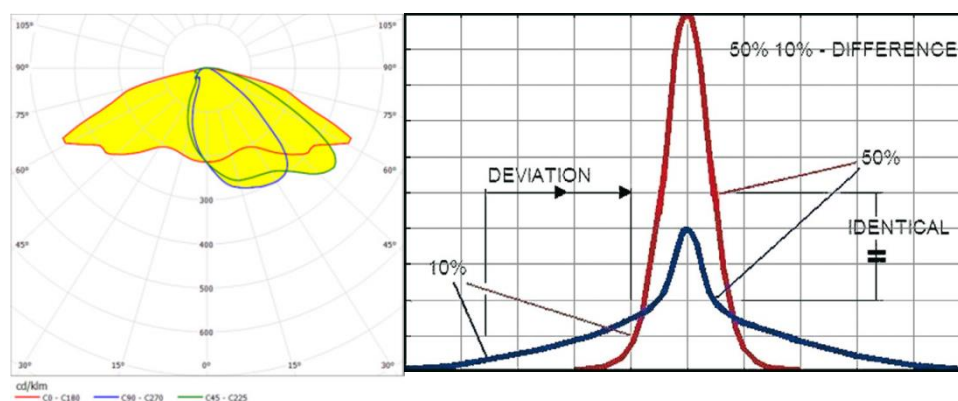
- Η απόδοση τους (lens efficiency).
- Η γωνία ημίσειος εύρους (Full Width Half Maximum, FWHM angle)
- Τα υλικά κατασκευής.
- Ο χρόνος λειτουργικής ζωής.
- Επίπεδο θάμβωσης

### Απόδοση (Efficiency)

Η απόδοση ενός φακού καθορίζεται ως το ποσοστό της φωτεινής ροής που εξέρχεται απ' αυτό σε σχέση με αυτό που εισέρχεται από το LED. Η μέτρηση της απόδοσης του φακού μπορεί να γίνει με την σφαίρα Hulbert. Η απόδοση ενός φακού είναι ένα πολύ γενικό κριτήριο ποιότητας και είναι το πρώτο στάδιο αξιολόγησης. Δεν μπορεί να δώσει στο μελετητή περαιτέρω πληροφορίες για την καταλληλότητα του φακού σε συγκεκριμένες συνθήκες για παράδειγμα δρόμου. Αυτό απαιτεί και άλλες παραμέτρους

### Πολικό Διάγραμμα ( Intensity Distribution Diagram)

Το πολικό διάγραμμα μας δίνει πληροφορίες για το πώς ο φακός κατανέμει την φωτεινή ροη στα επίπεδα C του χώρου. Η μορφή των καμπυλών της Εικόνα 4-10



Εικόνα 4-10 Πολικό διάγραμμα ενός φωτιστικού και διάγραμμα κατανομής έντασης

μας δίνει την ικανότητα να καταλάβουμε ποιοτικά τι είδους δρόμους μπορεί ένα φωτιστικό να καλύψει, το πλάτος τους, την απόσταση των ιστών κ.α. Μας δίνει ένα σαφές δείγμα, ώστε με την προσομοίωση να ξέρουμε τι να περιμένουμε. Στο διάγραμμα μπορούμε να εντοπίσουμε τις γωνίες  $\gamma_{50\%}$  (FWHM) και  $\gamma_{10\%}$ , δηλαδή τις γωνίες στις οποίες η φωτεινή ένταση πέφτει στο μισό της μέγιστης και στο 10% αντίστοιχα). Η μελέτη των δύο γωνιών μας φανερώνει πόσο συγκεντρωμένη είναι η δέσμη του φωτός. Όσο πιο συγκεντρωμένη είναι η κατανομή τόσο πιο κοντά είναι οι δύο γωνίες.

### Υλικό Κατασκευής- Χρόνος λειτουργικής ζωής

Το υλικό κατασκευής των φακών πρέπει να είναι από υψηλής ποιότητας πλαστικά, ή υψηλής καθαρότητας γυαλί (borosilicate glass). Στις πιο συνήθεις LED εφαρμογές δρόμου οι φακοί των φωτιστικών είναι κατασκευασμένοι από πλαστικά PMMA ή PC.

Η χρήση αυτών των υλικών κατασκευής προσφέρει στον φακό μεγάλη διάρκεια ζωής που κυμαίνεται από 10 έως 20 χρόνια. Η UV ακτινοβολία, η ηλιοφάνεια, η υγρασία, οι σκόνες και γενικές ακαθαρσίες σε συνδυασμό με την φυσική καταπόνηση είναι παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στον εκτιμώμενο χρόνο ζωής.

Αξίζει να τονιστεί πως, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι φακοί φτιάχνονται εξατομικευμένα για κάθε διαφορετικό τύπο LED. Η χρήση ενός γενικού φακού δεν θα έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα στην κατανομή της φωτεινής έντασης.

#### Επίπεδο Θάμβωσης

Όπως έχει αναφερθεί η θάμβωση στις εφαρμογές φωτισμού δρόμου οφείλεται στην ύπαρξη φωτός στις γωνίες από 75 μέχρι 90 μοίρες. Στο φωτισμό δρόμων επιδιώκουμε μεγάλη φωτεινή ένταση σε μεγάλες γωνίες ( σχήμα πεταλούδας, batwing) σχήμα έτσι ώστε να πληρούμε τις απαιτήσεις οδοφωτισμού. Οι επιδιωκόμενες γωνίες αυτές είναι πολύ κοντά στα όρια της θάμβωσης και είναι πολύ δύσκολη η πλήρης αποκοπή πριν τις 75 μοίρες. Οι καλοί κατασκευαστές φακών τονίζουν πως με σωστή σχεδίαση το φως που καταλήγει πάνω από 75 μοίρες είναι αμελητέο. Η σχεδίαση φακού με μεγάλη γωνία διάδοσης χωρίς αύξηση της θάμβωσης είναι τεχνολογική πρόκληση και συνεχώς εξελίσσεται.

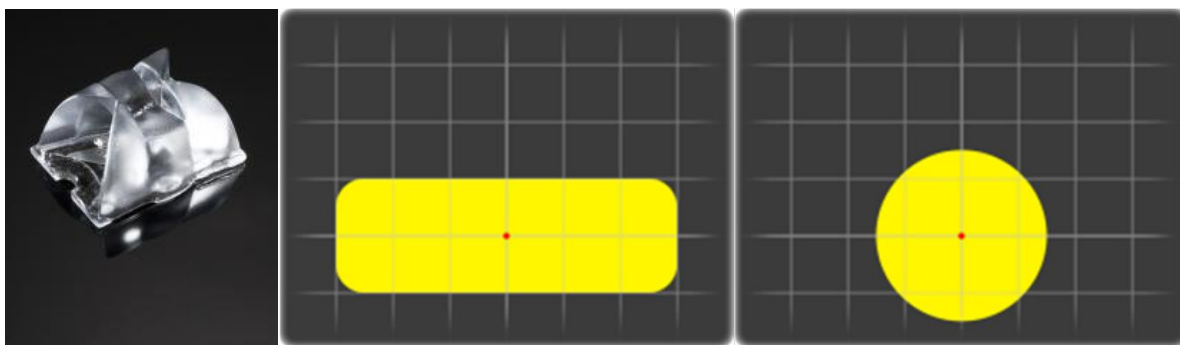
#### **4.6.3 Τα είδη των φακών στον οδοφωτισμό.**

Οι φακοί LED που απευθύνονται για φωτισμό δρόμων και αυτοκινητόδρομων σχεδιάζονται ξεχωριστά για κάθε τύπο LED. Οι μεγάλες εταιρίες κατασκευής φακών έχουν στον κατάλογο τους ειδικά σχεδιασμένους φακούς για τα LED κάθε εταιρίας. Η εξατομίκευση αυτή βοηθά στην εκμετάλλευση όλου του φάσματος των δυνατοτήτων των LED, παρόλο που είναι χρονοβόρα και δαπανηρή.

Η θάμβωση είναι ένας ακόμα λόγος που κάθε φακός είναι ξεχωριστός. Τα LED λόγω του μικρού τους μεγέθους θαμβώνουν και ο φακός έρχεται για να δώσει λύση στο πρόβλημα.

Στην αγορά υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες φακών LED για φωτισμό δρόμων, αυτοί με συμμετρική κατανομή και αυτοί με ασύμμετρη. Η επιλογή του φακού έγκειται στις προδιαγραφές του της εφαρμογής. Αναλυτικά:

- **Συμμετρικοί** : είναι οι πρώτοι φακοί που κατασκευάστηκαν για LED και



Εικόνα 4-11 Διάδοση φωτός με συμμετρικό φακό LED

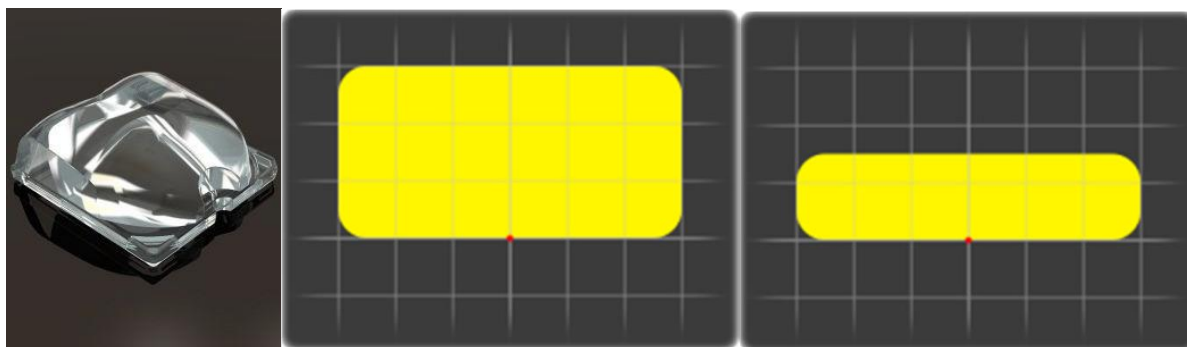
στοχεύουν κυρίως σε αντικατάσταση των φωτιστικών HID στις υπάρχουσες υποδομές. Απαιτούν μεγάλο βραχίονα και αρκετή κλίση , ώστε να μπορέσουν να φωτίσουν με επιτυχία το οδόστρωμα. Υπάρχουν διάφορα είδη κατανομών φωτός και καλύπτουν το φάσμα των απαιτήσεων.

Όπως παρατηρούμε από τις εικόνες το φωτιστικό (κόκκινη κουκίδα) φωτίζει συμμετρικά την περιοχή γύρω απ' αυτό. Με αυτήν την σχεδίαση φακών δεν επιτυγχάνουμε τα καλύτερα αποτελέσματα, διότι το φως διαμοιράζεται σε όλα τα επίπεδα C (C-planes). Με την κλίση που είμαστε αναγκασμένοι να δώσουμε στο φωτιστικό για να φωτίζει πιο πολύ το δρόμο και όχι το πεζοδρόμιο δημιουργούμε άλλες αρνητικές συνέπειες όπως η αύξηση του δείκτη θάμβωσης κ.α.

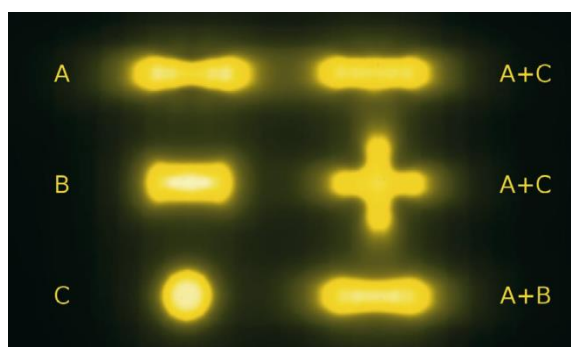
Ακόμη οι φακοί αυτοί χρειάζονται περισσότερη φωτεινή ροή δηλαδή περισσότερη ισχύ για να φωτίσουν ένα δρόμο σωστά σε σχέση με τους ασύμμετρους φακούς που αναλύουμε παρακάτω.

- **Ασύμμετροι** : είναι η βελτιστοποίηση των συμμετρικών φακών για σύγχρονες εφαρμογές φωτισμού δρόμων. Το χαρακτηριστικό των φακών αυτών είναι ότι είναι συμμετρικοί στο επίπεδο C0-C180 (παράλληλα με το δρόμο δηλαδή ) και ασύμμετροι στο επίπεδο C90-C270 ( κάθετα στον διαμήκη άξονα του δρόμου). Τοποθετούνται σε μικρού μήκους βραχίονα στήριξης με μηδενική κλίση. Η ασύμμετρη σχεδίαση βοηθά στο να φωτίζεται μόνο το οδόστρωμα, δηλαδή η περιοχή μπροστά από τον νοητό άξονα C0-C180 του φωτιστικού, ενώ στα επίπεδα C180-C360 δεν διοχετεύεται φωτεινή ένταση( περιοχή πεζοδρομίων-κατοικιών). Αποτέλεσμα της σχεδίασης επιπλέον είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η μείωση της θάμβωσης και της Φωτορύπανσης.

Οι φακοί τοποθετούνται πάνω στα LED με διάφορους τρόπους. Η χρήση ειδικής ταινίας πολυουρεθάνης είναι ένας από αυτούς θεωρείται όμως πρόχειρη λύση και πραγματοποιείται από κατασκευαστές φωτιστικών χαμηλής αξιοπιστίας. Ο πιο ασφαλής τρόπος προσαρμογής του φακού είναι με χρήση βιδών.



Εικόνα 4-12 Διάδοση φωτός με ασύμμετρο φακό LED



Εικόνα 4-13 Σχεδίαση υβριδικών φακών/ Ανάμειξη σχεδίων

Η οπτική τεχνολογία μας δίνει την δυνατότητα μίξης φακών για να μπορέσουν να επιτευχθούν ειδικές απαιτήσεις φωτισμού δρόμων πλατειών πεζόδρομων κ.α. Πρακτικά δεν υπάρχει κάποια απαίτηση που να μην μπορεί να καλυφθεί είτε από την υπάρχουσα σχεδίαση είτε από μελλοντικές. Όπως φαίνεται στην εικόνα έχουμε την δυνατότητα να ενώσουμε τις κατανομές από δυο ή περισσότερους φακούς για να παράγουμε οποιοδήποτε αποτέλεσμα.

#### **4.7 Σχεδίαση οπτικών συστημάτων με την μέθοδο της ιχνηλάτησης**

Οι μηχανικοί οπτικής σχεδίασης(optical engineers), εφαρμόζουν την επιστήμη της οπτικής για να σχεδιάσουν συστήματα ελέγχου του φωτός αλλά και άλλων μορφών ακτινοβολίας( υπέρυθρη, υπεριώδεις). Η μοντελοποίηση μέσω υπολογιστή είναι ένα

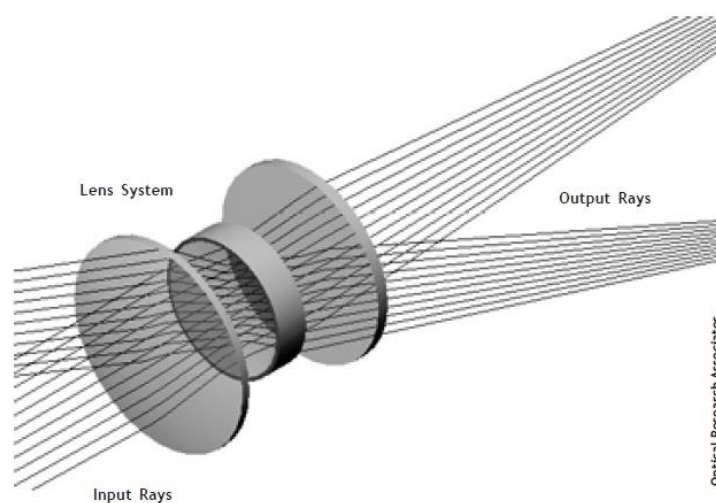
πολύ χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών οπτικής σχεδίασης. Παρόλο που δεν υπάρχει κάποιος έτοιμος αλγόριθμος για την κατασκευή ενός οπτικού συστήματος, η χρήση της μοντελοποίησης μέσω υπολογιστή σε συνδυασμό με την πείρα του μηχανικού επιταχύνει κατά πολύ τις διαδικασίες.

Εάν θεωρήσουμε το φως ως ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ταξιδεύει στο χώρο, τότε μπορούμε να ορίσουμε την έννοια της φωτεινής ακτίνας ως μια γραμμή στην κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος. Η ακτίνα φωτός, ή απλά ακτίνα (ray), υπακούει τους νόμους της γεωμετρικής οπτικής και μπορεί να μεταδοθεί, να ανακλαστεί και να διαθλαστεί μέσα σε ένα οπτικό σύστημα μέσω μιας απλής μεθόδου που θα καθορίζει τα μονοπάτια του φωτός.

Η ιχνηλάτηση για την σχεδίαση φακών είναι μια μέθοδος υπολογισμού για το πώς η ακτίνα οδεύει μέσα στο οπτικό σύστημα, και μπορεί να διαχωριστεί σε δυο μεγάλες κατηγορίες, στην συνεχή και στην ασυνεχή.

#### **4.7.1 Συνεχής ιχνηλάτηση (Sequential ray tracing)**

Ένα οπτικό σύστημα καλείται συνεχές, όταν η πορεία της ηλεκτρομαγνητικής ακτίνας είναι προδιαγεγραμμένη και γνωστή. Η ιχνηλάτηση σε συνεχή συστήματα είναι μια διαδικασία σχετικά απλή, λόγω του γεγονότος ότι κάθε πιθανή διασταύρωση υλικών είναι γνωστή και έτσι ο υπολογισμός της πορείας της ακτίνας είναι σχεδόν συστηματικός.

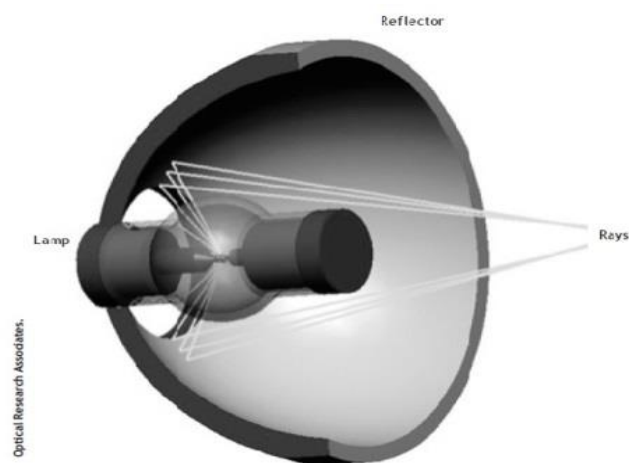


*Εικόνα 4-14 Συνεχές οπτικό σύστημα*

Σε αυτού του τύπου σχεδίασης οπτικό σύστημα, κάθε πιθανή απόκλιση της ακτίνας καλείται εκτροπή. Η δουλειά ενός μηχανικού οπτικής σχεδίασης είναι να ελαχιστοποιεί τις εκτροπές σε ένα σύστημα.

#### **4.7.2 Ασυνεχής Ιχνηλάτηση (Non sequential ray tracing)**

Σε ένα ασυνεχές οπτικό σύστημα δεν μας ενδιαφέρει ο σχηματισμός εικόνας όπως σε ένα συνεχές σύστημα. Τέτοιου είδους συστήματα είναι οι οπτικές ίνες, οι φακοί των φωτιστικών κ.α. Σε ένα ασυνεχές σύστημα δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τις επιφάνειες που θα συναντήσει στην πορεία της η ηλεκτρομαγνητική ακτίνα, έτσι κατά συνέπεια δεν μπορούμε να γνωρίζουμε με ακρίβεια και την πορεία της ακτίνας.



*Εικόνα 4-15 Μη συνεχές οπτικό σύστημα*

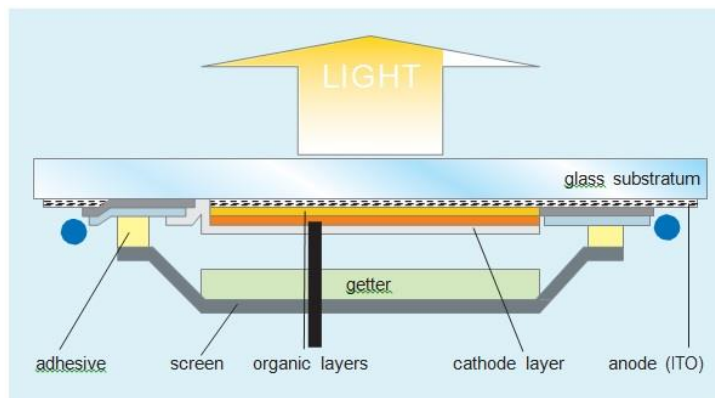
Σε ένα τέτοιο σύστημα οι ακτίνες δεχόμαστε ότι κινούνται με βάση την προσομοίωση του γενετικού αλγορίθμου Monte Carlo. Για την απόδοση ενός τέτοιου συστήματος χρησιμοποιούμε στατιστική ανάλυση και προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα σήματος προς θόρυβο.

#### **5.7 Πλεονεκτήματα SSL για χρήση στον οδοφωτισμό**

Οι τεχνολογίες SSL χρησιμοποιούν τις φωτοεκπέμπουσες διόδους (LEDS) και OLED, τα φωτιστικά σώματα και τις διατάξεις ρύθμισης.

### Διατάξεις OLED

Οι διατάξεις OLED βασίζονται σε οργανικές πηγές φωτός (πολυμερή) οι οποίες παράγουν φως ομοιόμορφα από δισδιάστατη επιφάνεια και είναι δυνατόν να διαμορφωθούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα και μέγεθος.



Εικόνα 4-16 Διάταξη OLED

Η τεχνολογία των LED είναι πλέον ώριμη και έχει αποκτήσει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες στο φωτισμό δρόμων.

### Μικρό μέγεθος

Το φως που εκπέμπει μια ψηφίδα LED είναι το ίδιο με αυτό μιας λάμπας πυράκτωσης ή συμπαγή φθορισμού. Όμως το μέγεθος του μας δίνει την δυνατότητα να τοποθετήσουμε πολλά LED μαζί δημιουργώντας συστοιχίες (LED array) ή (LED chips) με το οπτικό αποτέλεσμα να είναι πολλαπλάσιο.

### Αξιοπιστία και αντοχή έναντι στους κραδασμούς

Η τεχνολογία SSL δεν περιέχει ευαίσθητα υλικά στην θραύση, όπως γυαλί ή νήματα. Τα LED είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς υλικά τα οποία έχουν αντοχή στους κραδασμούς, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές οδοφωτισμού.

### Φάσμα Ακτινοβολίας

Τα LED δεν παράγουν ακτινοβολία πέραν από τα όρια του ορατού φάσματος. Αυτό σημαίνει πως καμία επιβλαβής υπέρυθη ή υπεριώδης ακτινοβολία δεν εκπέμπεται.

### Κατευθυνόμενο Φως (directional light)

Τα παραδοσιακά φωτιστικά εκπέμπουν φως προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα LED με την χρήση φακών μπορούν και αξιοποιούν το φως, καθώς μπορούν και ορίζουν την



δέσμη που θα έχει. Αυτό είναι ιδανικό για τον οδοφωτισμό καθώς με τα LED μπορούμε να προσαρμοστούμε πιο εύκολα στις εκάστοτε απαιτήσεις.

#### Εξοικονόμηση ενέργειας

Τα LED καταναλώνουν σημαντικά λιγότερη ενέργεια από τους συμβατικούς λαμπτήρες έχοντας την ίδια φωτεινή ροή.

#### Μεγάλη Διάρκεια Ζωής

Τα LED έχουν 2 και 3 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τους λαμπτήρες συμβατικού φωτισμού HID. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενες ενότητες οι εκτιμήσεις διαφέρουν και υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την διάρκεια ζωής των φωτοδιόδων. Υπολογίζεται πως η ωφέλιμη διάρκεια ζωής των LED σε χρήση φωτισμού δρόμων είναι 10 χρόνια, με βάση τον L70 υπολογισμό. Τα κόστη συντήρησης γι' αυτό το λόγο είναι αισθητά μειωμένα.

#### Μεγάλο Φάσμα Επιλογών Θερμοκρασίας Χρώματος (CCT)

Οι περισσότερες εταιρείες φωτιστικών LED παρέχουν μεγάλη ποικιλία όσον αφορά την θερμοκρασία χρώματος. Τα LED της αγοράς κυμαίνονται από 3000K έως 6500K. Ακόμη υπάρχει και η δυνατότητα σε φωτιστικά με LED συστοιχίες να προσφέρουν εναλλαγή θερμοκρασίας χρώματος κατ' επιλογή. Έτσι μπορούν να προσφέρουν και ένα ζεστό περιβάλλον (2700K- 3000K) μέχρι και ψυχρό (5000K +)

#### Πολλές Επιλογές Ελέγχου

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά συστήματα ελέγχου, τα οποία θα ρυθμίζουν την θερμοκρασία χρώματος του LED, την απόχρωση και την ένταση φωτισμού. Με την χρήση αισθητήρων μπορούμε ανά πάσα στιγμή να διαπιστώσουμε την πτώση της απόδοσης (lumen depreciation).

#### Δεν Περιέχουν Τοξικά Μέταλλα ή Χημικά

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των συμβατικών λαμπτήρων οδοφωτισμού, συμπεριλαμβανομένων και των πιο ενεργειακά αποδοτικών, είναι το γεγονός ότι περιέχουν υδράργυρο, μόλυβδο και άλλα τοξικά χημικά. Υπολογίζεται πως υπάρχουν 500 εκατομμύρια λαμπτήρες σε φωτιστικά δρόμου σε όλο τον κόσμο, τα οποία καταλήγουν ανά 3 με 5 χρόνια στις χωματερές δημιουργώντας μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Τα LED είναι πλήρως ανακυκλώσιμα και δεν αποτελούν επικίνδυνο απόβλητο.

### Άμεση Απόκριση

Τα LED επιτυγχάνουν το 100% της φωτεινότητας τους σχεδόν στιγμιαία από την στιγμή που θα τροφοδοτηθούν με ηλεκτρική ισχύ. Επίσης δεν επηρεάζονται από το περιοδικό ON/OFF όπως οι λαμπτήρες HID. Έτσι σε συνδυασμό με ένα σύστημα κεντρικής διαχείρισης ενέργειας (EMC ) και αισθητήρες παρουσίας ή κίνησης να επιτύχουμε ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

### Αντοχή σε Ψυχρές Θερμοκρασίες

Σε χαμηλές θερμοκρασίες τα LED έχουν καλύτερες επιδόσεις και πιο μεγάλο προσδόκιμο L70 (life time 70%) ζωής.

## **4.8 Ανησυχίες για την χρήση SSL ως τεχνολογία φωτισμού δρόμων.**

Κατά τη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας, το κόστος, η απόδοση των χρωμάτων, η φωτεινότητα, η αποτελεσματικότητα, η αξιοπιστία, η διάρκεια ζωής και η δυνατότητα κατασκευής της τεχνολογίας SSL έχουν σημαντικά βελτιωθεί. Για παράδειγμα, το κόστος των κυκλωμάτων LED έχει μειωθεί σε ποσοστό 25% ανά έτος (\$/Klm) από το 2005. Το DOE υπολογίζει ότι τα LED θα φτάσουν τη μέγιστη απόδοσή τους, ορισμένη ως το επιθυμητό επίπεδο φωτεινότητας και ποιότητας φωτός στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο εισροής ενέργειας, περίπου 250 lm/W, περίπου το 2020, δηλαδή μέχρι και 15 φορές αυτό του φωτισμού πυρακτώσεως.

Παρά τις βελτιώσεις αυτές, η τεχνολογία LED έτσι όπως εφαρμόζεται στα φωτιστικά δρόμων συνεχίζει να αντιμετωπίζει μερικά από τα προβλήματα που προκύπτουν με τον παραδοσιακό φωτισμό των δρόμων όπως επίσης και μερικά επιπλέον θέματα:

### Συγκριτικά υψηλό κόστος αγοράς

Το τωρινό κόστος αγοράς των προϊόντων φωτισμού LED είναι υψηλότερο από αυτό των καθιερωμένων επιλογών και ποικίλλει ευρέως ανάλογα με την ποιότητα. Ωστόσο, το DOE αναφέρει ότι το κόστος ανά lumen των LED πέφτει με συντελεστή 10 ενώ η ποσότητα που παράγεται αυξάνεται με συντελεστή 20. Από το 2009 έως το 2010, οι τιμές για λευκά LED μειώθηκαν στο μισό, από περίπου 36\$ σε 18\$ ανά 1000 lumens. Οι τιμές αναμένεται να πέσουν σε 2\$/klm το 2015. Όταν οι λειτουργικές δαπάνες, όπως ο ηλεκτρισμός, η συντήρηση και η αντικατάσταση των λαμπών υπολογίζονται, η συνολική αξία των LEDs μεγαλώνει.

### Πρόσφατη τεχνολογία

Τα LEDs χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φωτισμού εξωτερικών χώρων εδώ και λιγότερο από 10 χρόνια. Έτσι, έχουν μικρή ιστορία για να συγκριθούν οι επιδόσεις τους.

### Θερμική διαχείριση

Η υπερβολική θερμότητα επηρεάζει τόσο την βραχυπρόθεσμη όσο και τη μακροπρόθεσμη απόδοση των LED. Κίτρινα (amber) και κόκκινα LED είναι τα πιο ευαίσθητα χρώματα ενώ τα μπλε λιγότερο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα βραχυπρόθεσμα (αλλά αναστρέψιμα) αποτελέσματα της υπερθέρμανσης να περιλαμβάνουν αλλαγή του χρώματος καθώς και μειωμένη εκπομπή φωτός. Τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα είναι η επιταχυνόμενη υποτίμηση των lumen (accelerated lumen depreciation) και μικρότερη ωφέλιμη ζωή.

Τα φωτιστικά LED περιλαμβάνουν ψήκτρες, οι οποίες συχνά είναι ενσωματωμένες στο σχεδιασμό του εξαρτήματος. Τα προϊόντα LED υψηλότερης ποιότητας θα έχουν ένα καλύτερο εξάρτημα/ σύστημα διάχυσης της θερμότητας. Η θερμική διαχείριση των high- power LED είναι προτεραιότητα για την έρευνα και την ανάπτυξη του solid- state lighting (SSL).

### Θάμβωση

Η θάμβωση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα σχετικά με το φωτισμό δρόμων. Στα υπάρχοντα σχέδια αντικατάστασης των φωτιστικών HPS με LED, η έμφαση δίνεται ολοκληρωτικά στην εξοικονόμηση ενέργειας υποβαθμίζοντας τα θέματα που σχετίζονται με την οπτική ποιότητα. Η θάμβωση που προκαλείται από τα LED δεν συμπεριλαμβάνονται ως ένα μετρήσιμο κριτήριο στις διαδικασίες αξιολόγησης και όταν αυτό γίνεται, τα εργαλεία μέτρησης είναι ανεπαρκή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η θάμβωση να παραμένει σημαντικό πρόβλημα.

### Μέτρηση

Είναι πάρα πολύ δύσκολο να χρησιμοποιείς κοινά εργαλεία μέτρησης φωτός για να μετρήσεις το φωτισμό των LED με ακρίβεια, ειδικά δε τη φωτεινότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ποιότητα της απόδοσης των LED συχνά να υπερεκτιμάται.

### Εκτίμηση

Τα φώτα δρόμων LED συχνά φαίνονται καλύτερα στο κοινό όταν συγκρίνονται με φωτισμό δρόμων HPS HID και γι' αυτό οι περισσότερες πωλήσεις φωτιστικών δρόμου LED, χρησιμοποιούν τον πορτοκαλί hue'd HPS HID φωτισμό για σύγκριση, έτσι ώστε να δημιουργήσουν μια αρνητική εικόνα κατά του HID φωτισμού. Εάν η σύγκριση γινόταν μεταξύ MH HID (Metal Halide), τα HID θα νικούσαν συχνά τη σύγκριση, επειδή η χρωματική τους ακρίβεια είναι παρόμοια με αυτή των LED και πολλά HID φωτιστικά δεν είναι τόσο φωτεινά όσο τα φωτιστικά LED, με αποτέλεσμα να παράγουν λιγότερη θάμβωση. Υπάρχουν επίσης προβλήματα που αποτυπώνονται σε έρευνες της κοινής γνώμης στο δρόμο σχετικά με το φωτισμό. Το κοινό είναι ενημερωμένο ότι τα LED εξοικονομούν ενέργεια, ότι είναι καλύτερα σε ποιότητα (συχνά λάθος) και ότι είναι πιο ακριβή στην απόδοση των χρωμάτων (συχνά λάθος).

### Ενεργοβόρος διαδικασία παραγωγής

Σε αντίθεση με τους λαμπτήρες HPS, MH και επαγωγής, τα LED έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, δεν περιέχουν υδράργυρο, μόλυβδο ή κάποια άλλη τοξική χημική ουσία και είναι πλήρως ανακυκλώσιμα. Αυτό μεταφράζεται σε λιγότερα επικίνδυνα απόβλητα στο τέλος του κύκλου ζωής του προϊόντος. Ωστόσο, η διαδικασία παραγωγής LED απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας και περιλαμβάνει επικίνδυνες χημικές ουσίες στην κατασκευή των ημιαγωγών. Επιπλέον, η πλειονότητα των LED κατασκευάζονται σε χώρες με σημαντικά χαμηλότερες προδιαγραφές όσον αφορά τα εργασιακά δικαιώματα και τις περιβαλλοντικές προδιαγραφές.

Παρά την ύπαρξη αυτού του προβλήματος στην παραγωγή, μια ανάλυση του κύκλου ζωής τεσσάρων τεχνολογιών φωτισμού, το 2009, που πραγματοποιήθηκε από το Mascaro Center for Sustainable Innovation στο πανεπιστήμιο του Pittsburgh, βρήκε ότι τα LED παραμένουν η καλύτερη επιλογή όσον αφορά τις γενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

### Δυνατότητες που παραβλέπονται

Ενώ οι αρχιτέκτονες και καλλιτέχνες ανακαλύπτουν τη χρήση των LED και OLED για φωτισμό του εξωτερικού των κτιρίων, πόλεις που υιοθετούν την τεχνολογία LED για τον οδικό φωτισμό δεν χρησιμοποιούν τα μοναδικά και ευεργετικά χαρακτηριστικά της στο έπακρο των δυνατοτήτων της. Αυτές οι πόλεις αγνοούν

επιπρόσθετες εφαρμογές όπως το dimming, την εναλλαγή της θερμοκρασίας χρώματος και τις δυνατότητες εκπομπής σημάτων έκτακτης ανάγκης. Οι αισθητικές και λοιπές δυνατότητες των LED έχουν επίσης γενικώς παραβλεφθεί.



## 5 Βασικά στοιχεία αποδοτικού φωτισμού δρόμων

### 5.1 Εισαγωγή στον εξωτερικό φωτισμό-φωτισμό δρόμων

Ο εξωτερικός φωτισμός χρησιμοποιείται για διάφορους σκοπούς στην σύγχρονη κοινωνία. Οι διάφορες χρήσεις του φωτισμού επιβάλλουν διαφορετικές απαιτήσεις σχετικά με το είδος και την ένταση του φωτισμού, ώστε να αποφευχθούν διάφορες πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στους ανθρώπους και το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί κώδικες φωτισμού.

Ο εξωτερικός φωτισμός πρέπει να ρυθμίζεται από κανόνες και προδιαγραφές. Αν και υπάρχουν πολλές ανάγκες για φωτισμό, στις κατοικημένες περιοχές για παράδειγμα, παρατηρούνται οι αρνητικές συνέπειες του φωτισμού αρκετά μακριά από τα όρια της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένα τα φωτιστικά.

Ο φωτισμός δρόμου έχει σκοπό να δημιουργήσει ένα καλά φωτισμένο νυχτερινό περιβάλλον για οδηγούς και πεζούς, τέτοιο ώστε να μπορούν γρήγορα και με ακρίβεια να αναγνωρίζουν αντικείμενα που υπάρχουν στον ορίζοντα τους. Η μελέτη φωτισμού δρόμων είναι μια διαδικασία, η οποία εξαρτάται από πολλές παραμέτρους για να είναι επιτυχημένη. Οι χρήστες του δρόμου πρέπει να έχουν καλή όραση, έτσι ώστε για παράδειγμα να υπολογίζουν σωστά την ταχύτητα των οχημάτων και να εκτιμούν αποστάσεις, να παρατηρούν τυχόν εμπόδια και πεζούς, και πολλά άλλα.

Τα θέματα λοιπόν που έχει να αντιμετωπίσει ένας μελετητής φωτισμού όσον αφορά το φωτισμό δρόμου είναι πολύπλευρα. Μπορούμε όμως να τα συνοψίσουμε σε κάποιες μεγάλες κατηγορίες :

- Η επιλογή των σωστών φωτιστικών.
- Η απευθείας θάμβωση που προκαλείται στους οδηγούς.
- Η οριζόντια λαμπρότητα που βλέπει ο οδηγός στο οδόστρωμα.
- Η κατανομή του φωτός στο οδόστρωμα και το επίπεδο της ομοιομορφίας φωτισμού.
- Η ικανότητα να για περιφερειακή όραση( παράλληλα δηλαδή με το δρόμο).
- Η ανακλώμενη θάμβωση.
- Η χρήση του δρόμου.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες αποτελούν τα βασικά στοιχεία πάνω στα οποία πραγματοποιείται μια μελέτη οδοφωτισμού. Όταν εφαρμόζονται όλες οι αρχές για σωστό φωτισμό δρόμων, η ορατότητα που παρέχεται στους χρήστες του δρόμου έχει θετικά κοινωνικά και οικονομικά αποτελέσματα. Με τον σωστό φωτισμό δρόμων έχουμε εν δυνάμει μείωση των ατυχημάτων κατά τις νυκτερινές ώρες. Επίσης ο φωτισμός μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά και σε ζητήματα ασφαλείας.

## **5.2 Μελέτη φωτισμού δρόμων**

### **5.2.1 Εισαγωγή**

Το σύστημα φωτισμού ενός δρόμου πρέπει να εξυπηρετεί τις οπτικές ανάγκες των χρηστών του, δηλαδή της νυκτερινής κίνησης οχημάτων και πεζών.

Οι ανάγκες του οπτικού περιβάλλοντος κατά μήκος ενός αυτοκινητόδρομου μπορούν να εκφραστούν μέσα από τις έννοιες της έντασης φωτισμού και της λαμπρότητας, της ομοιομορφίας και της θάμβωσης. Ακόμη συγκεκριμενοποιείται η ανάγκη της ορισμού της μέσης λαμπρότητας (average luminance,  $L_{avg}$ ), η οποία είναι η μέση τιμή των λαμπροτήτων στην περιοχή του δρόμου που μελετάμε και της διάχυτης λαμπρότητας (veiling luminance,  $L_v$ ).

Η διάχυτη λαμπρότητα που δέχεται στο οπτικό του πεδίο ένας οδηγός από ένα σύστημα φωτιστικών δίνεται από την μαθηματική έκφραση :

$$L_v = \sum_{i=1}^n \frac{10E_v}{\theta^2 + 1,5\theta}$$

Όπου  $n$  είναι το πλήθος των φωτιστικών,  $E_v$  είναι η ένταση φωτισμού κάθετη στην κόρη του ματιού και  $\theta$  η γωνία ανάμεσα στην γραμμή όρασης και την ευθεία παρατήρησης του φωτιστικού σώματος. Να σημειωθεί πως η γραμμή όρασης είναι παράλληλη στο οδόστρωμα και σε ύψος περίπου 1,5μ από το οδόστρωμα.



### 5.2.2 Γενικοί τύποι χρήσης περιοχών

Η εκάστοτε περιοχή από την οποία διέρχεται ένας αυτοκινητόδρομος ή ένας αστικός δρόμος έχει ένα συγκεκριμένο χαρακτήρα. Ανάλογα με την χρήση τους, οι περιοχές χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι :

- Εμπορική περιοχή: Πρόκειται για μια περιοχή με έντονη νυκτερινή κίνηση από πεζούς σε συνδυασμό με την ύπαρξη εμπορικών επιχειρήσεων. Αυτός ο ορισμός εφαρμόζεται σε περιοχές μεγάλης ανάπτυξης εκτός και εντός του κέντρου μιας πόλης ή μιας κοινότητας. Ακόμη σε αυτή την κατηγορία εμπίπτουν οι περιοχές με μεγάλο όγκο οχημάτων και πεζών.
- Κατοικημένες περιοχές: Αφορά περιοχές με οικιστική χρήση, δηλαδή περιοχές στις οποίες υπάρχουν κατοικίες και μικρά εμπορικά καταστήματα. Η κίνηση των πεζών κατά τις νυκτερινές ώρες θεωρείται περιορισμένη.
- Ενδιάμεσες περιοχές: Πρόκειται για περιοχές που χαρακτηρίζονται από ενδιάμεση κίνηση πεζών. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν περιοχές κοντά σε θέατρα κινηματογράφους, πολυκατοικίες και βιομηχανικά πάρκα.

Road and Area Classification	Pavement Classification			Illuminance Uniformity Ratio $E_{avg}$ to $E_{min}$
	R1	R2 and R3	R4	
Freeway Class A	6	9	8	3 to 1
Freeway Class B	4	6	5	
Expressway	Commercial	14	13	3 to 1
	Intermediate	12	10	
	Residential	9	8	
Major	Commercial	17	15	3 to 1
	Intermediate	13	11	
	Residential	9	8	
Collector	Commercial	12	10	4 to 1
	Intermediate	9	8	
	Residential	6	5	
Local	Commercial	9	8	6 to 1
	Intermediate	7	6	
	Residential	4	4	

Εικόνα 5-1 Κατηγοριοποίηση οδοστρώματος σε συνδυασμό με κατηγοριοποίηση περιοχών

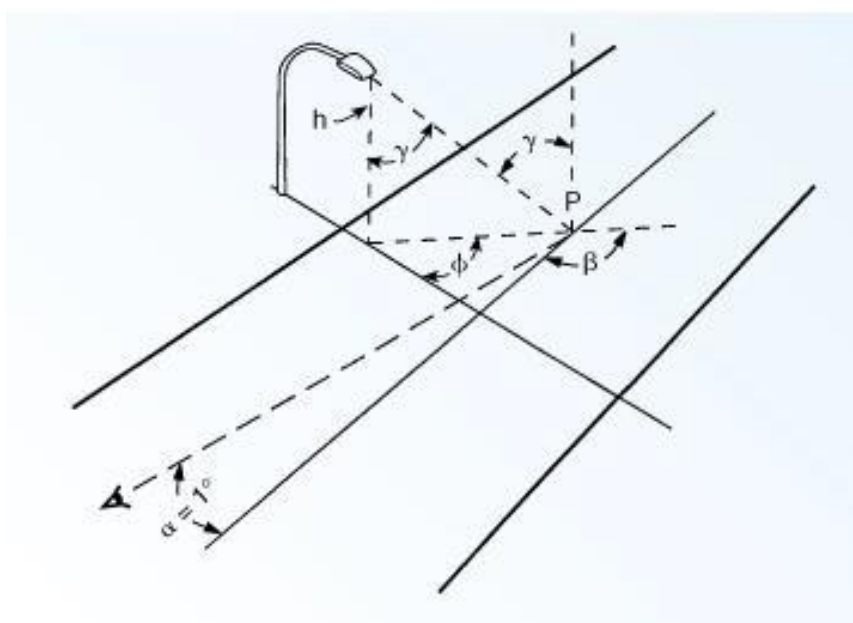
### 5.2.3 Κατηγοριοποίηση Οδοστρώματος

Ο υπολογισμός της λαμπρότητας του οδοστρώματος απαιτεί πληροφορίες για τις ανακλαστικότητες του οδοστρώματος. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι πιο κοινοί τύποι οδοστρώματος μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ένα περιορισμένο αριθμό από

συγκεκριμένους τύπους επιφανειών δρόμου με γνωστά δεδομένα ανακλαστικότητα. Τα δεδομένα αυτά δίνονται από τους πίνακες r (r-Tables, CIE).

Πίνακας 5-1 Κατηγοριοποίηση οδοστρώματος με βάση το επίπεδο της ανακλαστικότητας

Κατηγορία	Ανακλαστικότητα
R1	Κυρίως διάχυτη
R2	Μικτή ( διάχυτη και κανονική)
R3	Ελαφρώς κανονική
R4	Κυρίως κανονική



Εικόνα 5-2 Ορισμός των γωνιών  $\beta, \gamma, \phi$  απαραίτητων για την εύρεση του συντελεστή ανάκλασης

Πίνακας 5-2 Εύρεση συντελεστή μειωμένης λαμπρότητας για ανακλαστικές R1, R3 (r Table CIE)

$\beta$ tan $\gamma$	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655
0.25	619	619	619	619	610	610	610	610	610	610	610	610	610	601	601	601	601	601	601	601
0.5	539	539	539	539	539	539	521	521	521	521	521	503	503	503	503	503	503	503	503	503
0.75	431	431	431	431	431	431	431	431	431	431	395	386	371	371	371	371	371	386	395	395
1	341	341	341	341	323	323	305	296	287	287	278	269	269	269	269	269	269	278	278	278
1.25	269	269	269	260	251	242	224	207	198	189	189	180	180	180	180	180	189	198	207	224
1.5	224	224	224	215	198	180	171	162	153	148	144	144	139	139	139	144	148	153	162	180
1.75	189	189	189	171	153	139	130	121	117	112	108	103	99	99	103	108	112	121	130	139
2	162	162	157	135	117	108	99	94	90	85	85	83	84	84	86	90	94	99	103	111
2.5	121	121	117	95	79	66	60	57	54	52	51	50	51	52	54	58	61	65	69	75
3	94	94	86	66	49	41	38	36	34	33	32	31	31	33	35	38	40	43	47	51
3.5	81	80	66	46	33	28	25	23	22	22	21	21	22	22	24	27	29	31	34	38
4	71	69	55	32	23	20	18	16	15	14	14	14	15	17	19	20	22	23	25	27
4.5	63	59	43	24	17	14	13	12	12	11	11	11	12	13	14	14	16	17	19	21
5	57	52	36	19	14	12	10	9.0	9.0	8.8	8.7	8.7	9.0	10	11	13	14	15	16	16
5.5	51	47	31	15	11	9.0	8.1	7.8	7.7	7.7										
6	47	42	25	12	8.5	7.2	6.5	6.3	6.2											
6.5	43	38	22	10	6.7	5.8	5.2	5.0												
7	40	34	18	8.1	5.6	4.8	4.4	4.2												
7.5	37	31	15	6.9	4.7	4.0	3.8													
8	35	28	14	5.7	4.0	3.6	3.2													
8.5	33	25	12	4.8	3.6	3.1	2.9													
9	31	23	10	4.1	3.2	2.8														
9.5	30	22	9.0	3.7	2.8	2.5														
10	29	20	8.2	3.2	2.4	2.2														
10.5	28	18	7.3	3.0	2.2	1.9														
11	27	16	6.6	2.7	1.9	1.7														
11.5	26	15	6.1	2.4	1.7															
12	25	14	5.6	2.2	1.6															

$Q_0 = 0.10; S1 = 0.25; S2 = 1.53$

a

$\beta$ tan $\gamma$	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390
0.25	411	411	411	411	411	411	411	411	411	411	379	368	357	357	346	346	346	335	335	335
0.5	411	411	411	411	403	403	384	379	370	346	325	303	281	281	271	271	271	260	260	260
0.75	379	379	379	368	357	346	325	303	281	260	238	216	206	206	206	206	208	206	206	206
1	335	335	335	325	292	291	260	238	216	195	173	152	152	152	152	152	141	141	141	141
1.25	303	303	292	271	238	206	184	152	130	119	108	100	103	106	108	108	114	114	119	119
1.5	271	271	260	227	179	152	141	119	108	93	80	76	76	80	84	87	89	91	93	95
1.75	249	238	227	195	152	124	106	91	78	67	61	52	54	58	63	67	69	71	73	74
2	227	216	195	152	117	95	80	67	61	52	45	40	41	45	49	52	54	56	57	58
2.5	195	190	146	110	74	58	48	40	35	30	27	24	26	28	30	33	35	38	40	41
3	160	155	115	67	43	33	26	21	18	17	16	16	17	17	18	21	22	24	26	27
3.5	146	131	87	41	25	18	15	13	12	11	11	11	11	11	12	14	15	17	18	21
4	132	113	67	27	15	12	10	9.4	8.7	8.2	7.9	7.6	7.9	8.7	9.6	11	12	13	15	17
4.5	118	95	50	20	12	8.9	7.4	6.6	6.3	6.1	5.7	5.6	5.8	6.3	7.1	8.4	10	12	13	14
5	106	81	38	14	8.2	6.3	5.4	5.0	4.8	4.7	4.5	4.4	4.8	5.2	6.2	7.4	8.5	9.5	10	11
5.5	96	69	29	11	6.3	5.1	4.4	4.1	3.9	3.8										
6	87	58	22	8.0	5.0	3.9	3.5	3.4	3.2											
6.5	78	50	17	6.1	3.8	3.1	2.8	2.7												
7	71	43	14	4.9	3.1	2.5	2.3	2.2												
7.5	67	38	12	4.1	2.6	2.1	1.9													
8	63	33	10	3.4	2.2	1.8	1.7													
8.5	58	28	8.7	2.9	1.9	1.6	1.5													
9	55	25	7.4	2.5	1.7	1.4														
9.5	52	23	6.5	2.2	1.5	1.3														
10	49	21	5.6	1.9	1.4	1.2														
10.5	47	18	5.0	1.7	1.3	1.2														
11	44	16	4.4	1.6	1.2	1.1														
11.5	42	14	4.0	1.5	1.1															
12	41	13	3.6	1.4	1.1															

$Q_0 = 0.07; S1 = 0.58; S2 = 1.80$

b

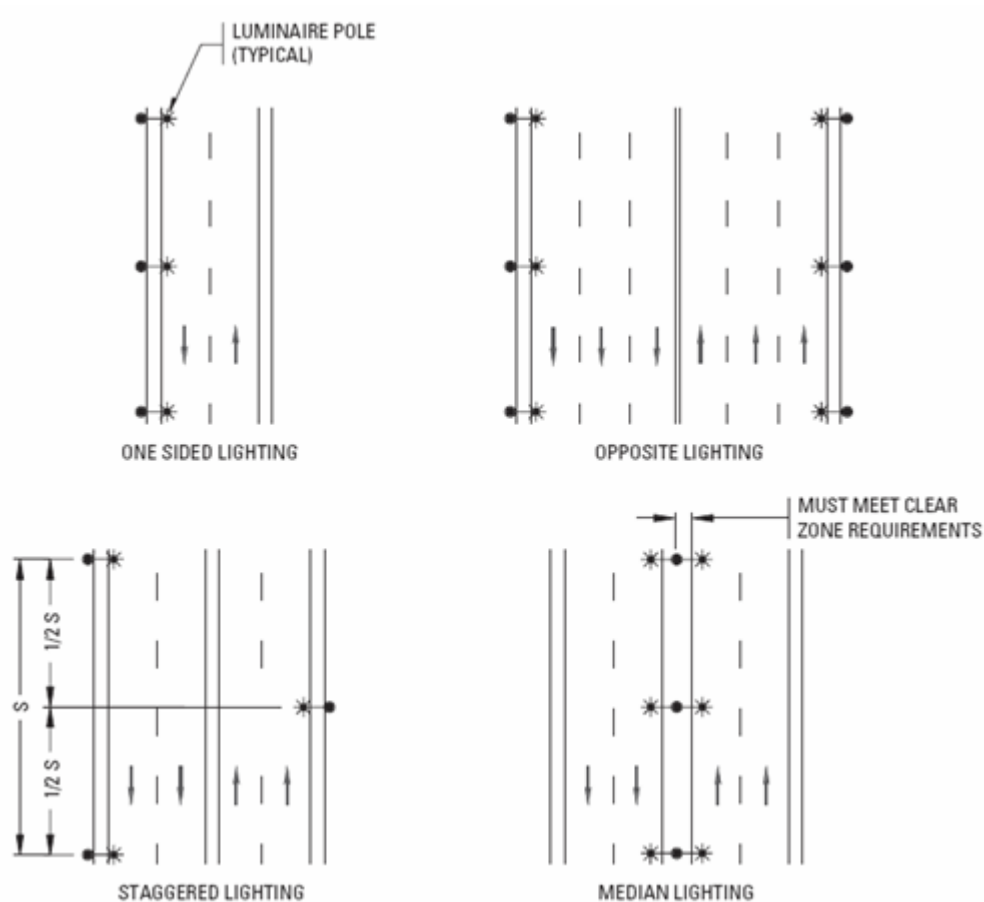
#### 5.2.4 Διατάξεις ιστών οδοφωτισμού

Στον φωτισμό δρόμων αναγνωρίζονται τέσσερις επίσημοι τρόποι τοποθέτησης των ιστών οδοφωτισμού ( BIS,1981)

- Μονόπλευρη Διάταξη, στην οποία όλα τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα στην μια πλευρά του δρόμου. Η διάταξη αυτή προτείνεται για πλάτος δρόμου μικρότερο ή ίσο με το ύψος ανάρτησης του φωτιστικού
- Διάταξη σε Χιαστί, στην οποία τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα εκατέρωθεν του δρόμου σε σχήμα ζικ ζακ. Προτείνεται για χρήση σε δρόμους με πλάτος από 1 μέχρι 1.5 ΜΗ, όπου ΜΗ (Mounting Height, Ύψος Ανάρτησης)
- Αμφίπλευρη Διάταξη, στην οποία τα φωτιστικά είναι τοποθετημένοι και στις δυο πλευρές του δρόμου. Συνίσταται για δρόμους πλάτους >1.5ΜΗ
- Αξονική τοποθέτηση, στην οποία τα φωτιστικά βρίσκονται στο κέντρο του δρόμου. Συνίσταται για χρήση σε δρόμους πλάτους <=1ΜΗ

*Να σημειωθεί ότι οι συστάσεις που υπάρχουν είναι ενδεικτικές. Πλέον με την οπτική τεχνολογία των φακών οδοφωτισμού μπορούμε να τοποθετήσουμε φωτιστικά με μονόπλευρη διάταξη σε δρόμους με πλάτος μέχρι και 2ΜΗ.*

Κάθε περίπτωση δρόμου απαιτεί και ξεχωριστή επιλογή διάταξης. Σε μεγάλες λεωφόρους διπλής κυκλοφορίας με διαχωριστικό, η τοποθέτηση γίνεται στο κέντρο της νησίδας με δυο φωτιστικά ανά ιστό. Σε δρόμους με αρκετή καμπυλότητα προτιμάται η χρήση μονόπλευρης διάταξης με χρήση ψηλών ιστών με την τοποθέτηση να γίνεται στο εξωτερικό της καμπύλης.



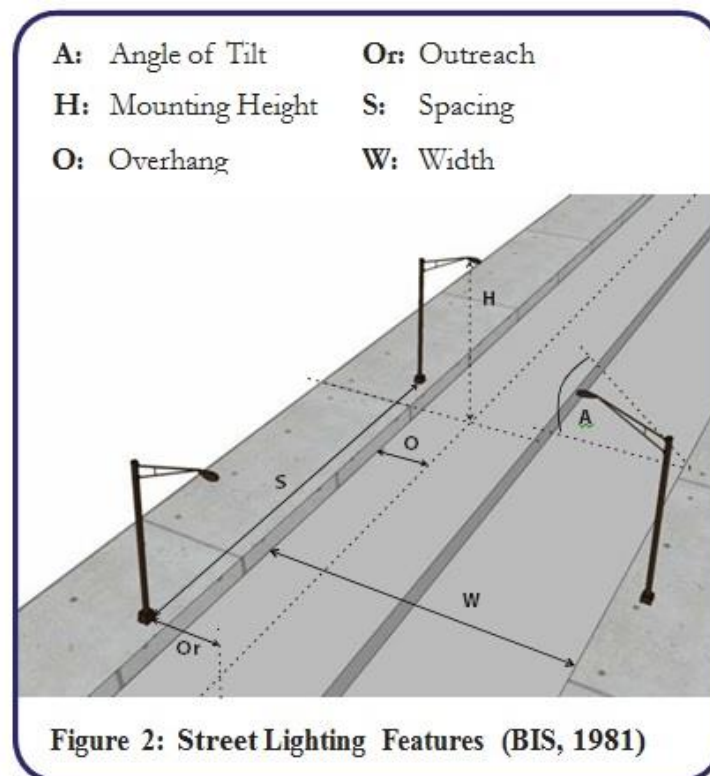
Εικόνα 5-3 Μέθοδοι τοποθέτησης φωτιστικών οδοφωτισμο

### 5.2.5 Βασική ορολογία μελέτης φωτισμού δρόμου

Όπως φαίνεται στο σχήμα υπάρχουν διάφορες μεταβλητές που καθορίζουν την θέση του φωτιστικού πάνω σε ένα ιστό σε σχέση με το δρόμο.

- Κλίση/Angle Of Tilt, A: Η κλίση με την οποία είναι τοποθετημένο το φωτιστικό. Ουσιαστικά πρόκειται για την κλίση του βραχίονα
- Απόσταση Ιστών /Spacing, S: Η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κολώνων φωτισμού. Για να διατηρείται η διαμήκης ομοιομορφία υπάρχει ο εμπειρικός κανόνας που ορίζει ότι η απόσταση των ιστών πρέπει να είναι 3ΜΗ. Η απόσταση των ιστών καθορίζεται όμως συχνά από την θέση των πυλώνων ηλεκτρικής ενέργειας, από τις ιδιοκτησίες κατά μήκος του δρόμου την γεωμετρία της περιοχής, δέντρα κ.α. Γενικότερα προτιμάται ο συνδυασμός μεγάλης απόστασης ιστών και μεγάλου ύψους ανάρτησης διότι θεωρείται πιο οικονομικός.

- Προβολή/ Outreach, Or: Η απόσταση μεταξύ της προεξοχής του φωτιστικού και του ιστού. Υπολογίζεται κυρίως για αισθητικούς λόγους
- Προεξοχή/ Overhang, O: Η οριζόντια απόσταση μεταξύ του κέντρου του φωτιστικού και του ρείθρου του δρόμου. Γενικά η προεξοχή του φωτιστικού δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το  $\frac{1}{4}$  MH (Corporation of Chennai, 2003).
- Ύψος Ανάρτησης/ Mounting Height, H: Το ύψος που έχει τοποθετηθεί το φωτιστικό και όχι απαραίτητα ίδιο με το ύψος του ιστού. Τις τελευταίες δεκαετίες τα ύψη ανάρτησης των φωτιστικών έχουν αυξηθεί σημαντικά λόγω της βελτιωμένης απόδοσης των νέων τεχνολογιών λαμπτήρων.



### 5.3 Συντελεστής συντήρησης ( Maintenance factor)

Οι προτεινόμενες τιμές λαμπρότητας και έντασης φωτισμού των προτύπων για ένα καθορισμένο τύπο δρόμου, είναι τιμές με ενσωματωμένο τον συντελεστή συντήρησης. Αυτό γίνεται διότι η εγκατάσταση φωτισμού θα πρέπει να είναι σε θέση να μπορεί να φωτίσει αποτελεσματικά τον δρόμο όταν το φωτιστικό και η φωτεινή

πηγή θα έχουν φθαρεί. Στην Ελλάδα η νομοθεσία καθορίζει την τιμή του συντελεστή συντήρησης στο 0,7.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης μιας εγκατάστασης χρησιμοποιούμε τα εξής δεδομένα:

A) Παράγοντας πτώσης φωτεινής ροής λαμπτήρα( Lamp Lumen Depreciation Factor)

Η φωτεινή ροή των λαμπτήρων εξασθενούν με την πάροδο του χρόνου, ακόμα και υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Ο παράγοντας LLD είναι ένα ποσοστό της αρχικής φωτεινής ροής του λαμπτήρα σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Ο παράγοντας LDD παρέχεται από τα φυλλάδια κατασκευαστών λαμπτήρων και σε συνδυασμό με το πλάνο συντήρησης, καταλήγουμε στην τελική τιμή του.

Maintenance Category	Top Enclosure	Bottom Enclosure
I	1. None	1. None
II	1. None 2. Transparent with 15 percent or more uplight through apertures 3. Translucent with 15 percent or more uplight through apertures 4. Opaque with 15 percent or more uplight through apertures	1. None 2. Louvers or baffles
III	1. Transparent with less than 15 percent upward light through apertures 2. Translucent with less than 15 percent upward light through apertures 3. Opaque with less than 15 percent uplight through apertures	1. None 2. Louvers or baffles
IV	1. Transparent unapertured 2. Translucent unapertured 3. Opaque unapertured	1. None 2. Louvers
V	1. Transparent unapertured 2. Translucent unapertured 3. Opaque unapertured	1. Transparent unapertured 2. Translucent unapertured
VI	1. None 2. Transparent unapertured 3. Translucent unapertured 4. Opaque unapertured	1. Transparent unapertured 2. Translucent unapertured 3. Opaque unapertured

Πίνακας 5-3 1<sup>ο</sup> Βήμα: Επιλογή κατηγορίας συντήρησης

B )Παράγοντας Φθοράς Φωτιστικού( Luminaire Dirt Depreciation Factor)

Η συγκέντρωση σκόνης και ακαθαρσιών έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της φωτεινής ροής του φωτιστικού με την πάροδο του χρόνου. Για την μέτρηση του συντελεστή LDD τα φωτιστικά κατατάσσονται σε έξι κατηγορίες με βάση τον ακόλουθο πίνακα.

Luminaire Maintenance Category	B	A				
		Very Clean	Clean	Medium	Dirty	Very Dirty
I	.69	.038	.071	.111	.162	.301
II	.62	.033	.068	.102	.147	.188
III	.70	.079	.106	.143	.184	.236
IV	.72	.070	.131	.216	.314	.452
V	.53	.078	.128	.190	.249	.321
VI	.88	.076	.145	.218	.284	.396

Πίνακας 5-4 2<sup>ο</sup> Βήμα: Επιλογή συντελεστών A,B με βάση την κατηγορία συντήρησης και επίπεδο ακαθαρσιών

Πίνακας 5-5 Επιλογή επιπέδου ακαθαρσιών περιβάλλοντος χώρου

Generated Dirt	None	Very little	Noticeable but not heavy	Accumulates rapidly	Constant accumulation
Ambient Dirt	None (or none enters area)	Some (almost none enters)	Some enters area	Large amount enters area	Almost none excluded
Removal or Filtration	Excellent	Better than average	Poorer than average	Only fans or blowers if any	None
Adhesion	None	Slight	Enough to be visible after some months	High—probably due to oil, humidity, or static	High
Examples	High grade offices, not near production; laboratories; clean rooms	Offices in older buildings or near production; light assembly; inspection	Mill offices; paper processing; light machining	Heat treating; high-speed printing; rubber processing	Similar to dirty but luminaires within immediate area of contamination

Με την χρήση των παραπάνω πινάκων και τις εξίσωσης  $LDD = e^{-At^B}$  υπολογίζουμε τον συντελεστή φθοράς του φωτιστικού.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης χρειαζόμαστε και λοιπούς παράγοντες φθοράς που αφορούν το ballast όπου αυτό υπάρχει, και άλλους.

Πίνακας 5-6 Λοιποί παράγοντες (A) που επηρεάζουν τον συντελεστή συντήρησης

<b>Nonrecoverable</b>
Luminaire ambient temperature factor
Heat extraction thermal factor
Voltage-to-luminaire factor
Ballast factor
Ballast-lamp photometric factor
Equipment operating factor
Lamp position (tilt) factor
Luminaire surface depreciation factor
<b>Recoverable</b>
Lamp lumen depreciation factor
Luminaire dirt depreciation factor
Room surface dirt depreciation factor
Lamp burnout factor

$$MF = LDD * LLD * A$$

όπου, A είναι η επίδραση των λοιπών παραγόντων απώλειας απόδοσης. Ο συντελεστής συντήρησης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ενέργεια που καταναλώνει ένα σύστημα φωτισμού. Αρκεί να σκεφτούμε πως ένα σύστημα με MF= 0,8 είναι κατά 1/0,8=25% υπερδιαστασιοποιημένο. Η σωστή τιμή επομένως του συντελεστή συντήρησης βελτιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση της εγκατάστασης.



#### **5.4 Ποιότητα και ομοιομορφία**

Ο ποιοτικός φωτισμός σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος φωτισμού να παρέχει την αναγκαία αντίθεση στόχου ή εμποδίου (καλή ορατότητα) στον άνθρωπο έτσι ώστε να ανταποκριθεί έγκαιρα στα οπτικά ερεθίσματα που δέχεται. Έαν η ποιότητα του φωτισμού μιας εγκατάστασης φωτισμού είναι μεγαλύτερη από μιας άλλης, έχοντας τον ίδιο μέσο όρο λαμπρότητας στο οδόστρωμα, τότε η οπτική αναγνώριση και τα οπτικά αντανάκλαστικά των οδηγών είναι αυξημένα. Η ομοιομορφία δηλαδή η τιμή της ελάχιστης παρατηρούμενης λαμπρότητας προς την μέση, σχετίζεται άμεσα με την ποιότητα καθώς μας δείχνει κατά πόσο ένας δρόμος είναι σωστά φωτισμένος.

#### **5.5 Αλγόριθμος σχεδιασμού συστήματος οδικού φωτισμού**

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος οδικού φωτισμού λαμβάνει υπόψη την ορατότητα, την οικονομία, την αισθητική, την ασφάλεια, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς επίσης και τα κατάλληλα υλικά και εξοπλισμό. Η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να επιμεριστεί στα ακόλουθα βήματα:

- I. Προσδιορισμός του τύπου οδοστρώματος και κατηγοριοποίηση της παρακείμενης περιοχής κατά μήκος του οδικού τμήματος που θα φωτισθεί. Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 2.2 υπάρχουν τρεις τύποι κατάταξης περιοχής: η εμπορική, ενδιάμεση και κατοικημένη. Όσον αφορά τον τύπο του οδοστρώματος εάν δεν είναι γνωστός γίνεται η χρήση των τιμών R3 από σχετικούς πίνακες.
- II. A) Επιλογή του επιπέδου και της ομοιομορφίας της λαμπρότητας των οδοστρωμάτων και αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ της  $L_v$  και της  $L_{avg}$   
B) Καθορισμός της ταξινόμησης του οδοστρώματος και της επιθυμητής μέσης οριζόντιας έντασης φωτισμού, και της ομοιομορφίας.
- III. Έρευνα αγοράς για την επιλογή φωτιστικών σωμάτων και λαμπτήρων.
- IV. Προκαταρκτική επιλογή μιας ή περισσότερων γεωμετριών συστήματος φωτισμού, δηλαδή μέθοδο τοποθέτησης ιστών. Επίσης θα πρέπει να υπολογισθούν και οι λοιπές παράμετροι ύψος φωτιστικού, προεξοχή κ.α. που αναλύονται στην παράγραφο 2.5 που ο συνδυασμός τους θα προσφέρει έναν

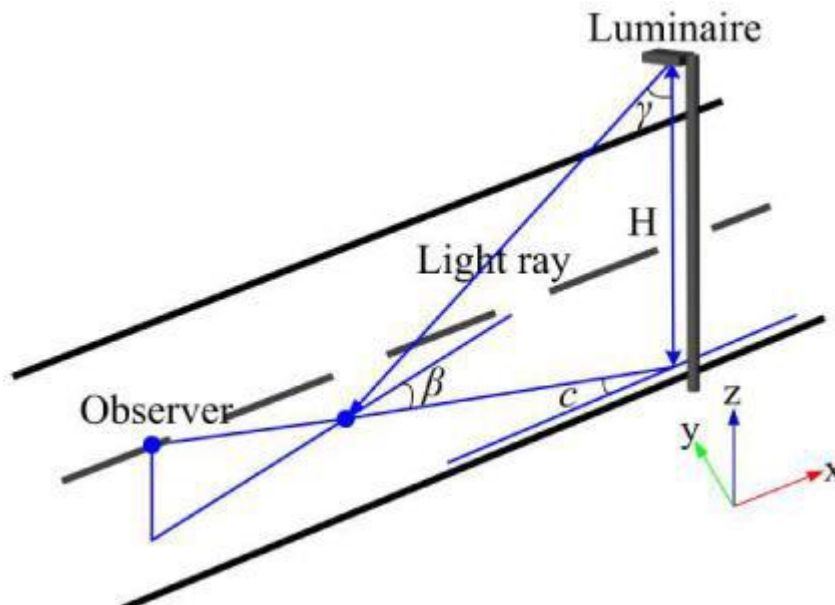


## 5.6 Μαθηματικός Υπολογισμός Λαμπρότητας στο Οδόστρωμα για Δοσμένη Διάταξη

### 5.6.1 Υπολογισμός της Μειωμένης Λαμπρότητας Οδοστρώματος

Σε αυτήν την παράγραφο θα ασχοληθούμε με τον υπολογισμό της λαμπρότητας και της οριζόντιας έντασης φωτισμού σε ένα καθορισμένο τμήμα δρόμου με μονόπλευρη διάταξη ιστών. Έστω  $H$  το ύψος ανάρτησης των φωτιστικών και  $W$  το πλάτος του δρόμου. Η απόσταση δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με  $S$ . Ακόμη να σημειωθεί πως με  $MF$  θα ορίζουμε τον συντελεστή συντήρησης της εγκατάστασης.

Η λαμπρότητα του οδοστρώματος βρίσκεται σε άμεση συσχέτιση με την θέση παρατήρησης και τις ανακλαστικές ιδιότητες του οδοστρώματος. Η λαμπρότητα εξαρτάται από την ένταση φωτισμού, την κατεύθυνση παρατήρησης, το χρώμα, την στεγανότητα και την ποιότητα επιφάνειας του οδοστρώματος. Οι καθορισμένες θέσεις παρατήρησης έχουν καθοριστεί από την Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού CIE. Συγκεκριμένα ο οδηγός βρίσκεται σε απόσταση  $x=60\text{m}$  από το κομμάτι του υπολογιζόμενου δρόμου και σε ύψος παρατήρησης  $z=1.5\text{m}$ .



Εικόνα 5-5 Οι απαραίτητες για τους υπολογισμούς γωνίες

Η θέση του οδηγού ως προς την  $y$  διάσταση, δηλαδή κατά πλάτος του δρόμου, είναι πάντα στο μέσο της αντίστοιχης λωρίδας κυκλοφορίας. Δηλαδή σε ένα δρόμο με δυο λωρίδες κυκλοφορίας οι δυο παρατηρητές είναι σε θέσεις  $P1=W/4$  και  $P2=3W/4$ .

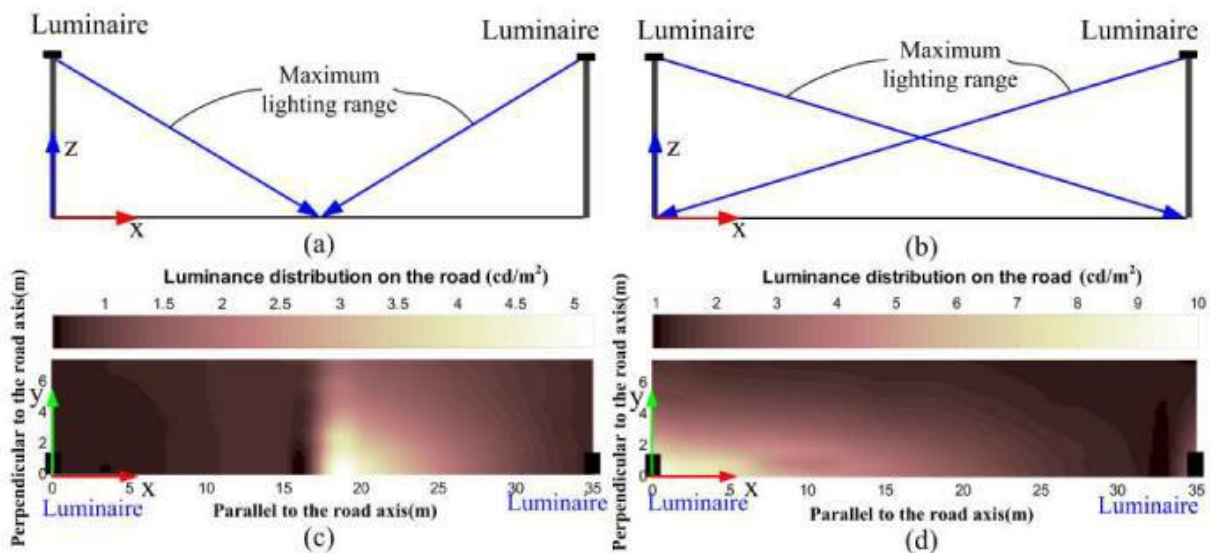
Οι ανακλαστικές ιδιότητες του οδοστρώματος περιγράφονται από το συντελεστή μειωμένης λαμπρότητας  $r(\beta, \gamma)$ , όπου  $\beta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δυο κατακόρυφων επιπέδων, πρόσπτωσης και παρατήρησης και  $\gamma$  η γωνία πρόσπτωσης (βλέπε Εικόνα 5-5)

Έτσι η λαμπρότητα του οδοστρώματος δίνεται από την σχέση:

$$L(\beta, \gamma) = \sum_{\kappa=1}^K \frac{r(\beta, \gamma) \cdot E_{\kappa}(c, \gamma) \cdot MF}{10^4 \cdot \cos^3 \gamma}$$

$$E_{\kappa}(c, \gamma) = \frac{I_{\kappa}(c, \gamma) \cdot \cos^3 \gamma}{H^2}$$

Όπου  $E_{\kappa}(c, \gamma)$  είναι η ένταση φωτισμού που παράγεται από το  $\kappa$ -οστό φωτιστικό του πλέγματος υπολογισμού. Οι τιμές για το  $r(\beta, \gamma)$  παρέχονται από τους πίνακες της CIE για τους τέσσερις τυπικούς τύπους οδοστρώματος (R1, R2, R3, R4).

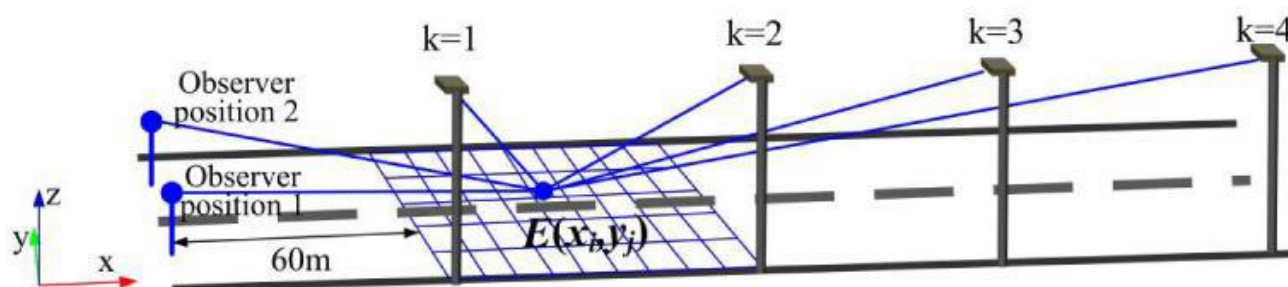


Εικόνα 5-6 Διαφορετικά φωτιστικά (α) , (β) στο ίδιο ύψος ανάρτησης με διαφορετική κατανομή φωτός . Και στις δυο περιπτώσεις  $MH=10m$ ,  $W=7,5m$  και  $S=35m$

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-6, δυο φωτιστικά με ομοιόμορφη κατανομή μπορούν να δημιουργήσουν έντονη αντίθεση (contrast) στην μεταξύ τους απόσταση, που δημιουργεί το φαινόμενο εναλλαγής επιπέδου λαμπρότητας (zebra effect), σκοτεινά και φωτεινά σημεία. Στο (α) η μέγιστη γωνία εκπομπής βρίσκεται στα 17,5m, ενώ στο (β) στα 35m. Επομένως διαπιστώνουμε την σημαντικότητα του υπολογισμού της λαμπρότητας ως μέγεθος και της σωστής εφαρμογής των κανόνων και των προτύπων σε κάθε εφαρμογή φωτισμού.

### 5.6.2 Μέθοδος Υπολογισμού Λαμπρότητας και Έντασης Φωτισμού σε ένα υπό μελέτη τμήμα δρόμου

Όπως φαίνεται στο σχήμα η επιφάνεια του δρόμου που ορίζεται μεταξύ δυο διαδοχικών φωτιστικών σωμάτων, και της κάθετης σε αυτά επιφάνειας ( μπλε τμήμα) είναι ο χώρος υπολογισμού των τιμών της λαμπρότητας και της έντασης φωτισμού. Η επιφάνεια υπολογισμού χωρίζεται σε  $N \times M$  τετραγωνικά κελιά. Χρησιμοποιούμε καρτεσιανές συντεταγμένες  $(x_i, y_j)$ , όπου τα  $x, y$  δηλώνουν της συντεταγμένες παράλληλα με τον άξονα του δρόμου και κάθετα αντιστοίχως. Τα  $i, j$  παίρνουν τιμές  $i=1,2,3,\dots,N$  και  $j=1,2,3,\dots,M$



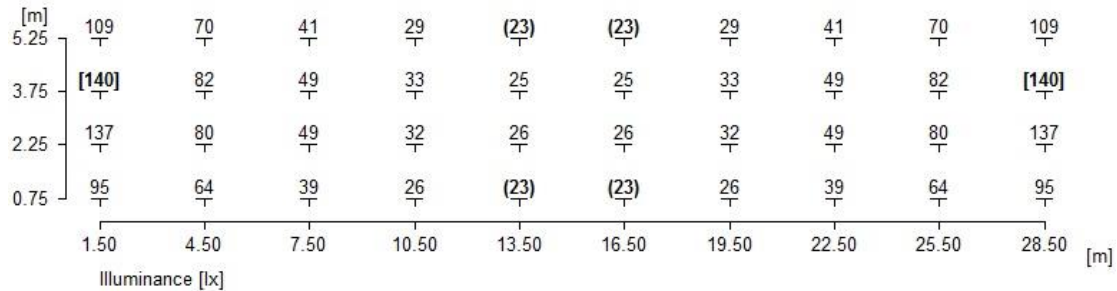
Εικόνα 5-7. Απεικόνιση του πλέγματος υπολογισμού σε ένα κομμάτι δρόμου, καθώς και των βασικών παραμέτρων

Με καθορισμένο το ύψος ανάρτησης, την απόσταση των ιστών, το πλάτος του δρόμου και τις θέσεις των παρατηρητών οι γωνίες  $\epsilon, \beta, \gamma$  και ο συντελεστής της μειωμένης λαμπρότητας μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των καρτεσιανών συντεταγμένων

Έτσι η σχέση της λαμπρότητας γίνεται:

$$L(x_i, y_j) = \sum_{k=1}^K \frac{r_k(x_i, y_j) \cdot E_k(x_i, y_j) \cdot MF}{10^4 \cdot \cos^3 \gamma_k(x_i, y_j)}$$

Όπου  $E_k(x_i, y_j)$  είναι η ένταση φωτισμού στο σημείο (κελί)  $(x_i, y_j)$ , που παράγεται από κ-οστό φωτιστικό με  $K=1, 2, 3, \dots, K$



Εικόνα 5-8 Εύρεση της έντασης φωτισμού στα κελιά του πλέγματος.

Η μέση ένταση φωτισμού και η μέση λαμπρότητα οδοστρώματος :

$$E_{avg} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E(x_i, y_j) \cdot \frac{MF}{NM}$$

$$E(x_i, y_j) = \sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j)$$

$$L_{avg} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M L(x_i, y_j) \cdot \frac{1}{NM}$$

Οι συντελεστές ομοιομορφίας και η συνολική ομοιομορφία λαμπρότητας οδοστρώματος εκφράζονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$E_o = \frac{\min(E(x_i, y_j))}{E_{avg}}$$

$$U_o = \frac{\min(L(x_i, y_j))}{L_{avg}}$$

Η διαμήκης ομοιομορφία που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το φαινόμενο ζέβρας (Zebra Effect) δίνεται από την σχέση

$$L_{avg} = \frac{\min(L(x_i, y_{center}))}{\max(LL(x_i, y_{center}))}$$

Με τις τιμές  $\min(L(x_i, y_{center}))$  και  $\max(LL(x_i, y_{center}))$  να είναι οι ελάχιστες τιμές και μέγιστες τιμές λαμπρότητας που συναντάει ο παρατηρητής- οδηγός κατά μήκος του άξονα του δρόμου. Η θέση του κάθε παρατηρητή έχει καθοριστεί και είναι στο μέσο κάθε λωρίδας κυκλοφορίας, σε απόσταση 60m και σε ύψος 1,5m από το επίπεδο του οδοστρώματος.

Η θάμβωση που προκαλείται από ένα σύστημα φωτιστικών, μετρείται και καθορίζεται από τον συντελεστή θάμβωσης ο οποίος προσδιορίζεται μέσα από την διάχυτη λαμπρότητα και την μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος.

$$L_v = 10 * \sum_{k=1}^K \frac{E_{ek}}{\theta_{ek}^2}$$

Με  $E_{ek}$  να ορίζεται η κάθετη ένταση φωτισμού στο επίπεδο παρατήρησης του οδηγού το οποίο είναι  $1^\circ$  προς τα κάτω μετατοπισμένο από τον διαμήκη άξονα του δρόμου. Η γωνία  $\theta_{ek}$  είναι η γωνία μεταξύ της γραμμής όρασης και της ευθείας παρατήρησης του κ-οστού φωτιστικού σώματος

Έτσι ο παράγοντας θάμβωσης TI (Threshold Increment) δίνεται από την εξίσωση

$$TI = 65 \frac{L_v}{L_{avg}^{0.8}}$$

για τιμές μέσης λαμπρότητας  $0.5 \text{cd/m}^2 \leq L_{avg} \leq 5 \text{cd/m}^2$

Τέλος ο δείκτης παρακείμενου φωτισμού S που εκφράζει το πόσο ικανοποιητικός είναι ο παρακείμενος στο δρόμο φωτισμός δίνεται από την σχέση

$$S = \frac{E_{adj}}{E_{avg}}$$

με  $E_{adj}$  να εκφράζει τη μέση ένταση φωτισμού στα όρια του δρόμου.

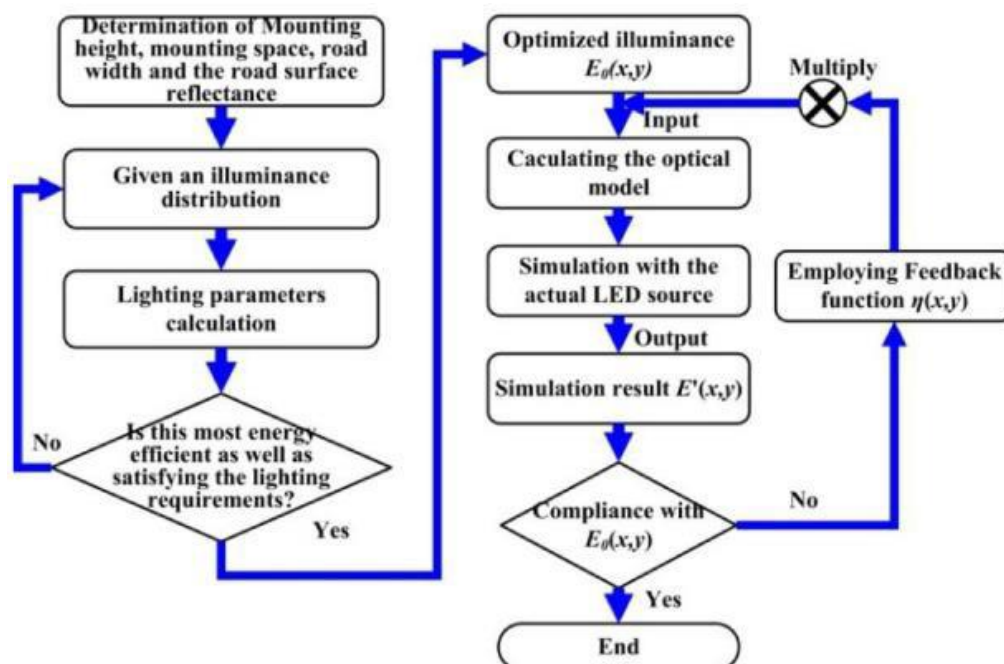
## 5.7 Δημιουργία αλγορίθμου για την βέλτιστη οπτική και ενεργειακή απόδοση στον φωτισμό δρόμων με LED.

Η πρόταση αφορά την σχεδίαση φακών για τις απαιτήσεις κάθε μοναδικού δρόμου, μέσω της βελτιστοποίησης της έντασης φωτισμού των φωτιστικών. Ο αλγόριθμος χωρίζεται σε δυο τμήματα: την βελτιστοποίηση της έντασης φωτισμού και την σχεδίαση του βέλτιστου φακού για την συγκεκριμένη περίπτωση δρόμου.

Υπάρχουν τέσσερα βήματα για την βελτιστοποίηση της έντασης φωτισμού.

- Καθορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών( ύψος ανάρτησης, πλάτος δρόμου, απόσταση ιστών, προεξοχή, κλίση και ανακλαστικότητα του οδοστρώματος)
- Με δεδομένη την κατανομή έντασης φωτισμού του φωτιστικού υπολογίζουμε τις παραμέτρους φωτισμού του δρόμου όπως αποδείξαμε στην προηγούμενη παράγραφο
- Με βάση το κριτήριο ενεργειακής απόδοσης  $Q = \frac{L_{avg}}{E_{avg}}$  ο αλγόριθμος αποφασίζει ένα αυτή η κατανομή μπορεί να γίνει η πιο αποδοτική για τις συγκεκριμένες γεωμετρικές δρόμου.
- Εάν ναι προχωρά στην σχεδίαση του βέλτιστου φακού μέσω αναδρομών.

Το διάγραμμα ροής της εικόνας περιγράφει την παραπάνω διαδικασία με ακρίβεια



Διάγραμμα 5.1 Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου βελτιστοποίησης



## 6 Φωτισμός δρόμων και αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον

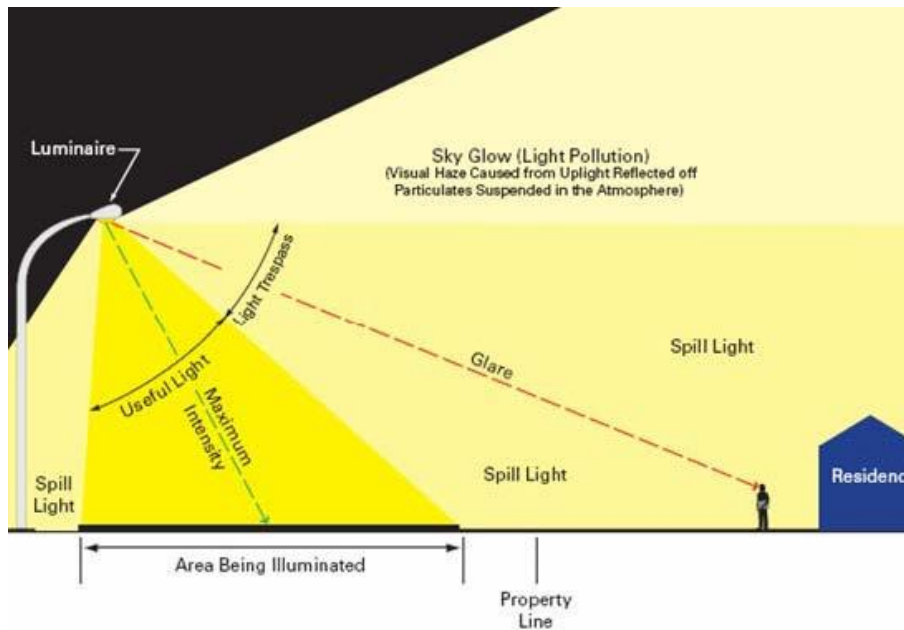
### 6.1 Φωτισμός δρόμων και περιβάλλον

Όλα τα ζωντανά όντα ρυθμίζουν την συμπεριφορά τους σύμφωνα με το φυσικό φως. Η ανθρώπινη εφεύρεση του τεχνητού φωτός έχει κάνει πολλά για να προστατεύσει το νυκτερινό περιβάλλον, αλλά το μη ελεγχόμενο διάχυτο φως μπορεί να προκαλέσει σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα και οικολογικά προβλήματα.

Ο νυκτερινός φωτισμός επηρεάζει άμεσα τους ανθρώπους, τα ζώα και τα φυτά είτε αυτά βρίσκονται πάνω στους αυτοκινητόδρομους είτε εκτός. Οι επιδράσεις του φωτισμού ενός δρόμου πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη και να αξιολογούνται σε κάθε έργο φωτισμού.

Ο ενοχλητικός φωτισμός ή αλλιώς *Light Trespass* όπως αναγνωρίζεται διεθνώς, απαρτίζεται από τρία άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους στοιχεία

- Διαφεύγων φωτισμός(Spill light): Το φως που πέφτει εκτός των ορίων της περιοχής που πρέπει να φωτιστεί. Η ένταση του διαφεύγοντος φωτισμού μετρείται στο επίπεδο C90-C270.
- Θάμβωση(Glare): Πρόκειται για μια αρνητική επίπτωση του φωτισμού όταν το φωτιστικό σύστημα δεν είναι σωστά σχεδιασμένο. Η θάμβωση ελέγχεται με το να μην επιτρέπεται στο φως να διαφεύγει πάνω από τις 75°
- Λάμψη νυκτερινού ουρανού(Sky glow): Το φως που ανακλάται από την φωτεινή πηγή, το οδόστρωμα ή άλλες φωτιζόμενες επιφάνειες και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Το αποτέλεσμα της λάμψης του ουρανού είναι η αδυναμία παρατήρησης των αστεριών. Ακόμη δημιουργείται πρόβλημα στις αστρονομικές παρατηρήσεις λόγω έλλειψης φωτεινής αντιπαράθεσης (contrast). Για την αντιμετώπιση του φαινομένου έχει συγκροτηθεί η οργάνωση IDA, International Dark Sky Association με έντονη δραστηριότητα και θέληση για αντιμετώπιση του φαινομένου



Εικόνα 6-1 Τα είδη της φωτορύπανσης

Η βιομηχανία φωτισμού για να αντιμετωπίσει το φαινόμενο της φωτορύπανσης και να διατηρήσει μια ισορροπία μεταξύ της μείωσης του διαφεύγοντος φωτός και της αποδοτικότητας στο φωτισμό δρόμων δημιούργησε σχέδια φωτιστικών και οπτικών συστημάτων που εξυπηρετούν και τους δυο σκοπούς. Όπως είδαμε σε προηγούμενες ενότητες πλέον υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία φακών για φωτισμό LED και κατηγορίες φωτιστικών αποκοπής και ημι-αποκοπής. Η είσοδος των LED στον φωτισμό δρόμων έχει δώσει την δυνατότητα στην οπτική βιομηχανία για παραγωγή φακών εξατομικευμένους στις εκάστοτε απαιτήσεις.

Τα επίπεδα του διαφεύγοντος φωτισμού έχουν μελετηθεί και χωριστεί σε βαθμίδες στο τεύχος IESNA TM-11 *Lighting Trespass: Research, Results and Recommendations* και στο IESNA RP-33 *Lighting for Exterior Environments*. Τα επίπεδα αυτά έχουν προσδιοριστεί από την IES και προτείνεται η τήρηση τους όπου αυτό είναι δυνατό.

Πριν αναφερθούμε στα ανώτατα επίπεδα διαφεύγοντος φωτισμού ανά κατηγορία περιοχής, ας δούμε τις τέσσερις κατηγορίες περιοχών( περιβαλλοντικές ζώνες) της CIE:

- Ζώνη E1: Πρόκειται για περιοχές με εν γένει σκοτεινό τοπίο. Παραδείγματα είναι τα εθνικά πάρκα, περιοχές εξαιρετικής φυσικής ομορφιάς, περιοχές γύρω από μεγάλα αστρονομικά παρατηρητήρια ή κατοικημένες περιοχές, όπου οι

κάτοικοι και οι αρχές ορίζουν αυστηρούς περιορισμούς για τον διαφεύγων φωτισμό.

- Ζώνη E2: Πρόκειται για περιοχές με μικρή φωτεινότητα και λαμπρότητα. Αυτές είναι ημιαστικές και αγροτικές κατοικημένες περιοχές.
- Ζώνη E3: Πρόκειται για περιοχές μέσης φωτεινότητας, δηλαδή κυρίως για αστικές οικιστικές περιοχές.
- Ζώνη E4: Συνήθως πρόκειται για περιοχές αστικές που έχουν τόσο οικιακούς όσο και εμπορικούς χώρους και παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα νυκτερινής δραστηριότητας

Η IESNA και η ILE ( Institution of Lighting Engineers) παρέχουν όπως αναφέραμε ανώτατες τιμές ανά ζώνη φωτισμού. Οι προτεινόμενες ανώτατες τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα με την τοπική ώρα της περιοχής. Από το σούρουπο μέχρι τις 11μ.μ. και από τις 11μ.μ. μέχρι τις 7π.μ. Παρέχονται συνιστάμενες τιμές για την ουράνια λάμψη, το ανεπιθύμητο φως, και την θάμβωση.

#### Περιορισμός της λάμψης του νυκτερινού ουρανού

Το φαινόμενο του λαμπρού ουρανού εξαρτάται από το ποσοστό του φωτός που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Μπορούμε να περιορίσουμε το φαινόμενο με διάφορους τρόπους. Αρχικά πρέπει να χρησιμοποιούνται φωτιστικά πλήρους αποκοπής για να ελαχιστοποιείται το φως που κινείται στο ουρανό από το ίδιο το φωτιστικό. Ακόμη θα μπορούσαμε γενικά να επίπεδα φωτισμού όπου αυτό είναι εφικτό και να απενεργοποιήσουμε τον ανεπιθύμητο φωτισμό.

Περιορισμό των εξωτερικών διαφημιστικών πινακίδων και γενικότερα θέσπιση ορίων για διαφημιστικό φωτισμό (φώτα πλημμύρας, υπερφωτισμός κ.α.). Ειδικότερα σε χώρους αστρονομικής παρατήρησης που υπάρχει η ανάγκη για σκοτεινό ουρανό, ώστε να δημιουργείται το απαραίτητα κοντράστ , μπορούν να χρησιμοποιηθούν φωτιστικά νατρίου χαμηλής πίεσης, τα οποία έχουν μονοχρωματικό σχεδόν υποκίτρινο φως το οποίο απορροφάται από τα φίλτρα των τηλεσκοπίων.

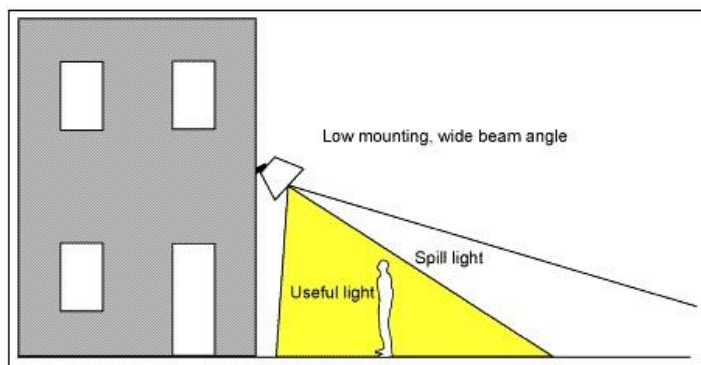
**Table 2. Limits on sky glow for different environmental zones**

Environmental zone	Sky glow ULR* (max %)
E1	0.0
E2	2.5
E3	5.0
E4	15.0

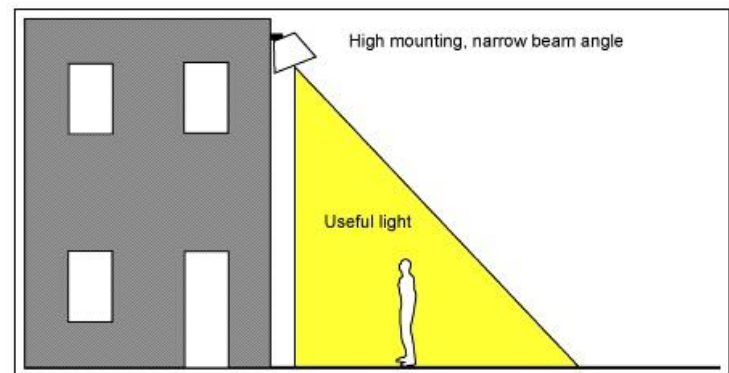
\* ULR is the Upward Light Ratio of the installation and is the maximum permitted percentage of luminaire flux for the total installation that goes directly into the sky.

### Περιορισμός του διαφεύγοντος -ανεπιθύμητου φωτισμού

Ο περιορισμός των αρνητικών επιπτώσεων του φωτισμού γίνεται με το σωστό σχεδιασμό- μελέτη της εγκατάστασης φωτισμού. Κατά την διεξαγωγή της μελέτης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο παρακείμενος χώρος και να χρησιμοποιούνται φωτιστικά που φωτίζουν αποδοτικά το οδόστρωμα χωρίς απώλειες φωτός στα πεζοδρόμια και στις αυλές. Ακόμη όταν γίνεται χρήση φωτιστικών πλημμύρας θα πρέπει να υπάρχει μέριμνα ώστε τα φωτιστικά να φωτίζουν αποκλειστικά τον χώρο χρήσης και όχι να σπαταλούν το φως στην ατμόσφαιρα. Αυτό κυρίως βιτρίνες μαγαζιών που υπερφωτίζονται με τέτοιου είδους φωτιστικά.



Εικόνα 6.3 Flood Light και ανεπιθύμητος φωτισμός λόγω κακής τοποθέτησης



Εικόνα 6.4 Σωστή τοποθέτηση Flood Light περιορισμός ανεπιθύμητου φωτισμού

Πίνακας 6-2 Επίπεδα έντασης φωτισμού ανάλογα με την ώρα

Environmental zone	Light into windows, vertical illuminance (lux)	
	Before curfew	After curfew
E1	2	1*
E2	5	1
E3	10	2
E4	25	5

Source: ILE 2000

\* Acceptable from public road lighting installations only

### Περιορισμός της Θάμβωσης

Οι φωτεινές πηγές παράγουν θάμβωση στο οπτικό πεδίο των ανθρώπων. Το φως διαχέεται στο ανθρώπινο μάτι δημιουργώντας το φαινόμενο της διάχυτης λαμπρότητας (Veiling Luminance). Το επίπεδο αυτής της λαμπρότητας μειώνει την οπτική απόδοση του οφθαλμού. Ένα παράδειγμα των επιπτώσεων της διάχυτης λαμπρότητας (θάμβωσης) είναι ο περιορισμός της οπτικής ικανότητας του οδηγού από την μεγάλη σκάλα φωτισμού των διερχόμενων αυτοκινήτων.

Η αντίληψη της θάμβωσης ποικίλει σε μεγάλο βαθμό και εξαρτάται από τον παρατηρητή. Η IESNA περιγράφει την θάμβωση ως « η αίσθηση που προκαλείται από φωτεινές πηγές , μέσα στο οπτικό πεδίο του ανθρώπου , για την οποία το μάτι δεν είναι προσαρμοσμένο και προκαλείται δυσφορία, ενόχληση ή απώλεια της δυνατότητας όρασης».

Η ένταση του ερεθίσματος της θάμβωσης είναι αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων, όπως το μέγεθος, η θέση, η φωτεινότητα της πηγής και η φωτεινότητα στην οποία τα μάτια του παρατηρητή είναι συνηθισμένα.

Στον οδοφωτισμό η θάμβωση όπως έχει αναλυθεί, μετρείται και έχουν θεσπιστεί αυστηρά όρια. Προκαλείται από την διάταξη των φωτιστικών, την ένταση του φωτισμού δρόμων, την διάχυση φωτός του φωτιστικού με ανύψωση από τις 70° μέχρι τις 90° στο κάθετο επίπεδο που παρατηρείται κ.α.

Η θάμβωση διακρίνεται σε δύο είδη:

- Θάμβωση ανικανότητας διάκρισης: Το επίπεδο της θάμβωσης είναι τόσο μεγάλο που εμποδίζει τον παρατηρητή από το να βλέπει επαρκώς. Ένα

παράδειγμα τέτοιου είδους θάμβωσης είναι η ενόχληση από τα φώτα των διερχόμενων αυτοκινήτων

- Θάμβωση ενόχλησης: Η θάμβωση αυτή μας προκαλεί ενόχληση αλλά όχι απώλεια όρασης. Μπορεί να προκαλέσει δάκρυα και να αυξήσει τον ρυθμό που ανοιγοκλείνουμε τα μάτια μας (blink rate)

Τα δυο είδη θάμβωσης είναι πολύ διαφορετικά φαινόμενα. Το πρώτο εξαρτάται από την ποσότητα του φωτός που πέφτει στο μάτι και την γωνία θέασης. Η θάμβωση ενόχλησης εξαρτάται από την λαμπρότητα. Η θάμβωση ανικανότητας διάκρισης από την ένταση φωτισμού.

Η IESNA αναφέρει πως η φωτεινότητα μιας φωτεινής πηγής είναι ο λόγος για τον οποίο οι άνθρωποι διαμαρτύρονται σε εγκαταστάσεις φωτισμού εξωτερικών χώρων. Ο ανεπιθύμητος φωτισμός έχει λιγότερα αρνητικά αποτελέσματα.

Έχουν θεσπιστεί όρια για την ένταση φωτισμού ανά περιβαλλοντική ζώνη τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

*Πίνακας 6-3 Περιορισμός φωτεινής έντασης φωτεινών πηγών ανά περιοχή.*

Environmental zone	Source intensity (kilocandela)	
	Before curfew	After curfew
E1	0	0.0
E2	20	0.5
E3	30	1.0
E4	30	2.5

## 6.2 Φωτορύπανση και ενεργειακές απώλειες.

Η ενέργεια που καταναλώνεται στον εξωτερικό φωτισμό δεν είναι με ακρίβεια γνωστή. Ο οδικός φωτισμός εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει περίπου το 1% της συνολικής φωτεινής ενέργειας. Ο εξωτερικός φωτισμός για τα σπίτια, το εμπόριο, τη βιομηχανία και τις υπόλοιπες παρόμοιες χρήσεις, δαπανά ένα άγνωστο ποσό

ενέργειας. Ακόμη μεγαλύτερη απροσδιοριστία υπάρχει όσον αφορά τις απώλειες της φωτεινής ενέργειας.

Οι απώλειες αυτές σχετίζονται μάλιστα με τον πληθυσμό, το κλίμα, το οικονομικό περιβάλλον, τις συνήθειες, την τεχνολογία των φωτιστικών κ.α. Κάθε μη χρήσιμο φως είναι απώλεια. Το ανεπιθύμητο φως και το φαινόμενο της λάμψης του ουρανού των πόλεων είναι μεγάλες απώλειες ενέργειας εκτός από ενοχλητικά για τον άνθρωπο φαινόμενα. Στις ΗΠΑ το διασκορπιζόμενο με αυτό τον τρόπο φως, αντιστοιχεί σύμφωνα με κάποιες εκτιμήσεις, στο 30% της ηλεκτρικής ενέργειας που προορίζεται για τον εξωτερικό φωτισμό.

Η τεχνολογία των δορυφορικών επισκοπήσεων μπορεί να δώσει μια

εκτίμηση των απωλειών ενέργειας λόγω των φαινομένων της φωτορύπανσης. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται στο τμήμα της φωτεινής ενέργειας που συλλαμβάνεται από τους δορυφόρους. Ενεργειακή απώλεια όμως, δεν είναι μόνο αυτό που καταλήγει στον ουρανό. Στις συνολικές απώλειες θα πρέπει να προσθέσουμε την ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα στα φωτιστικά, και γενικότερα την φωτεινή ενέργεια που χάνεται αλλά δεν έχει την δυνατότητα να καταγραφεί από τους δορυφόρους.

Πόλη	Ετήσιες ενεργειακές απώλειες φωτισμού (X 10 <sup>9</sup> kWh)	Μέση ισχύς απαισιών / επιφάνεια (X 10 <sup>3</sup> kW/km <sup>2</sup> )
Μόντρεαλ	139	34,41
Αμστερνταμ	6,43	17,52
Νέα Υόρκη	136	14,95
Πόλη του Μεξικού	63,0	13,86
Κάιρο	27,0	13,72
Ουάσιγκτον	41,8	13,54
Χονγκ Κονγκ	12,6	11,26
Λονδίνο	36,0	11,21
Βρυξέλλες	5,78	10,78
Παρίσι	48,4	10,71
Δαμασκός	2,98	9,31
Μπουένος Αϊρες	56,8	8,61
Αθήνα	14,9	8,11
Βουδαπέστη	9,44	7,09
Δελχί (Ινδία)	26,8	5,73
Θεσσαλονίκη	4,0	5,63
Μπανγκόκ (Ταϊλάνδη)	30,9	5,41
Σαντιάγο	17,3	5,29
Σγκαπούρη	17,1	5,24
Ρίο ντε Τζανέιρο	47,1	4,44
Μανίλα (Φιλιππίνες)	8,87	3,90
Βαγδάτη	5,62	3,72
Γουατεμάλα	4,33	3,66
Βόλος	0,749	3,57
Σιζνεί	15,0	3,48
Κουάλα Λαμπούρ (Μαλαισία)	13,7	3,17
Αγκυρα	5,96	3,12
Λάρισα	0,674	3,08
Αθήνα	2,16	3,06
Λαμία	0,393	2,66
Ηράκλειο	0,637	2,33

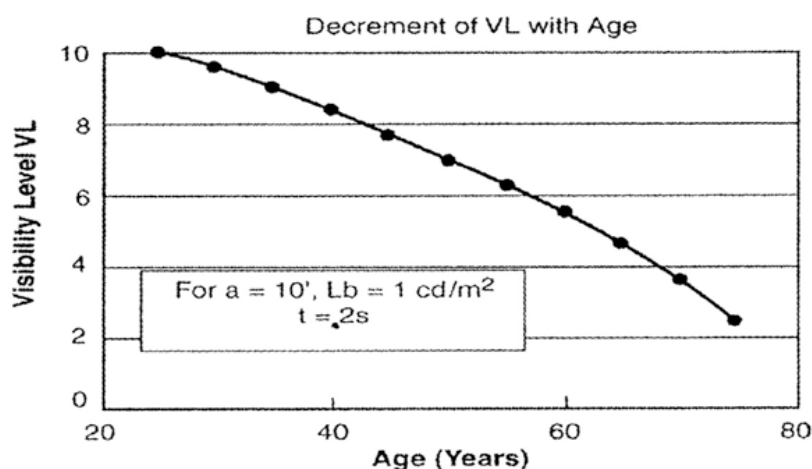
Πίνακας 6-4 Ετήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω φωτορύπανσης σε διάφορες πόλεις ανά τον κόσμο

Η εκτιμώμενη απώλεια ενέργειας, που προκύπτει από την μελέτη και επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων είναι της τάξης του 0,2%. Στην περίπτωση της Αθήνας οι απώλειες του νυκτερινού φωτισμού αντιστοιχούν στο 0,13% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας.

## 2.Φωτισμός και γήρανση του ανθρώπινου οφθαλμού

Όσο ο άνθρωπος μεγαλώνει σε ηλικία γίνεται πιο επιρρεπής στην θάμβωση. Ασθένειες όπως το γλαύκωμα μπορούν να μειώσουν τα επίπεδα της περιφερειακής όρασης ενός ανθρώπου. Αυτά τα στοιχεία είναι πολύ σημαντικά, και πρέπει να λαμβάνονται πλέον υπόψη αφού το προσδόκιμο ζωής αυξάνεται και ο πληθυσμός αποκτά μεγαλύτερο μέσο όρο ηλικίας.

Όσο μεγαλώνουμε τα μάτια μας χάνουν σημαντικά την ικανότητα να ρυθμίζουν το άνοιγμα της κόρης ανάλογα με το επίπεδο φωτισμού. Η κόρη του ματιού γίνεται μικρότερη ακόμη και με φωτισμό ημέρας, αλλά το σημαντικότερο είναι η αδυναμία να προσαρμοστεί στις συνθήκες φωτισμού κατά τις νυκτερινές ώρες.

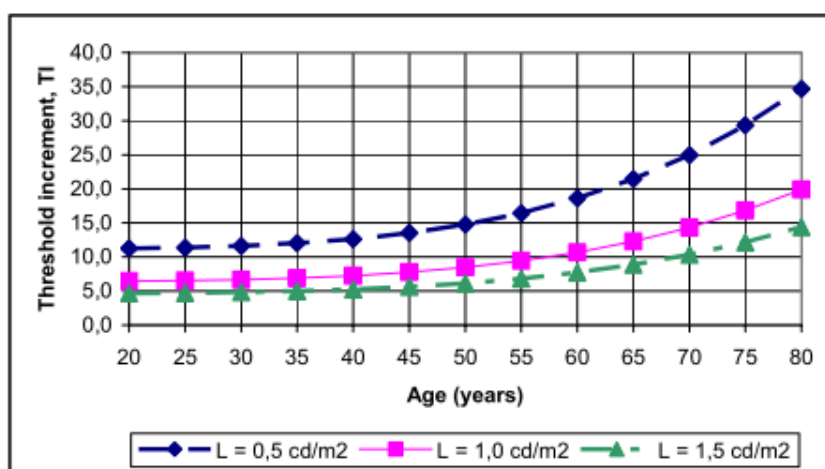


Εικόνα 6-2 Συσχέτιση της ικανότητας όρασης με την ηλικία

Ένας καθοριστικός παράγοντας στην οδήγηση, είναι η ικανότητα περιφερειακής όρασης. Έρευνες έχουν δείξει πως η ικανότητα να αντιληφθούμε την κίνηση ενός αντικείμενου 40 με 80 μοίρες από την γραμμή όρασης μειώνεται κατά 60% μετά την ηλικία των 60. Ακόμη ένας άνθρωπος 85 χρονών μπορεί να χρειαστεί μέχρι και 30 λεπτά για να προσαρμοστεί στο επίπεδο του φωτισμού των δρόμων, όταν προέρχεται από συνθήκες εσωτερικού φωτισμού.



Είναι πιθανό τα επόμενα χρόνια, όπου ο αριθμός των μεγαλύτερων σε ηλικία οδηγών να αυξηθεί, να χρειαστεί αναθεώρηση του επιπέδου λαμπρότητας των δρόμων προς τα πάνω και του συντελεστή θάμβωσης προς τα κάτω. Οι οδηγοί μεγάλης ηλικίας είναι ευαίσθητοι στην θάμβωση. Στο επίπεδο φωτισμού των  $0,5 \text{ cd/m}^2$  ένας οδηγός 65 χρονών χρειάζεται 10 % περισσότερη αντίθεση για να δει ένα αντικείμενο στο δρόμο.



Εικόνα 6-3 Η θάμβωση, τα επίπεδα λαμπρότητας του οδοστρώματος και η ηλικία

Από το γράφημα συμπεραίνουμε πως με την αύξηση της ηλικίας το επίπεδο της θάμβωσης που αντιλαμβάνεται ένας οδηγός μεγαλώνει. Αυτήν την στιγμή δεν υπάρχει κάποια οδηγία για προσαρμογή των ορίων με την ηλικία. Τα επόμενα χρόνια όμως, ένας σχεδιαστής φωτιστικού συστήματος δρόμου, θα πρέπει να το λάβει υπόψη όπως υποστηρίζουν οι ειδικοί. Ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι η μείωση του ποσοστού της θάμβωσης ή η αύξηση του επιπέδου λαμπρότητας των δρόμων.

### 6.3 Φωτισμός δρόμων και ζωντανό οργανισμό

Ο φωτισμός δεν επηρεάζει μόνο τον άνθρωπο, αλλά και τα ζώα. Ειδικότερα εάν σκεφτεί κανείς πως η μεγαλύτερη περίοδος δραστηριοποίησης των ζώων είναι το βράδυ. Σχεδόν όλα τα μικρά τρωκτικά και τα σαρκοφάγα, το 80% των μαρσιποφόρων και το 20% όλων των πρωτευόντων δραστηριοποιούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου το βράδυ. Ο φωτισμός σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές με ύπαρξη ζώων, θα πρέπει να είναι περιορισμένος, ακριβής και μελετημένος, και με όσο το δυνατόν μικρότερη φωτεινότητα.

Ένα παράδειγμα της επίδρασης του εξωτερικού φωτισμού στην ζωή των ζώων, είναι η νοτιοανατολικές ακτές των ΗΠΑ, όπου οι θαλάσσιες χελώνες εναποθέτουν τα αυγά τους. Τα νεογνά είναι από την φύση τους προγραμματισμένα να αναζητούν ανακλάσεις του φεγγαριού και των άστρων για να βρουν το δρόμο από τις ακτές στην θάλασσα. Όμως οι φωτισμένοι δρόμοι και γενικά η φωτορύπανση τα οδηγεί μακριά από την θάλασσα, προς τις λεωφόρους.

Σ αυτήν την περιοχή θα πρέπει επομένως να θεσπιστούν κανονισμοί για την χρήση του φωτισμού. Η χρήση φωτιστικών πλήρους αποκοπής στους δρόμους, ο περιορισμός του εξωτερικού φωτισμού, και ο έλεγχος του μπορούν να συμβάλλουν θετικά στο φαινόμενο.

Τα φυτά έχουν αναπτύξει ένα μεγάλο εύρος από φωτουποδοχείς, οι οποίοι αντιλαμβάνονται και ενεργοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα ακτινοβολίας. Παρόλο που δεν υπάρχει κάποια σοβαρή ερευνητική κινητοποίηση για την μελέτη της επίδρασης του τεχνητού φωτισμού στα φυτά, είναι σίγουρο πως και αυτά επηρεάζονται σε κάποιο βαθμό.

## 7 Μεσοπικός σχεδιασμός και φάσμα εκπομπής ακτινοβολίας φωτεινής πηγής

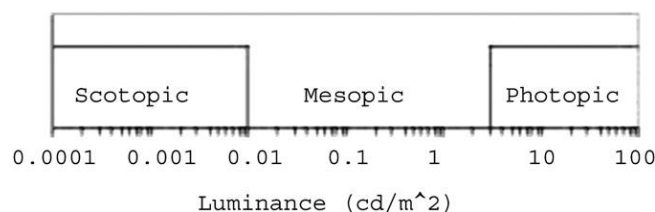
### 7.1 Μεσοπική φωτομετρία.

Όπως έχει αναλυθεί στην εισαγωγή ο ανθρώπινος οφθαλμός αντιλαμβάνεται μόνο ένα περιορισμένο φάσμα από την ακτινοβολία που δέχεται, το λεγόμενο ορατό φάσμα ακτινοβολίας. Το ανθρώπινο μάτι όμως, ακόμα και μέσα στο φάσμα λειτουργίας του, δεν είναι το ίδιο ευαίσθητο σε όλα τα μήκη κύματος. Η ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού στα διάφορα μήκη κύματος ακτινοβολίας περιγράφεται από την σχετική συνάρτηση φασματικής ευαισθησίας.

Το 1924 η διεθνής επιτροπή φωτισμού CIE εισήγαγε την έννοια της συνάρτησης φασματικής απόδοσης φωτοπικής όρασης,  $V(\lambda)$ . Η συνάρτηση αυτή βασίζεται στην ευαισθησία των κωνίων. Η φωτοπική ευαισθησία  $V(\lambda)$  περιορίζεται από τα 360 μέχρι τα 830nm, έχοντας κανονικοποιηθεί στην μονάδα στα 555nm.

Η συνάρτηση σκοτοπικής ευαισθησίας  $V'(\lambda)$ , βασίζεται στην λειτουργία των ραβδίων του οφθαλμού. Εισάχθηκε το 1951 από την CIE και έχει την μέγιστη τιμή της στα 507nm.

Η μεσοπική όραση σχετίζεται με τα επίπεδα φωτισμού μεταξύ της φωτοπικής και της σκοτοπικής όρασης. Κατά την λειτουργία της μεσοπικής όρασης, βρίσκονται σε λειτουργία και τα κωνία και τα ραβδία. Η συνάρτηση μεσοπικής ευαισθησίας, δεν παίρνει συνεχείς τιμές στο ορατό φάσμα, αλλά εξαρτάται από το επίπεδο φωτισμού και από την γωνία θέασης. Αυτό οφείλεται στην κατανομή των φωτοανιχνευτών στον αμφιβληστροειδή του οφθαλμού.



Εικόνα 7-1 Όρια λαμπρότητας για τα τρία είδη όρασης του ανθρώπινου οφθαλμού

Μόλις πρόσφατα η διεθνής επιτροπή φωτισμού [CIE 2010], καθόρισε την συνάρτηση μεσοπικής ευαισθησίας. Η συνάρτηση μεσοπικής ευαισθησίας  $V_{mes}(\lambda)$  είναι ο γραμμικός συνδυασμός της φωτοπικής και σκοτοπικής συνάρτησης ευαισθησίας. Τα

όρια λειτουργίας της μεσοπικής όρασης βασίζονται στο επίπεδο λαμπρότητας και είναι :

$$0.005 \text{ cd/m}^2 < L < 5 \text{ cd/m}^2$$

Το μεσοπικό σύστημα είναι της μορφής:

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda) \quad \mu\epsilon \quad 0 \leq m \leq 1$$

όπου  $M(m)$  είναι συνάρτηση κανονικοποίησης τέτοια ώστε η  $V_{mes}(\lambda)$  να παίρνει μέγιστη τιμή το 1, και το  $m$  συντελεστής που εξαρτάται από την λαμπρότητα και το φάσμα ακτινοβολίας.

Ο συντελεστής  $m$  και η μεσοπική λαμπρότητα  $L_{mes}$  μπορούν να υπολογιστούν από το παρακάτω επαναληπτικό σύστημα:

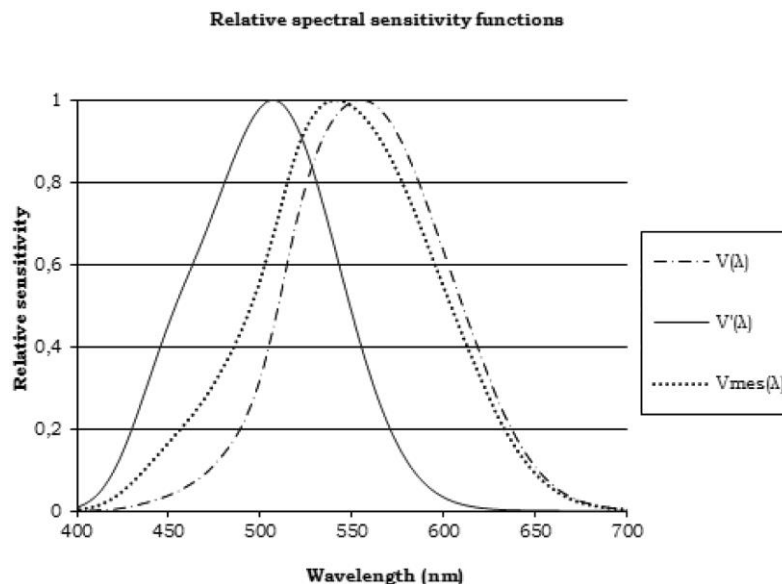
$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_p + (1 - m_{(n-1)})L_s V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)})V'(\lambda_0)}$$

$$m_n = a + b \log(L_{mes,n}) \quad \mu\epsilon \quad 0 \leq m_n \leq 1$$

όπου  $L_p$  είναι η φωτοπική λαμπρότητα,  $L_s$  η σκοτοπική λαμπρότητα. Επιπρόσθετα η σταθερά  $V'(\lambda_0)$  έχει τιμή  $V'(\lambda_0) = 683/1699$ , όπου είναι η τιμή στην οποία  $V(\lambda) = 1$ . Οι παράμετροι  $a$ ,  $b$  έχουν τιμές 0,7670 και 0,3334 αντίστοιχα.

Για τον απλούστερο υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας απαιτούνται, η αντίστοιχη φωτοπική λαμπρότητα και ο δείκτης S/P της φωτεινής πηγής που χρησιμοποιείται.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τρεις συναρτήσεις ευαισθησίας της ανθρώπινης όρασης. Οι συναρτήσεις αυτές προκύπτουν για δοσμένες τιμές της φωτοπικής λαμπρότητας και για δοσμένη φωτεινή πηγή, δείκτης S/P.



Εικόνα 7-2 Συναρτήσεις ευαισθησίας φωτοπικής  $V(\lambda)$ , σκοτοπικής  $V'(\lambda)$  και μεσοπικής  $V_{mes}$  για δοσμένες τιμές  $L_p=0,75$  και δείκτης  $S/P=2$

## 7.2 Συντελεστής S/P (S/P ratio)

Ο δείκτης αναλογίας της σκοτοπικής/φωτοπικής ακτινοβολίας μιας φωτεινής πηγής, είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής μιας πηγής φωτός ως προς την φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας  $V(\lambda)$ , προς την φωτεινή ροή ως προς την σκοτοπική συνάρτηση ευαισθησίας  $V'(\lambda)$ . Φωτεινές πηγές με μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας τους στα χαμηλά μήκη κύματος θα έχουν μεγαλύτερους δείκτες S/P. Συγκεκριμένα ο δείκτης S/P ορίζεται ως:

$$R_{sp} \text{ ή } S/P = \frac{\Phi_s}{\Phi_p} = \frac{K'_m \int_0^\infty P_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^\infty P_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}$$

όπου  $K_m = 683 \text{ lm/W}$  και  $K'_m = 1699 \text{ lm/W}$ , και  $P_{e,\lambda}$  η ισχύς (W) που εκπέμπει η φωτεινή πηγή σε συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda$ .

Στον πίνακα που ακολουθεί απεικονίζονται οι διάφορες τιμές μεσοπικής λαμπρότητας

Πίνακας 7-1  $L_{mes}$  με βάση το μοντέλο MOVE ( *Mesopic Optimization of Visual Efficiency* )

S/P	0.01	0.03	0.1	0.3	1	3	10
0.25	0.0025	0.0075	0.0640	0.2331	0.8735	2.8108	9.9095
0.35	0.0035	0.0133	0.0698	0.2430	0.8914	2.8372	9.9220
0.45	0.0045	0.0172	0.0751	0.2525	0.9090	2.8632	9.9344
0.55	0.0055	0.0201	0.0801	0.2616	0.9262	2.8888	9.9466
0.65	0.0065	0.0226	0.0848	0.2706	0.9431	2.9141	9.9587
0.75	0.0075	0.0249	0.0894	0.2792	0.9597	2.9391	9.9706
0.85	0.0085	0.0270	0.0937	0.2877	0.9760	2.9637	9.9825
0.95	0.0095	0.0290	0.0979	0.2959	0.9921	2.9880	9.9942
1.05	0.0105	0.0309	0.1020	0.3040	1.0079	3.0120	10.0058
1.15	0.0114	0.0328	0.1060	0.3119	1.0234	3.0356	10.0173
1.25	0.0122	0.0345	0.1099	0.3197	1.0387	3.0590	10.0286
1.35	0.0130	0.0362	0.1136	0.3273	1.0538	3.0822	10.0399
1.45	0.0138	0.0378	0.1173	0.3348	1.0686	3.1050	10.0510
1.55	0.0146	0.0394	0.1209	0.3421	1.0833	3.1276	10.0621
1.65	0.0153	0.0410	0.1245	0.3493	1.0978	3.1499	10.0730
1.75	0.0160	0.0425	0.1280	0.3565	1.1121	3.1720	10.0838
1.85	0.0167	0.0440	0.1314	0.3635	1.1262	3.1939	10.0945
1.95	0.0174	0.0455	0.1348	0.3704	1.1401	3.2155	10.1051
2.05	0.0180	0.0469	0.1381	0.3772	1.1539	3.2368	10.1156
2.15	0.0187	0.0483	0.1413	0.3840	1.1675	3.2580	10.1260
2.25	0.0193	0.0497	0.1445	0.3906	1.1810	3.2789	10.1363
2.35	0.0199	0.0511	0.1477	0.3972	1.1943	3.2997	10.1466
2.45	0.0205	0.0524	0.1509	0.4037	1.2075	3.3202	10.1567
2.55	0.0211	0.0538	0.1539	0.4101	1.2205	3.3405	10.1667
2.65	0.0217	0.0551	0.1570	0.4165	1.2334	3.3606	10.1766
2.75	0.0223	0.0564	0.1600	0.4228	1.2462	3.3806	10.1865

συναρτήσει των δεικτών S/P και της φωτοπικής λαμπρότητας. Ουσιαστικά πρόκειται για τον πίνακα τιμών της μεσοπικής λαμπρότητας.

Για παράδειγμα ένας λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης έχει δείκτη γύρω στο 0.6, ένας λαμπτήρας αλογονιδίων μετάλλων έχει S/P δείκτη 1.4 και ένας λαμπτήρας LED γύρω στο 2.0. Αντίστοιχα προκύπτουν και οι μεσοπικές λαμπρότητες (0.93, 1.06, 1.15)  $cd/m^2$  με δοσμένη τιμή φωτοπικής λαμπρότητας  $1 cd/m^2$ .

Πίνακας 7-2 Τιμές S/P για διάφορους τύπους λαμπτήρων

Low pressure sodium	0.25
High pressure sodium (HPS) 250 W clear	0.63
HPS 400 W clear	0.66
HPS 400 W coated	0.66
Mercury vapor (MV) 175 W coated	1.08
MV 400 W clear	1.33
Incandescent	1.36
Halogen headlamp	1.43
Fluorescent Cool White	1.48
Metal halide (MH) 400 W coated	1.49
MH 175 W clear	1.51
MH 400 W clear	1.57
MH headlamp	1.61
Fluorescent 5000 K	1.97
White LED <sup>1</sup> 4300 K	2.04
Fluorescent 6500 K	2.19

Να σημειωθεί πως για να γίνει αντιληπτή καλύτερα η έννοια του δείκτη S/P, μπορούμε να την συνδέσουμε με την θερμοκρασία χρώματος μιας φωτεινής πηγής, όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο πιο υψηλός είναι ο δείκτης S/P. Αυτό συμβαίνει διότι, όσο πιο υψηλή η θερμοκρασία CCT τόσο πιο αριστερά μετατοπισμένο είναι το φάσμα εκπομπής του, δηλαδή προς το πεδίο της σκοτοπικής όρασης.

### **7.3 Θερμοκρασία χρώματος-ενοποιημένη φωτομετρία και οδικός φωτισμός, θετικές επιδράσεις**

Ο σκοπός των εγκαταστάσεων φωτισμού δρόμων είναι να καταστήσουν ανθρώπους, αυτοκίνητα και αντικείμενα ορατούς σε ένα οδηγό, μεγιστοποιώντας έτσι την ασφάλεια των δρόμων. Το ευρωπαϊκό πρότυπο για τον οδοφωτισμό EN 13201 παρέχει συνιστάμενες, ανά κατηγορία δρόμου, τιμές για την ένταση φωτισμού και την λαμπρότητα στο οδόστρωμα.

Το εύρος των προτεινόμενων από το πρότυπο τιμών κυμαίνεται από 0.3 έως 2.0  $cd/m^2$ . Εύκολα διαπιστώνουμε πως οι τιμές αυτές εμπεριέχονται στο μεσοπικό εύρος λαμπρότητας. Όλες οι τιμές λαμπρότητας όμως του προτύπου είναι καθορισμένες από την φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας, δηλαδή με άλλα λόγια πρόκειται για τιμές φωτοπικής λαμπρότητας.

Τα τελευταία χρόνια με την σταδιακή είσοδο των φωτιστικών LED στην παγκόσμια αγορά φωτισμού, έχει ανοίξει ένα πεδίο επιστημονικής συζήτησης για το εάν το σύστημα φωτομετρίας θα πρέπει να τροποποιηθεί, λαμβάνοντας υπόψη και τα πιο μετατοπισμένα προς τα αριστερά μήκη κυμάτων που ακτινοβολούνται από τα λευκά LED.

Οι υποστηρικτές της *ενοποιημένης φωτομετρίας (ουσιαστικά τη χρήση της μεσοπικής λαμπρότητας)*, θεωρούν πως σε κάποιες εφαρμογές οι φωτεινές πηγές με πιο μεγάλη θερμοκρασία χρώματος βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση των φωτιστικών, εάν εξεταστούν υπό το πρίσμα της  $V_{mes}(\lambda)$ , δηλαδή της μεσοπικής συνάρτησης ευαισθησίας. Επίσης πολλές έρευνες αναδεικνύουν πως οι φωτεινές πηγές με μεγαλύτερο δείκτη S/P είναι, στην μεσοπική περιοχή όρασης, πιο αποτελεσματικές στην αύξηση της ορατότητας των οδηγών.

Από την άλλη μεριά υπάρχουν πολλοί πολέμιοι της χρήσης υψηλών θερμοκρασιών χρώματος, διότι υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, αλλά και επειδή αποτελούν σημαντικό παράγοντα φωτορύπανσης για ορισμένες περιοχές αστρικής παρατήρησης.

### **7.3.1 Ενοποιημένη φωτομετρία**

Σκοπός της πρότασης για ένα σύστημα ενοποιημένης φωτομετρίας είναι, να επιτρέψει την αύξηση της φωτεινής ροής μιας οποιασδήποτε φωτεινής πηγής (δηλαδή κάθε είδος φασματικής εκπομπής) σε κάθε επίπεδο φωτισμού. Η αφορμή για την πρόταση υιοθέτησης της ενοποιημένης φωτομετρίας στάθηκε σε ψυχοσωματικές έρευνες που έδειξαν ότι η οπτική απόδοση του ανθρώπου αυξάνεται κάτω από πιο ψυχρές αποχρώσεις φωτισμού( δηλαδή μεγαλύτερες θερμοκρασίες χρώματος).

Το τρέχων σύστημα φωτομετρίας βασίζεται όπως είδαμε σε δυο κύριες καμπύλες ευαισθησίας, την φωτοπική και την σκοτοπική. Στις περισσότερες εφαρμογές οδοφωτισμού το επίπεδο της λαμπρότητας είναι αμιγώς στο μεσοπικό εύρος, στο

οποίο είναι ενεργοποιημένα και τα κωνία και τα ραβδία. Έτσι υπάρχει ασάφεια για το ποια είναι η κατάλληλη καμπύλη ευαισθησίας,  $V(\lambda)$ ,  $V'(\lambda)$  και  $V_{mes}(\lambda)$  για χρήση σε εφαρμογές όπου δεν είναι ξεκάθαρο πως λειτουργεί ο ανθρώπινος οφθαλμός(transient condition).

Το ινστιτούτο Lighting Research Center, LRC έχει προτείνει τα όρια για τα οποία μπορεί να γίνει χρήση της ενοποιημένης θεωρίας της φωτομετρίας.

$$0.001 \text{ cd/m}^2 \leq L_p \leq 0.6 \text{ cd/m}^2$$

Παρατηρούμε πως το επίπεδο λαμπρότητας είναι κατά πολύ μικρότερο από το εύρος της μεσοπικής όρασης το οποίο είναι όπως είδαμε [CIE 2010]

$$0.005 \text{ cd/m}^2 < L_p < 5 \text{ cd/m}^2$$

Αξίζει να τονιστεί πως ο καθορισμός των ορίων είναι πολύ υποκειμενικός και βασίζεται καθαρά στην αντίληψη του κάθε ανθρώπου για το φως. Κάθε άνθρωπος αντιλαμβάνεται διαφορετικά το επίπεδο φωτισμού και τα χρώματα γύρω του και οι υποδείξεις βασίζονται πάνω σε πειραματικές παρατηρήσεις. Το συγκεκριμένο θέμα μελετάται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα και οι εξελίξεις είναι συνεχείς.

Εκτός του πίνακα 1, υπάρχει και αλγεβρικός τρόπος υπολογισμού της ενοποιημένης ή μεσοπικής λαμπρότητας ο οποίος ορίζει:

$$L_{mes,un} = 0.834L_p - 0.335L_s - 0.2 + \sqrt{0.696L_p^2 - 0.333L_p - 0.56L_pL_s + 0.113L_s^2 + 0.537L_s + 0.04}$$

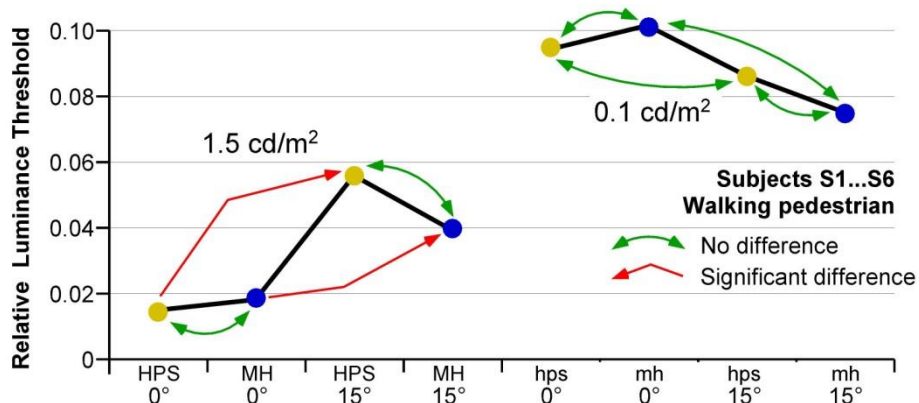
$$\text{με } L_s = (S/p)L_p \text{ και } 0.001 \text{ cd/m}^2 \leq L_p \leq 0.6 \text{ cd/m}^2$$

### 7.3.2 Δείκτης S/P και οπτική οξύτητα ανθρώπινου οφθαλμού

Η υψηλή θερμοκρασία χρώματος μιας φωτεινής πηγής, υπό μεσοπικές συνθήκες, έχει βρεθεί σε διάφορες μετρήσεις που έχουν γίνει ότι βελτιώνει την οπτική οξύτητα της περιφερειακής όρασης του ανθρώπινου οφθαλμού. Αξίζει να σημειωθεί πως αυτό όμως εξαρτάται άμεσα από τα επίπεδα λαμπρότητας που βρίσκεται το ανθρώπινο μάτι.

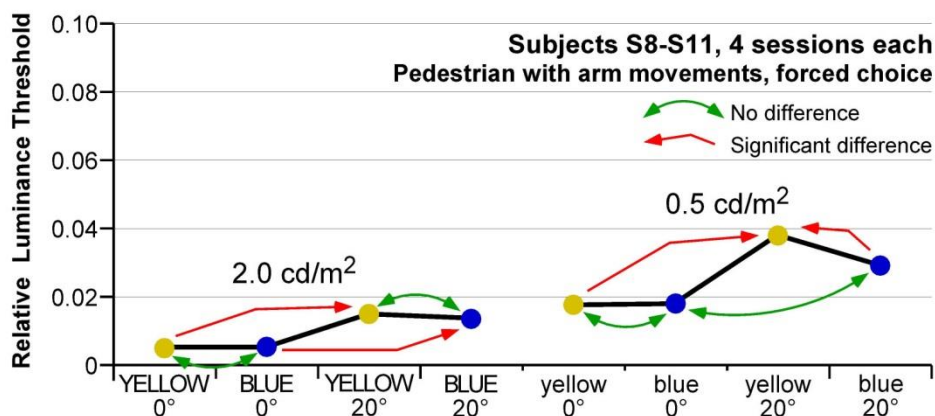


Σε χαμηλά επίπεδα λαμπρότητας η θερμοκρασία χρώματος βελτιώνει την απόδοση της περιφερειακής όρασης. Παρατηρήθηκε όμως ότι δεν ισχύει το ίδιο για την κεντρική όραση, η απόδοση της οποίας δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις με βάση το φάσμα εκπομπής SPD ( Spectral Power Distribution). Έτσι γίνεται φανερό πως η συνάρτηση ευαισθησίας  $V(\lambda)$  είναι ικανή να περιγράψει την λειτουργία της κεντρικής όρασης του οφθαλμού ακόμα και υπό μεσοπικές συνθήκες.



Εικόνα 7-3 Διάκριση πεζού σε δυο επίπεδα λαμπρότητας και με δυο διαφορετικές πηγές φωτός, μια θερμή (κίτρινη) και μια ψυχρή (μπλε)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-3 η οποία αναπαριστά το μέσο σχετικό κατώφλι λαμπρότητας σε 2 διαφορετικές καταστάσεις φωτισμού, η λαμπρότητα παίζει σημαντικό ρόλο στην ευεργετική επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών χρώματος στην οπτική οξύτητα. Στο επίπεδο φωτισμού της  $1.5 \text{ cd/m}^2$  η ορατότητα είναι σαφώς καλύτερη στην κεντρική όραση παρά στην περιφερειακή, παρόλο που βλέπουμε ότι το κατώφλι μειώνεται με την χρήση MH με S/P 1.61. Στο επίπεδο φωτισμού όμως των  $0.1 \text{ cd/m}^2$  οι διαφορές μεταξύ της περιφερειακής και κεντρικής όρασης είναι πολύ μικρές, πρακτικά αμελητέες.

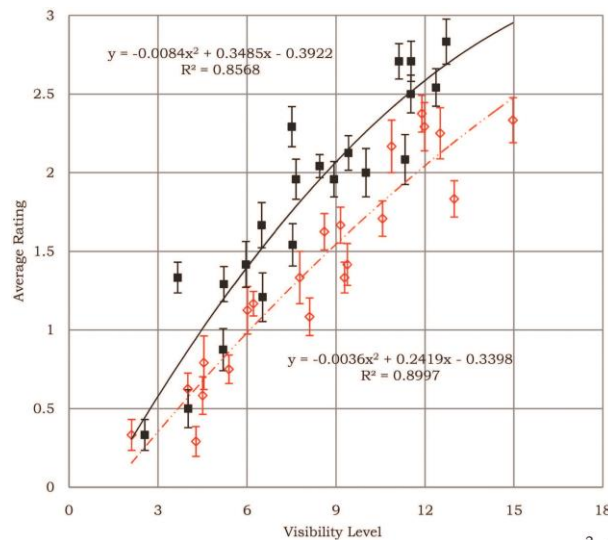


Εικόνα 7-4 Κεντρική/ περιφερειακή όραση σε διαφορετικά επίπεδα λαμπρότητας και διαφορετικές φωτεινές πηγές.

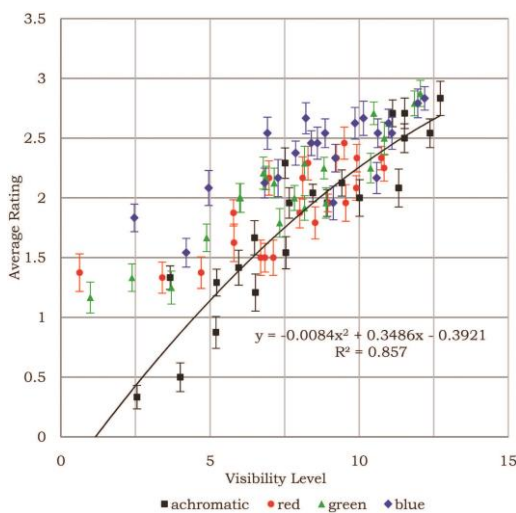
Στην Εικόνα 7-4 στο επίπεδο των  $0.5\text{cd}/\text{m}^2$  έχουμε σαφείς ενδείξεις ότι οι φωτεινές πηγές με υψηλούς δείκτες S/P , βελτιώνουν την οξύτητα της περιφερειακής όρασης σε σχέση με φωτεινές πηγές με χαμηλότερο δείκτη.

Συμπερασματικά, στα μεσαία-μεσοπικά επίπεδα φωτισμού η φασματική ευαισθησία της περιφερειακής όρασης δεν μπορεί να περιγραφεί αποκλειστικά από την φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας.

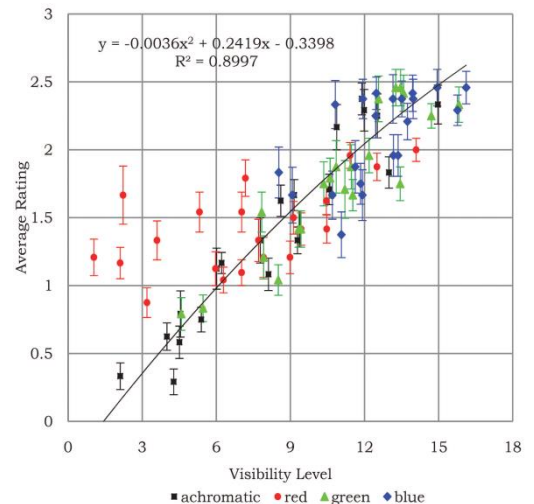
Σε μια ακόμη έρευνα αξιολογήθηκαν δυο φωτεινές πηγές με ακόμα πιο διαφορετικά φάσματα ακτινοβολίας( HPS S/P=0.6 και LED S/P=2.08) και τα αποτελέσματα οδήγησαν στην διαπίστωση ότι οι φωτεινές πηγές με μεγαλύτερο δείκτη S/P βελτιώνουν την αναγνώριση αχρωματικών και χρωματισμένων στόχων. Η ενδιαφέρουσα παράμετρος είναι ότι η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο υψηλής μεσοπικής λαμπρότητας  $2\text{cd}/\text{m}^2$  . Τα αποτελέσματα της σχετικής έρευνας φαίνονται στο διάγραμμα



Διάγραμμα 7.1 Απόδοση LED vs HPS για αναγνώριση αχρωματικών στόχων σε επίπεδο λαμπρότητας  $2\text{cd}/\text{m}^2$



Διάγραμμα 7.3 Απόδοση LED για αναγνώριση μικτών χρωματικά στόχων σε επίπεδο λαμπρότητας  $2\text{cd}/\text{m}^2$



Διάγραμμα 7.2 Απόδοση HPS για αναγνώριση μικτών χρωματικά στόχων σε επίπεδο λαμπρότητας  $2\text{cd}/\text{m}^2$

Παρόλο που τα αποτελέσματα δείχνουν σαφείς ενδείξεις βελτιωμένης οπτικής απόδοσης σε μεσοπικές συνθήκες φωτισμού, δεν μπορούν να βγουν σίγουρα συμπεράσματα διότι πρέπει να πραγματοποιηθούν πιο πολλές δοκιμασίες, ώστε να καταλήξουμε σε σαφή και σωστά συμπεράσματα.

### **7.3.3 Θερμοκρασία χρώματος- Μεσοπική σχεδίαση και εξοικονόμηση ενέργειας.**

Η μέτρηση όλων των απαιτούμενων επιπέδων λαμπρότητας για τα πρότυπα φωτισμού δρόμων γίνεται με βάση την φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού. Όταν μιλάμε για  $L=0.75 \text{ cd}/\text{m}^2$ , εννοούμε την φωτοπική τιμή της λαμπρότητας δηλαδή την  $L_p$ . Στις προηγούμενες παραγράφους αναλύσαμε τι είναι η μεσοπική όραση και από τι εξαρτάται και πως αυτή η ιδιότητα του ανθρώπινου οφθαλμού μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση των LED, ως οι φωτεινές πηγές με τον μεγαλύτερο δείκτη S/P από τις υπάρχουσες τεχνολογίες στα φωτιστικά δρόμου.

Σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Φιλανδία για την εξοικονόμηση ενέργειας με πιθανή αλλαγή των HPS φωτιστικών με νέας τεχνολογίας LED προέκυψε πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση της ενοποιημένης θεωρίας της λαμπρότητας και λογισμικού προσομοιώσεων. Έτσι, τα LED έχοντας μεγαλύτερο εύρος της φασματικής ισχύος τους σε μικρά μήκη κύματος μπορούν να αποδώσουν καλύτερα με χρήση της μεσοπικής συνάρτησης ευαισθησίας  $V_{mes}$ . Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά φωτιστικά LED με διαφορετική θερμοκρασία χρώματος το καθένα, διαφορετικούς δηλαδή δείκτες S/P.

*Πίνακας 7-3 Τα φωτιστικά LED που χρησιμοποιήθηκαν, οι θερμοκρασίες χρώματος τους και οι δείκτες S/P*

Φωτιστικό	CCT (K)	S/P
Φωτιστικό HPS	1750	0.56
Φωτιστικό LED A	3470	1.39
Φωτιστικό LED B	3220	1.16
Φωτιστικό LED C	6660	2.18
Φωτιστικό LED D	6150	1.93

Πίνακας 7-4 Εξοικονόμηση ενέργειας με χρήση μεσοπικής φωτομετρίας

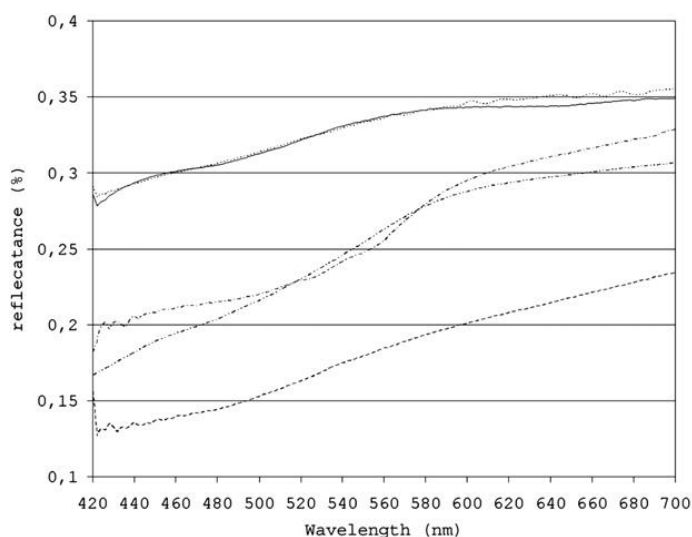
	Full power			Reduced power			Reduced power mesopic		
	P [%]	$L_p$ [cd/m <sup>2</sup> ]	$L_{mes}$ [cd/m <sup>2</sup> ]	P [%]	$L_p$ [cd/m <sup>2</sup> ]	$L_{mes}$ [cd/m <sup>2</sup> ]	P [%]	$L_p$ [cd/m <sup>2</sup> ]	$L_{mes}$ [cd/m <sup>2</sup> ]
HPS	100	0.6	0.56	125	0.75	0.70	133	0.8	0.75
LED A	76	0.9	0.94	63	0.75	0.79	60	0.71	0.75
LED B	94	1.0	1.02	70	0.75	0.77	68	0.73	0.75
LED C	98	1.2	1.32	61	0.75	0.86	53	0.65	0.75
LED D	77	2.0	2.10	29	0.75	0.83	26	0.67	0.75

Με την χρήση της ενοποιημένης φωτομετρίας όλα τα LED πετυχαίνουν μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας απ' ό τι με την φωτοπική φωτομετρία. Οι μετρήσεις έγιναν σε επίπεδο λαμπρότητας  $L_p = 0,75$  δηλαδή στην μεσαία μεσοπική περιοχή. Συγκεκριμένα τα φωτιστικά LED πέτυχαν (αποτελέσματα είναι κανονικοποιημένα στην κατανάλωση του HPS φωτιστικού:

Πίνακας 7-5 Σύγκριση φωτοπικής και μεσοπικής ισχύος των φωτιστικών

Φωτιστικό	CCT (K)	S/P	$P_p$	$P_{mes}$
Φωτιστικό HPS	1750	0.56	125	133
Φωτιστικό LED A	3470	1.39	63	60
Φωτιστικό LED B	3220	1.16	70	68
Φωτιστικό LED C	6660	2.18	61	53
Φωτιστικό LED D	6150	1.93	29	26

Με τον φωτιστικό C το οποίο έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία χρώματος πετυχαίνουμε εξοικονόμηση ενέργειας 8% με την χρήση της ενοποιημένης φωτομετρίας. Επομένως με υψηλές θερμοκρασίες χρώματος και χρήση μεσοπικών ορίων λαμπρότητας πετυχαίνουμε μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης.



Διάγραμμα 7.4 Μείωση ανακλαστικότητας διαφόρων τύπων οδοστρώματος σε σχέση με τα μήκη κύματος φωτεινών ακτινοβολιών. NASA / Jet Propulsion Laboratory ASTER Library (Baldrige et al., 2009)

έχουν γίνει μελέτες που δείχνουν ότι με την χρήση υψηλών θερμοκρασιών χρώματος η ανακλαστικότητα του οδοστρώματος εξασθενεί.

## **7.4 Θερμοκρασία χρώματος, οδικός φωτισμός και αρνητικές επιπτώσεις**

### **7.4.1 Εισαγωγή**

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφέραμε ορισμένα πιθανά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση φωτεινών πηγών με φάσμα ακτινοβολίας που περιέχει μετατοπισμένα προς τα αριστερά μήκη κύματος. Τα λεγόμενα ψυχρά χρώματα που ακτινοβολούν τα LED τα οποία έχουν θερμοκρασία χρώματος >5000K μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές στην βιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού.

Υπάρχουν πολλοί πολέμιοι της χρήσης ψυχρών αποχρώσεων για τον φωτισμό των πόλεων και των αυτοκινητόδρομων παρά τις πιθανές θετικές επιδράσεις που έχει στην οπτική οξύτητα του οδηγού. Ακόμη πολλοί υποστηρίζουν πως τα ψυχρά χρώματα των LED αποτελούν μεγάλη πηγή αόρατης φωτορύπανσης, η οποία επηρεάζει την κοσμική παρατήρηση των αστρονόμων.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας χρώματος στον ανθρώπινο οργανισμό, αλλά και γιατί η μπλε ακτινοβολία θεωρείται πιο βλαβερή για την ατμόσφαιρα από την κόκκινη, την κίτρινη και την πράσινη.

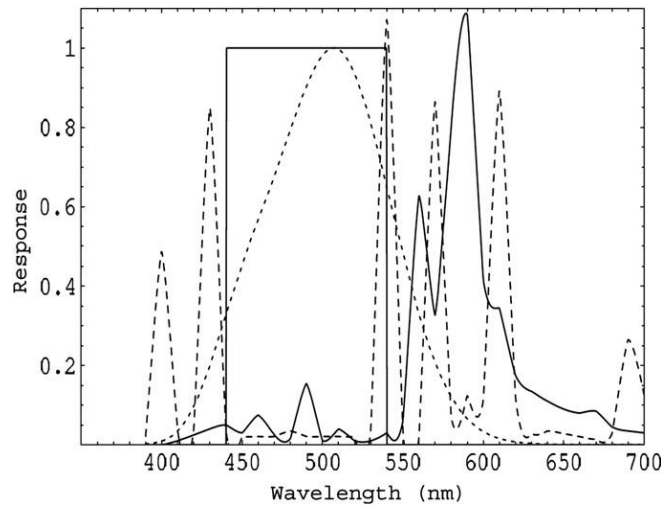
### **7.4.2 Υψηλή θερμοκρασία χρώματος και αστρική παρατήρηση.**

Στο κεφάλαιο της φωτορύπανσης αναλύσαμε το φαινόμενο από άποψη τεχνολογίας φωτισμού και προτείναμε τρόπους αντιμετώπισης του. Σε αυτή την παράγραφο το εξετάζουμε από την πλευρά της φασματοσκοπίας.

Ένας λόγος για τον οποίο το μπλε φως συμβάλλει πιο πολύ στην φωτορύπανση από τα υπόλοιπα χρώματα είναι ότι διαχέεται πιο εύκολα στην ατμόσφαιρα, όπως βλέπουμε από τον μπλε ουρανό της ημέρας. Το φαινόμενο του μπλε ουρανού εξηγείται από την διάχυση Rayleigh, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος μιας ακτινοβολίας, που σημαίνει ότι όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος τόσο πιο έντονος είναι ο διασκορπισμός του στην ατμόσφαιρα.

Το ίδιο συμβαίνει και με τον διαφεύγοντα φωτισμό των πόλεων. Τα μπλε χρώματα εγκλωβίζονται και διαχέονται στον νυκτερινό ουρανό σε μεγαλύτερο βαθμό από τα

κίτρινα. Επομένως η χρήση φωτιστικών LED με ψυχρές αποχρώσεις ενδέχεται να εντείνει το φαινόμενο της φωτεινότητας του ουρανού κατά τις νυκτερινές ώρες.



Διάγραμμα 7.5 Η προστατευμένη ζώνη μήκων κύματος 440-540nm

Εξαιτίας του ότι οι δυο κύριες συναρτήσεις ευαισθησίας του οφθαλμού έχουν σε ορισμένα μήκη κύματος κοινή παρουσία, επικαλύπτει δηλαδή η μια την άλλη, ο δείκτης S/P δεν είναι αρκετός από μόνος του για να μετρήσει το ακριβές ποσό μικρών μηκών κυμάτων μιας ακτινοβολίας. Έτσι έχει προταθεί η δημιουργία ενός νέου συμπληρωματικού τρόπου μελέτης της διείσδυσης μιας φωτεινής πηγής στην λεγόμενη προστατευμένη ζώνη (P band).

Με δεδομένο ότι η αστρική παρατήρηση υπό γυμνό οφθαλμό περιορίζεται από την συνάρτηση σκοτοπικής ευαισθησίας μόνο, σε ένα θεωρητικά μη μολυσμένο από ακτινοβολίες χώρο είναι απαραίτητο η προστατευμένη περιοχή μηκών κύματος να είναι μεγάλη, τουλάχιστον 100nm.

Ακόμη θα πρέπει να έχει ως κέντρο της, τα μήκη κύματος όπου η σκοτοπική ευαισθησία γίνεται ίση με την μονάδα. Η προστατευμένη ζώνη ορίζεται εν τέλει στα 440-540 nm αφήνοντας εκτός της φασματική εκπομπή του υδραργύρου. Η περιοχή αυτή βρίσκεται κατά 79% στην περιοχή σκοτοπικής ευαισθησίας του οφθαλμού.

Ο δείκτης που δείχνει την διείσδυση μιας φωτεινής πηγής στην ζώνη προστασίας είναι:

$$R_P = \frac{\Phi_{e,P}}{\Phi_{e,V}} = \frac{\int_{440}^{540} P_{e,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}$$

με  $P_{e,\lambda}$  την ισχύ εκπομπής σε καθορισμένο μήκος κύματος και  $V(\lambda)$  την φασματική

Πίνακας 7-6 Φωτεινές πηγές και βαθμός διείσδυσης στην περιοχή προστασίας 440-540nm

Ratios for some lamps and lamp classes.

Lamp	$R_{sp}$	$R_p$
LPS <sup>a</sup>	0.20	0.0027
HPS 70 W <sup>a</sup>	0.55	0.13
Average HPS <sup>b</sup>	0.66	—
HPL 80 W (Hg vapor) <sup>a</sup>	1.18	0.27
CIE Illuminant A <sup>c</sup>	1.41	0.51
QTH 3100 K <sup>a</sup>	1.56	0.58
Average MH <sup>b</sup>	1.60	0.46
Flat spectrum <sup>c</sup>	1.86	0.93
LED 'natural white' <sup>c</sup>	3.5	0.87

<sup>a</sup>  $R_{sp}$  measured.

<sup>b</sup>  $R_{sp}$  from Knox & Keith (Judd, 1951).

<sup>c</sup>  $R_{sp}$  calculated.

συνάρτηση ευαισθησίας της φωτοπικής όρασης.

Ο πίνακας φανερώνει ότι με την πιθανή σταδιακή αντικατάσταση του λαμπτήρων HPS που χρησιμοποιούνται ευρέως στον φωτισμό δρόμων από φωτιστικά LED, το φαινόμενο της νυχτερινής φωτεινότητας, όπως την αντιλαμβάνεται η σκοτοπική όραση του ανθρώπου θα ενταθεί από 2.5 μέχρι και 5 φορές.

Η πρόταση που έχει γίνει για περιορισμό της ρύπανσης στην περιοχή 440-540nm, είναι η υιοθέτηση θερμών θερμοκρασιών χρώματος σε συγκρίσιμα επίπεδα με αυτή του λαμπτήρα HPS.

#### 7.4.3 Θερμοκρασία χρώματος και βιολογικές συνέπειες.

Στις αρχές τις προηγούμενης δεκαετίας διαπιστώθηκε, πως στον ανθρώπινο οφθαλμό υπάρχει και ένας τρίτος τύπος φωτουποδοχέων, ο κιρκάδιος. Τα κύτταρα αυτά έχουν μετατοπισμένη την φασματική ευαισθησία τους στην περιοχή των μικρών μηκών κύματος, δηλαδή την περιοχή του μπλε.

Πλέον δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η έκθεση σε φωτεινή ακτινοβολία μειώνει την παραγωγή και έκκριση της ουσίας μελατονίνης. Εκτός από την διάρκεια της έκθεσης στην ακτινοβολία, υπάρχουν δυο βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο. 1) η ένταση του φωτισμού και 2) το μήκος κύματος ή πιο απλά η θερμοκρασία χρώματος.

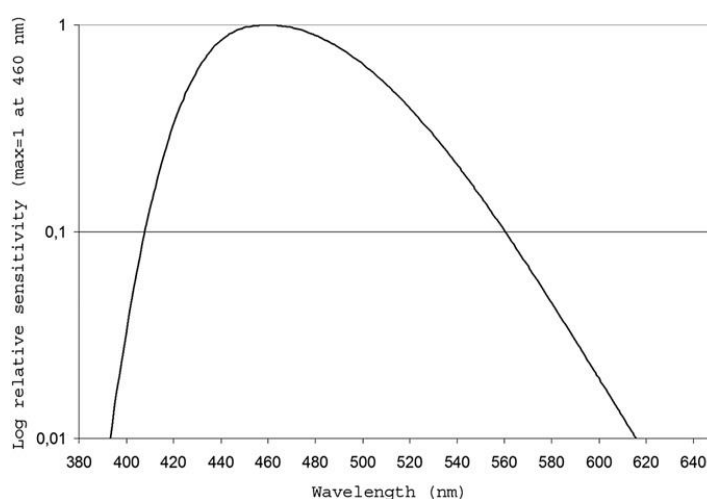
Η ανακάλυψη του νέου είδους φωτουποδοχέων (Non Image Forming Photoreceptors, NIFPs) στον ανθρώπινο οφθαλμό έδωσε την δυνατότητα για

καλύτερη μελέτη και κατανόηση του πως μια ακτινοβολία επιδρά το φως στην ανθρώπινη υγεία. Πλέον η έρευνα έχει δείξει ότι κύριο παράγοντα καταστολής της μελατονίνης δεν είναι το επίπεδο φωτισμού, αλλά κατά κύριο λόγο το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Έρευνες έχουν δείξει [Cajochen et al.,2005] έδειξαν ότι η έκθεση σε μονοχρωματική ακτινοβολία στα 460nm μειώνει την παραγωγή της μελατονίνης σε αρκετά μεγαλύτερα επίπεδα από την έκθεση σε ίδιες συνθήκες σε ακτινοβολία 560nm.

Σήμερα βρισκόμενοι στην εποχή όπου τα LED θα παίζουν τον νέο κυρίαρχο ρόλο στην τεχνολογία φωτισμού, θα πρέπει να εξετάσουμε σοβαρά το φαινόμενο της καταστολής της μελατονίνης καθώς οι πόλεις μας ολοένα και θα γεμίζουν με φωτισμό LED.

Η ελάττωση της έκκρισης της μελατονίνης προκαλεί μεταξύ άλλων, αϋπνίες, άγχος, και αυξάνει τις πιθανότητες για πολλές ασθένειες συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η καμπύλη ευαισθησίας που ρυθμίζει την παραγωγή και έκκριση της μελατονίνης.



Διάγραμμα 7.6 Καμπύλη ευαισθησίας ουσία μελατονίνης(MLT)

Για να μπορέσουμε να μειώσουμε την επίδραση στην έκκριση της μελατονίνης, όπως φαίνεται και στο σχήμα, δεν θα πρέπει ο φωτισμός που χρησιμοποιείται να έχει μήκη κύματος μικρότερα των 530nm.

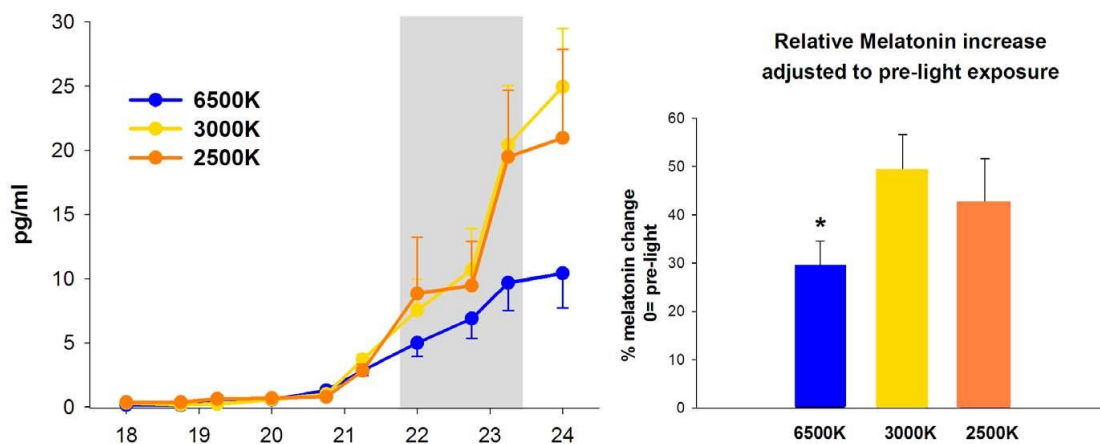


Πίνακας 7-7 Πίνακας επίδρασης στην έκκριση της μελατονίνης από διάφορες πηγές φωτός σε σύγκριση με την επίδραση που προκαλεί ο λαμπτήρας HPS

Lamp type	Energy relative to HPS, 440–500 nm band	Melatonin suppression effect (relative to HPS)
HPS	1	1
LPS	0.02	0.3
Metal Halide	2.7	3.4
Natural White LED	7.0	5.4
Incandescent 65 W	2.5	2.5

Υπάρχει η ανάγκη ο φωτισμός των πόλεων να επιλέγεται όχι μόνο με οικονομικά

#### Melatonin adjusted to pre-light exposure



Διάγραμμα 7.7 Επίδραση της θερμοκρασίας χρώματος στην έκκριση της μελατονίνης. ( e16429. doi:10.1371/journal.pone.0016429)

κριτήρια, αλλά και με κριτήρια υγείας. Τα LED που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να κυμαίνονται στην περιοχή των 3000-4500K. Δηλαδή να επιλέγονται θερμές αποχρώσεις του λευκού φωτός, με επίδραση στη έκκριση της μελατονίνης όσο αυτής αυτή του λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης.

Η προστατευόμενη ζώνη P band δεν αφορά μόνο την ρύπανση της ατμόσφαιράς από μπλε ακτινοβολίας, αλλά και την προστασία της περιοχής ευαισθησίας της μελατονίνης. Η ένωση American Medical Association σε τελευταία της ανάλυση, έθεσε την φωτορύπανση με μπλε ακτινοβολία ως δημόσιο κίνδυνο και πρότεινε τον περιορισμό της. Ακόμα, η ένωση *International Agency for Research on Cancer* πρόσφατα πρόσθεσε στην λίστα 2A (πιθανώς καρκινογόνα για τον άνθρωπο), τις αλλαγές στο κερκάρδιο σύστημα.



## **8 Επιλογή κατηγορίας φωτισμού με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN13201/2004**

### **8.1 Εισαγωγή**

Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13201/2004 αποτελείται από τέσσερα μέρη:

- Το ΕΛΟΤ CEN/TR 13201.01.2005: Επιλογή κατηγοριών φωτισμού
- Το ΕΛΟΤ EN 13201.02/2004: Απαιτήσεις επιδόσεων
- Το ΕΛΟΤ EN 13201.03/2004: Υπολογισμός επιδόσεων
- Το ΕΛΟΤ EN 13201.04/2004: Μέθοδοι μέτρησης επιδόσεων φωτισμού

Το πρώτο μέρος είναι οδηγία, δηλαδή δεν έχει υποχρεωτική εφαρμογή ενώ τα υπόλοιπα τρία μέρη είναι υποχρεωτικά στην εφαρμογή τους. Με την απόφαση όμως Δ13/Β/οικ. 16522 (ΦΕΚ Β' 1792 3.12.2004) του Υπουργού 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, δηλαδή τις οδηγίες και τα κείμενα εναρμόνισης που εκδίδονται και ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στο πρώτο μέρος καθορίζεται η μεθοδολογία για την επιλογή των καταστάσεων φωτισμού ενός δρόμου ή μιας περιοχής και κατόπιν επιλέγεται η κατηγορία φωτισμού του δρόμου ή της περιοχής. Στο δεύτερο μέρος έχοντας επιλέξει την κατηγορία του δρόμου (κατάσταση φωτισμού), επιλέγονται από πίνακες τα φωτοτεχνικά δεδομένα που πρέπει να εφαρμοστούν στην μελετώμενη περιοχή.

Το πρότυπο δεν καθορίζει την αναγκαιότητα φωτισμού ενός δρόμου ή μιας περιοχής, αλλά εάν αποφασισθεί να φωτιστεί ένας δρόμος ή περιοχή, προσδιορίζει την αναγκαία στάθμη φωτισμού σε συνάρτηση με ορισμένες παραμέτρους, μερικές από τις οποίες είναι:

- Κυκλοφοριακή ροή οχημάτων
- Κυκλοφοριακή ροή ποδηλάτων
- Κυκλοφοριακή ροή πεζών

- Διάφορες δυσκολίες στην οδήγηση
- Η απαίτηση για τη δυνατότητα αναγνώρισης προσώπων
- Ο βαθμός εγκληματικότητας στην περιοχή
- Η πολυπλοκότητα του οπτικού πεδίου του οδηγού
- Η φωτεινότητα του περιβάλλοντος
- Οι καιρικές συνθήκες

Με το πρότυπο αυτό οι απαιτούμενες στάθμες φωτισμού εκφράζονται, είτε μέσω του φωτισμού σε οριζόντιο ή κάθετο επίπεδο, είτε μέσω της λαμπρότητας. Αξίζει να σημειωθεί πως οι απαιτούμενες τιμές είναι μικρότερες από αυτές που εφαρμόζονταν στην Ελλάδα μέχρι σήμερα.

## **8.2 Οι κατηγορίες φωτισμού**

Στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13201-2:2003 καθιερώνονται οι κατηγορίες φωτισμού οι οποίες είναι οι ME, CE, S, A, ES, EV.

Μια κατηγορία φωτισμού καθορίζεται από ένα σύνολο φωτομετρικών απαιτήσεων που στοχεύει στις οπτικές ανάγκες των χρηστών των οδών (π.χ. οδηγοί αυτοκινήτων, μοτοσικλετών, ποδηλάτων, πεζών κλπ.) ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια τους κατά την διάρκεια της νύκτας.

Σκοπός της χρήσης των κατηγοριών φωτισμού, είναι να διευκολυνθούν οι μελετητές στην σύνταξη των μελετών των εγκαταστάσεων οδοφωτισμού καθώς και στην χρησιμοποίηση των προϊόντων και υπηρεσιών του οδικού φωτισμού στις χώρες μέλη CEN.

- ✓ Κατηγορίες ME: Αφορούν αυτοκινητόδρομους, όμως σε μερικές χώρες αφορούν και δρόμους σε κατοικημένες περιοχές, που επιτρέπουν μέσες έως υψηλές ταχύτητες κυκλοφορίας (>60km/h)
- ✓ Κατηγορίες CE: Αφορούν αυτοκινητόδρομους αλλά για χρήση σε περιοχές σύγκρουσης (διασταυρώσεις), εμπορικούς δρόμους, αστικούς δρόμους, διασταυρώσεις υποχρεωτικής κυκλικής πορείας, περιοχές αναμονής, ποδηλατοδρόμους, πεζόδρομους κτλ.

- ✓ Κατηγορίες S, A: Προορίζονται για ποδηλατοδρόμους και πεζόδρομους, στις λωρίδες έκτακτης ανάγκης (Λ.Ε.Α.) των αυτοκινητόδρομων και άλλες οδικές περιοχές που βρίσκονται κοντά ή κατά μήκος των αυτοκινητόδρομων, κατοικημένους δρόμους, πεζόδρομους, περιοχές χώρων στάθμευσης κτλ.
- ✓ Κατηγορίες ES: Αποτελούν πρόσθετες κατηγορίες στις περιπτώσεις όπου ο δημόσιος φωτισμός είναι απαραίτητος για τον προσδιορισμό των προσώπων και των αντικειμένων και στις οδικές περιοχές με υψηλότερη από την κανονική εγκληματικότητα.
- ✓ Κατηγορίες EV: Προορίζονται ως πρόσθετες κατηγορίες στις περιπτώσεις όπου κάθετες επιφάνειες πρέπει να είναι ορατές. Εφαρμόζονται σε οδικές περιοχές όπως οι σταθμοί διοδίων κτλ.

Οι απαιτήσεις των κατηγοριών φωτισμού εκφράζουν την κατηγορία οδικού χρήστη ή τον τύπο της οδικής περιοχής. Έτσι οι κατηγορίες ME είναι βασισμένες στην λαμπρότητα της οδικής επιφάνειας (luminance) με μονάδα  $\text{cd/m}^2$ , ενώ οι κατηγορίες CE, S, A είναι βασισμένες στην ένταση φωτισμού (illuminance) με μονάδα μέτρησης το Lux. Οι κατηγορίες S και A απεικονίζουν τις διαφορετικές προτεραιότητες στον οδικό φωτισμό. Οι κατηγορίες ES είναι βασισμένες στην ημικυλινδρική ένταση φωτισμού (semi-cylinder illuminance), ενώ οι κατηγορίες EV είναι βασισμένες στην ένταση φωτισμού στο κάθετο επίπεδο.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την επιλογή της σωστής κατηγορίας φωτισμού για ένα συγκεκριμένο οδικό τμήμα είναι σε γενικές γραμμές τυποποιημένη στα εξής βήματα:

- Καθορίζεται η δημόσια περιοχή κυκλοφορίας και κατόπιν επιλέγονται οι συνθήκες φωτισμού της περιοχής σύμφωνα με τα κριτήρια επιλογής κατάστασης φωτισμού.
- Στην συνέχεια καθορίζεται η εξεταζόμενη περιοχή σύμφωνα με ορισμένες παραμέτρους όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, διάφορα κυκλοφοριακά δεδομένα και τέλος λοιπές περιβαλλοντικές και εξωτερικές επιδράσεις.
- Αφού εξετάσουμε όλα τα παραπάνω οδηγούμαστε σε μια κατηγορία φωτισμού. Στην συνέχεια μελετάμε τις φωτοτεχνικές απαιτήσεις οι οποίες ακολουθούν την συγκεκριμένη κατηγορία.

### **8.3 Εφαρμογή του προτύπου για την μελέτη τυπικών οδικών αρτηριών.**

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν ορισμένες κατηγορίες φωτισμού οι οποίες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές της εικόνας των οδικών αξόνων της Ελλάδας. Έτσι αναζητήσαμε τις αντίστοιχες κατηγορίες φωτισμού ορισμένων τυπικών περιπτώσεων δρόμων. Οι κατηγορίες φωτισμού που επιλέξαμε να μελετήσουμε είναι:

- Κατηγορία φωτισμού CE4
- Κατηγορία φωτισμού ME3c
- Κατηγορία φωτισμού ME4α
- Κατηγορία φωτισμού ME2

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως η μέθοδος με την οποία καταλήγει κανείς σε μια κλάση φωτισμού είναι τυποποιημένη και εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων μας δίνει την κατηγορία φωτισμού. Αξίζει δε να σημειωθεί πως το μονοπάτι που μας οδηγεί σε μια κλάση δεν είναι μοναδικό, δηλαδή μια κλάση μπορεί να προκύψει από διαφορετικές καταστάσεις φωτισμού.

Σε κάθε μελετώμενη κατηγορία θα αναλύσουμε τους παράγοντες εκείνους που μας οδήγησαν στην επιλογή της.

#### **8.3.1 Κατηγορία φωτισμού CE4**

Η παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη ώστε να καταλήξουμε στην συγκεκριμένη κατηγορία είναι οι εξής :

##### **1. Επιλογή κατάστασης φωτισμού**

*Πίνακας 8-1 Δεδομένα για επιλογή κατάστασης φωτισμούD2*

Αποτέλεσμα	Δεδομένα	Τύπος Χρηστών στην Περιοχή		
Κατάσταση Φωτισμού	Ταχύτητα Κύριου Χρήστη (km/h)	Κύριος Χρήστης	Άλλοι Επιτρεπόμενοι Χρήστες	Απαγορευμένοι Χρήστες
<b>D2</b>	>5 και <30	Οχήματα, Πεζοί	Αρ. Κιν. Οχήματα, Ποδήλ.	-

## 2. Επιλογή κατηγορίας φωτισμού

Πίνακας 8-2 Παράμετροι για την επιλογή κατηγορίας φωτισμού CE4

Παράμετροι	
Πολυπλοκότητα Οπτικού πεδίου	Υψηλή
Παρκαρισμένα Οχήματα	Ναι
Φωτισμός του παρακείμενου χώρου	Χαμηλός
Γεωμετρικά μέτρα ήπιας κυκλοφορίας	Όχι
Δυσκολία στην οδήγηση	Υψηλή
Εγκληματικότητα	Κανονική
Αναγνώριση Προσώπων	Δεν είναι αναγκαία
Κυκλοφορία ποδηλάτων και πεζών	Κανονική
Κατηγορία φωτισμού	<b>CE4</b>

## 3. Φωτοτεχνικές Απαιτήσεις Κατηγορίας CE4

Πίνακας 8-3 Απαιτήσεις φωτισμού κατηγορίας CE4

Κατηγορία Φωτισμού	Ένταση Φωτισμού $E_{avg}$ (lux) (minimum)	Δείκτης Ομοιομορφίας $U_0$ (minimum)
CE4	10	0.4

- ✓  $E_{avg}$  : Μέση τιμή της έντασης φωτισμού στο οδόστρωμα. Μονάδα μέτρησης το lux ( $lm/m^2$ )
- ✓  $U_0$  : Το πηλίκο της ελάχιστης έντασης φωτισμού προς την μέση ένταση φωτισμού (συντελεστής ομοιομορφίας της έντασης φωτισμού)

### 8.3.2 Κατηγορία Φωτισμού ΜΕ3c

Ο αλγόριθμος που ακολουθήσαμε για να καταλήξουμε στην συγκεκριμένη κλάση είναι ο εξής:

#### 1. Κατάσταση Φωτισμού

Πίνακας 8-4 Δεδομένα για την επιλογή κατάστασης φωτισμού Β1

Αποτέλεσμα	Δεδομένα	Τύπος Χρηστών στην Περιοχή		
Κατάσταση Φωτισμού	Ταχύτητα Κύριου Χρήστη (km/h)	Κύριος Χρήστης	Άλλοι Επιτρεπόμενοι Χρήστες	Απαγορευμένοι Χρήστες
<b>B1</b>	>30 και <60	Οχήματα, Αργά Κιν. Οχήματα	Ποδήλατα, Πεζοί	-

#### 2. Κατηγορία Φωτισμού

Πίνακας 8-5 Παράμετροι για την επιλογή κατηγορίας φωτισμού ΜΕ3c

Παράμετροι	
Περιοχές σύγκρουσης	Υπάρχουν
Συνθήκες Οδοστρώματος	Στεγνό
Διαχωριστική Νησίδα	Δεν υπάρχει
Τύπος Διασταυρώσεων	Ισόπεδοι Κόμβοι
Πυκνότητα Διασταυρώσεων	>3 ανά χλμ
Κυκλοφοριακή ροή	>7000
Δυσκολία επιλογής κατεύθυνσης (πινακίδες)	Απαιτητική
Κατηγορία Φωτισμού	ΜΕ3c



### 3. Φωτοτεχνικές Απαιτήσεις Κατηγορίας ME3c

Πίνακας 8-6 Απαιτήσεις φωτισμού κατηγορίας ME3c

Κατηγορία	Λαμπρότητα στεγνού οδοστρώματος			Φυσιολογική Θάμβωση	Δείκτης Φωτισμού Περιβάλλοντος
	Lavg (cd/m <sup>2</sup> ) (min)	U <sub>o</sub> (min)	U <sub>i</sub> (min)	TI (%) (max)	SR (min)
ME3c	1.0	0.4	0.5	15	0.5

- ✓ Lavg: Μέση τιμή λαμπρότητας cd/m<sup>2</sup>
- ✓ U<sub>o</sub>: Το ηλίκο της ελάχιστης τιμής λαμπρότητας στο υπό μελέτη τμήμα προς την μέση τιμή.
- ✓ U<sub>i</sub>: Διαμήκης Ομοιομορφία.
- ✓ TI : Φυσιολογική Θάμβωση που προκαλείται από το φωτιστικό σώμα (%)
- ✓ SR: Ηλίκο της μέσης έντασης φωτισμού των παρακείμενων λωρίδων προς την μέση τιμή των λωρίδων κυκλοφορίας οχημάτων.

#### 8.3.3 Κατηγορία Φωτισμού ME4a

Ο αλγόριθμος που ακολουθήσαμε για να καταλήξουμε στην συγκεκριμένη κλάση είναι ο εξής:

##### 1. Κατάσταση Φωτισμού

Πίνακας 8-7 Δεδομένα για την επιλογή κατάστασης φωτισμού A2

Αποτέλεσμα	Δεδομένα	Τύπος Χρηστών στην Περιοχή		
Κατάσταση Φωτισμού	Ταχύτητα Κύριου Χρήστη (km/h)	Κύριος Χρήστης	Άλλοι Επιτρεπόμενοι Χρήστες	Απαγορευμένοι Χρήστες
<b>A2</b>	>60	Οχήματα,	Αργά Κινούμενα Οχήματα	Ποδήλατα, Πεζοί

## 2. Κατηγορία Φωτισμού

Πίνακας 8-8 Παράμετροι για την επιλογή κατηγορίας φωτισμού ME4a

Περιοχές σύγκρουσης	Υπάρχουν
Δυσκολίες στην οδήγηση (πινακίδες)	Κανονική
Οδόστρωμα	Στεγνό
Διαχωριστική Νησίδα	Δεν υπάρχει
Τύπος Διασταυρώσεων	Ισόπεδοι
Πυκνότητα Ανισόπεδων	<3 ανά χλμ
Ροή οχημάτων	< 7.000
Περιπλοκότητα Περιβάλλοντος χώρου	Χαμηλή
Φωτισμός Παρακείμενου χώρου	Χαμηλός (αγροτική περιοχή)
Κατηγορία Φωτισμού	ME4a

## 3. Φωτοτεχνικές Απαιτήσεις Κατηγορίας ME4a

Πίνακας 8-9 Απαιτήσεις φωτισμού κατηγορίας ME4a

Κατηγορία	Λαμπρότητα στεγνού οδοστρώματος			Φυσιολογική Θάμβωση	Δείκτης Φωτισμού Περιβάλλοντος
	Lavg (cd/m <sup>2</sup> ) (min)	Uo (min)	Ui (min)	TI (%) (max)	SR (min)
ME4a	0.75	0.4	0.6	15	0.5

- ✓ Lavg: Μέση τιμή λαμπρότητας cd/m<sup>2</sup>
- ✓ Uo: Το πηλίκο της ελάχιστης τιμής λαμπρότητας στο υπό μελέτη τμήμα προς την μέση τιμή
- ✓ Ui : 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

### 8.3.4 Κατηγορία Φωτισμού ME2

Ο αλγόριθμος που ακολουθήσαμε για να καταλήξουμε στην συγκεκριμένη κλάση είναι ο εξής:

#### 1. Κατάσταση Φωτισμού

Πίνακας 8-10 Δεδομένα για την επιλογή κατάστασης φωτισμού A1

Αποτέλεσμα	Δεδομένα	Τύπος Χρηστών στην Περιοχή		
Κατάσταση Φωτισμού	Ταχύτητα Κύριου Χρήστη (km/h)	Κύριος Χρήστης	Άλλοι Επιτρεπόμενοι Χρήστες	Απαγορευμένοι Χρήστες
<b>A1</b>	>60	Οχήματα,	-	Ποδήλατα, Πεζοί ,Αργά Κινούμενα Οχήματα

#### 2. Κατηγορία Φωτισμού

Πίνακας 8-11 Παράμετροι για την επιλογή κατηγορίας φωτισμού ME2

Περιοχές σύγκρουσης	Δεν Υπάρχουν
Δυσκολίες στην οδήγηση (πινακίδες)	Υψηλή
Πολυπλοκότητα πεδίου	Κανονική
Περιβάλλον φωτισμός	Χαμηλός
Οδόστρωμα	Στεγνό
Διαχωριστική Νησίδα	Υπάρχει
Τύπος Διασταυρώσεων	Ανισόπεδοι
Απόσταση μεταξύ ανισόπεδων	>3 χλμ
Ροή οχημάτων	>25.000
Κατηγορία Φωτισμού	ME2

### 3. Φωτοτεχνικές Απαιτήσεις Κατηγορίας ME2

Πίνακας 8-12 Απαιτήσεις φωτισμού κατηγορίας ME2

Κατηγορία	Λαμπρότητα στεγνού οδοστρώματος			Φυσιολογική Θάμβωση	Δείκτης Φωτισμού Περιβάλλοντος
	Lavg (cd/m <sup>2</sup> ) (min)	U <sub>o</sub> (min)	U <sub>i</sub> (min)	TI (%) (max)	SR (min)
ME2	1.5	0.4	0.7	10	0.5

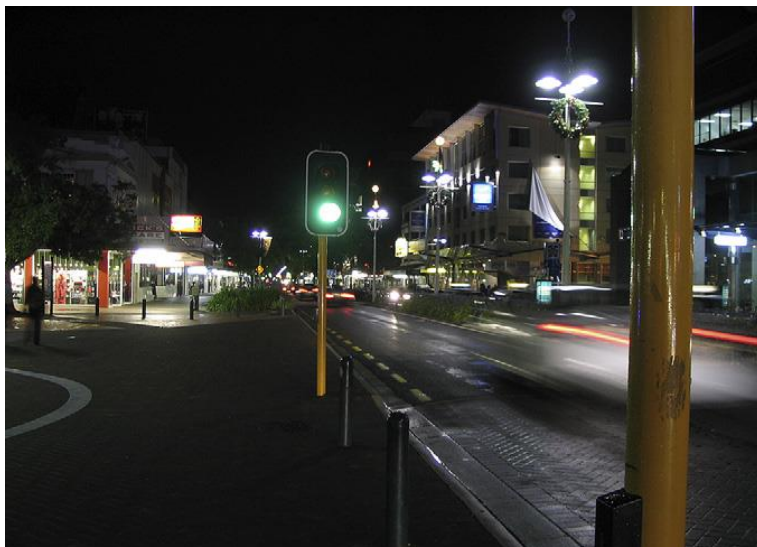
- ✓ Lavg: Μέση τιμή λαμπρότητας cd/m<sup>2</sup>
- ✓ U<sub>o</sub>: Το πηλίκο της ελάχιστης τιμής λαμπρότητας στο υπό μελέτη τμήμα προς την μέση τιμή
- ✓ U<sub>i</sub> : Διαμήκης Ομοιομορφία
- ✓ TI : Φυσιολογική Θάμβωση που προκαλείται από το φωτιστικό σώμα (%)
- ✓ SR: Πηλίκο της μέσης έντασης φωτισμού των παρακείμενων λωρίδων προς την μέση τιμή των λωρίδων κυκλοφορίας οχημάτων

## 9 Χάρτες αποτελεσμάτων ικανότητας LED και εξοικονόμηση ενέργειας

### 9.1 Εισαγωγή στην διαδικασία αξιολόγησης

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των LED έχει αλλάξει τον τρόπο που σκεφτόμαστε τον φωτισμό δρόμων. Όπως αναλύθηκε εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια υπάρχουν πολλοί παράμετροι, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εγκατάσταση ενός LED φωτιστικού δρόμου. Η τεχνολογία SSL προσφέρει μια πληθώρα επιλογών και με την σωστή χρήση μπορεί να βελτιστοποιήσει τον φωτισμό δρόμων τόσο σε οικονομία ηλεκτρικής ισχύος, όσο και σε ποιότητα φωτισμού.

Η μορφή του φωτισμού των ελληνικού οδικού δικτύου, ιδιαίτερα το κομμάτι του αστικού φωτισμού, θα λέγαμε ότι είναι επιεικώς άναρχη και ενεργοβόρος κατά κοινή ομολογία. Η χρήση των φωτιστικών δεν βασίζεται στην σωστή μελέτη, αλλά σε ευκαιριακές πρακτικές με αποτέλεσμα είτε τον υπερφωτισμό των δρόμων είτε τον ελλιπή φωτισμό τους.



*Εικόνα 9-1 Συνηθισμένη εικόνα φωτισμού πόλης κατά τις νυκτερινές ώρες. Το οδόστρωμα είναι το επίπεδο με την μικρότερη λαμπρότητα.*

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να ομαδοποιηθούν μερικές περιπτώσεις δρόμων, μέσω των κατηγοριών φωτισμού τους. Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η ΕΕ έχει θεσπίσει όρια στον φωτισμό των δρόμων καθώς και στο τρόπο υπολογισμού των φωτομετρικών δεδομένων.

Επιλέχθηκαν τέσσερις αντιπροσωπευτικές κατηγορίες (κλάσεις) φωτισμού που θεωρήθηκε ότι αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο μέρος του είδους των δρόμων που συναντάμε στις πόλεις της χώρας. Να σημειωθεί πως ένας δρόμος δεν έχει μια κλάση φωτισμού σε όλο το μήκος, αλλά ο καθορισμός της κλάσης γίνεται αυστηρά για το τμήμα του δρόμου που μελετάμε.

Η αξιολόγηση της ικανότητας των LED να αντικαταστήσουν τις τυπικές και συμβατικές μεθόδους φωτισμού έγινε με βάση την πλήρωση των κριτηρίων και των ελάχιστων απαιτήσεων των κατηγοριών φωτισμού ενός αντίστοιχου δρόμου.

Η αξιολόγηση της πιθανής εξοικονόμησης ενέργειας έγινε με βάση την ικανότητα των LED να αντικαταστήσουν συμβατικά HPS-HID φωτιστικά στην εκάστοτε κατηγορία. Να σημειωθεί πως τα συμβατικά φωτιστικά που χρησιμοποιήθηκαν, δεν είναι σε αντιστοιχία με αυτά που ενδεχομένως χρησιμοποιούνται στους δρόμους, αλλά αυτά που θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται για να έχουμε μια αντικειμενική σύγκριση.

Ως προέκταση δοκιμάστηκε και η απόδοση των φωτιστικών και των δυο κατηγοριών υπό μεσοπικά κριτήρια [ CIE 2010], χωρίς αυτό να υπάρχει μέσα στα ευρωπαϊκά πρότυπα, αλλά είναι ένα θέμα που συζητείται εκτενώς στους κύκλους της βιομηχανίας φωτισμού.

Σκοπός της προσπάθειας είναι η αποτίμηση της ικανότητας της εγκατάστασης φωτισμού LED στους δρόμους της χώρας μας, καθώς και οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας που απορρέουν από αυτή την αλλαγή.

Μετά από παρατήρηση των τυπικών δρόμων της Αθήνας, καταλήξαμε σε τυπικές διαστάσεις δρόμων, ύψος φωτιστικών, απόσταση ιστών κ.α.. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά ορίσαμε τις τυπικές περιπτώσεις δρόμων. Στην συνέχεια προεκτείναμε τις περιπτώσεις αυτές προσπαθώντας να δημιουργήσουμε ένα *χάρτη αποτελεσμάτων* για κάθε αντιπροσωπευτική κατηγορία φωτισμού.

## **9.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτιστικών LED σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν**

Τα φωτιστικά LED που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της εργασίας, ήταν όλα από εταιρίες που δραστηριοποιούνται στην ελληνική αγορά. Η επιλογή

έγινε με βάση κυρίως την δυνατότητα πρόσβασης σε πλήθος φωτομετρικών δεδομένων και αρχείων καθώς και με βάση την αξιοπιστία τους.

Οι εταιρίες, δηλαδή τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν, ήταν τρεις. Οι δυο εταιρίες, Philips (LED luminaire A) και Disano (LED luminaire B) είναι δυο μεγάλες εταιρίες στο χώρο του φωτισμού αναγνωρισμένης αξίας. Η τρίτη εταιρία, ILS LED Lighting (LED luminaire C) είναι μια εταιρία με σύντομη αλλά αξιοπρεπή παρουσία στον χώρο του φωτισμού.

Από κάθε εταιρία χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες σειρές φωτιστικών LED:

- Philips Lighting : Road Luminaires/Speedstar
- Disano Lighting: Road Luminaires/Stelvio, Mini Stelvio, Brera, Sforza
- ILS LED Lighting Solutions : Road Luminaires /Dolphin Series

Για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ένα ευρύ αν όχι όλο το φάσμα της γκάμας ισχύος των παραπάνω σειρών. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα ενδεικτικά τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως αυτά δίνονται από τους κατασκευαστές χωρίς να έχουμε την δυνατότητα επιβεβαίωσης τους, στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Στην επιλογή των παραμέτρων των φωτιστικών προσπαθήσαμε να λάβουμε υπόψη μας όλες τις παραμέτρους επιλογής φωτιστικών LED που αναφέραμε στα προηγούμενα κεφάλαια και φροντίσαμε ιδιαίτερα το θέμα της θερμοκρασίας χρώματος, για το οποίο υπάρχει έντονη διαμάχη. Οι θερμοκρασίες χρώματος που επιλέξαμε είναι θερμή [3000K] ουδέτερη [4100K] ψυχρή [5000K] και πολύ ψυχρή [5700K]. Στο συντριπτικά μεγαλύτερο μέρος των περιπτώσεων χρησιμοποιήσαμε την θερμή και την ουδέτερη απόχρωση.

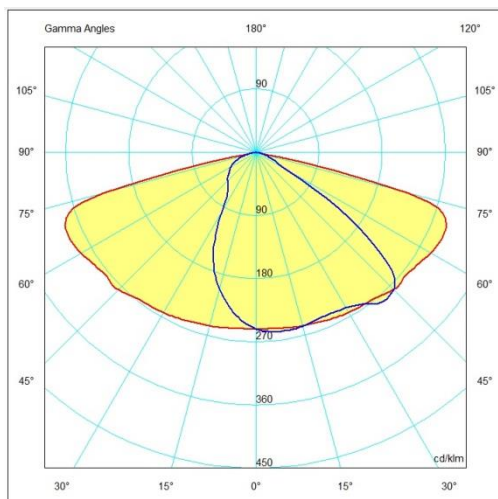
Όσον αφορά το οπτικό σύστημα τα φωτιστικά είχαν αρκετές επιλογές, δίνοντας μας την δυνατότητα για βελτιστοποίηση του αποτελέσματος.

Να σημειωθεί πως η παρουσίαση των φωτιστικών θα γίνει ανά σειρά και όχι ανά ηλεκτρική ισχύ, για λόγους πρακτικούς. Επομένως δεν είναι δυνατόν να αποδώσουμε συνοπτικά με ακρίβεια τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά κάθε φωτιστικού ξεχωριστά, αλλά θα δώσουμε ένα εύρος τιμών. Ωστόσο στους μετέπειτα υπολογισμούς εξοικονόμησης ενέργειας, οι υπολογισμοί γίνονται ανά συγκεκριμένο φωτιστικό.

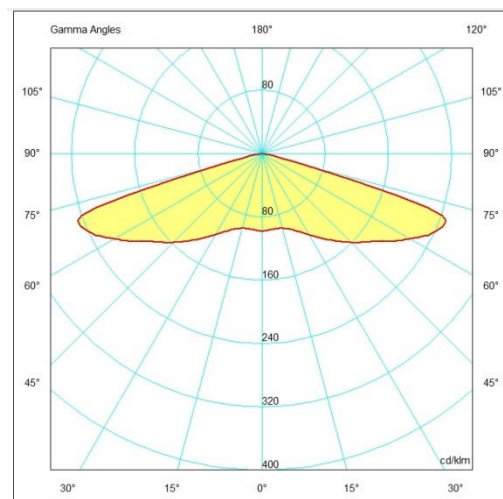
Φωτιστικά LED τύπου A (LED luminaire A)

Όνομασία σειράς	Road luminaires/ Speedstar
Τύπος LED	LED array
CIE Flux Codes	39 75 98 100 85
Θερμοκρασία χρώματος	3000K/4000K/5700K
Δείκτης χρωματικής Απόχρωσης (CRI)	80
	70
	70
Δυνατότητα Ελέγχου EMC	Ναι
Οπτικό σύστημα	Φακοί τύπου DW,S (III, I)
Δείκτης προστασίας	IP 66

Πίνακας 9-1 Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά φωτιστικού LED Luminaire A



Εικόνα 9-3 Φακός LED τύπου DW



Εικόνα 9-2 Φακός LED τύπου S

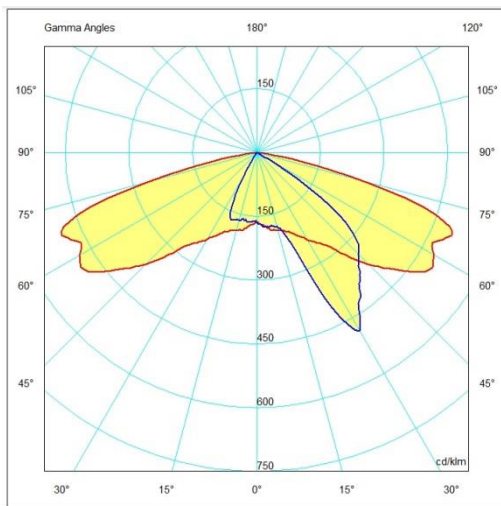
Φωτιστικά LED τύπου B (LED luminaire B)

Όνομασία σειράς	Road luminaires/ Stelvio
	Road luminaires/ Mini Stelvio
	Road luminaires/Sforza
	Road luminaires/ Visconti
Τύπος LED	LED array
CIE Flux Codes	42 82 99 100 100
	36 75 98 100 100
	42 82 99 100 100
	42 82 99 100 100

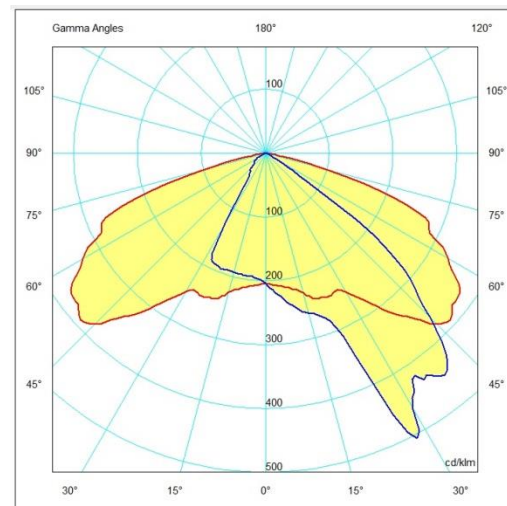


Θερμοκρασία χρώματος	4000K
Δείκτης χρωματικής Απόχρωσης (CRI)	80 (όλες οι σειρές)
Δυνατότητα Ελέγχου EMC	Ναι
Οπτικό σύστημα	Φακοί τύπου S,L
Δείκτης προστασίας	IP 66 (όλες οι σειρές)

Πίνακας 9-2 Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά φωτιστικού LED Luminaire B



Εικόνα 9-5 Φακός LED S Asymmetric

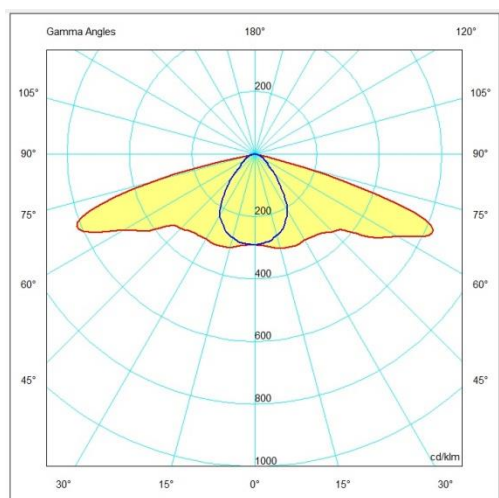


Εικόνα 9-4 Φακός LED SI Asymmetric

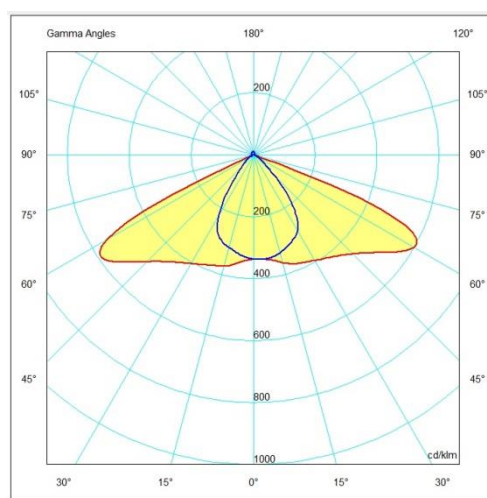
### Φωτιστικά LED τύπου C (LED luminaire C)

Όνομασία σειράς	Road luminaires/ Dolphin
Τύπος LED	COB LED chip
CIE Flux Codes	43 76 98 100 99
Θερμοκρασία χρώματος	3000K/5000K
Δείκτης χρωματικής Απόχρωσης (CRI)	80
	70
Δυνατότητα Ελέγχου EMC	Ναι
Οπτικό σύστημα	Φακοί τύπου S,DW,SW (I,II, III)
Δείκτης προστασίας	IP 66

Πίνακας 9-3 Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά φωτιστικού LED Luminaire C



Εικόνα 9-7 Συμμετρικός φακός LED SW



Εικόνα 9-6 Συμμετρικός φακός LED DW

Να σημειωθεί πως ο συντελεστής συντήρησης που θέσαμε για τα φωτιστικά είναι 0.8. Η ελληνική νομοθεσία υπαγορεύει σε όλες τις εγκαταστάσεις φωτισμού δρόμων την χρήση του συντελεστή 0.7. Αυτό εκτιμήσαμε ότι χρειάζεται αναθεώρηση για την τεχνολογία των LED, αλλά και για την κατασκευή των φωτιστικών και έτσι το αυξήσαμε στο 0.8. Με την μέθοδο υπολογισμού που αναλύσαμε στο κεφάλαιο της μελέτης φωτισμού δρόμων ο συντελεστής προκύπτει ακόμα μεγαλύτερος (0,85-0,9), αλλά δεν τον χρησιμοποιούμε για να είμαστε κοντά στην νομοθεσία.

### **9.3 Επιλεγθείσες κατηγορίες φωτισμού και οι τυπικοί δρόμοι που προκύπτουν**

Οι κατηγορίες φωτισμού που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν μετά από συγκεκριμένη διαδικασία που περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους για τον δρόμο και την χρήση του.

Οι επιλεγείσες κλάσεις φωτισμού είναι τέσσερις:

- Κατηγορία φωτισμού CE4
- Κατηγορία φωτισμού ME3c
- Κατηγορία φωτισμού ME4a
- Κατηγορία φωτισμού ME2

Αφού έγινε η επιλογή των κλάσεων φωτισμού, η διαδικασία της οποίας αναλύεται βήμα -βήμα στο κεφάλαιο 8, έγινε προσπάθεια να οριστούν αντίστοιχοι τυπικοί δρόμοι, στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η αντίστοιχη κλάση φωτισμού.

Ουσιαστικά οι τυπικοί δρόμοι είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τον δρόμο που θα περίμενε κανείς να φωτίζεται με την εκάστοτε κατηγορία.

Η διαστασιολόγηση των δρόμων και των διατάξεων φωτισμού, έγινε ωστόσο με παρατήρηση του τρόπου φωτισμού κεντρικών οδικών αξόνων της Αθήνας και από την βιβλιογραφία.



Εικόνα 9-8 Λεωφόρος Δεκελείας. Κατηγορία φωτισμού ΜΕ3c

### 9.3.1 Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού CE4

Τα στοιχεία του δρόμου που επιλέχθηκε ως τυπικός για την συγκεκριμένη κατηγορία είναι:

Πίνακας 9-4 Γεωμετρικές διαστάσεις τυπικού δρόμου CE4

Πλάτος δρόμου (m)	6
Διάταξη ιστών	Μονόπλευρη
Απόσταση ιστών (m)	30
Ύψος τοποθέτησης φωτιστικού(m)	6.5
Ανακλαστικότητα ασφάλτου Q <sub>0</sub>	R3 0.07
Κλίση βραχίονα στήριξης(°)	0-15°
Μήκος βραχίονα στήριξης (m)	0-1.2
Αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας	1

Ο δρόμος με αυτές τις προδιαγραφές είναι ένας τυπικός δρόμος γειτονιάς της Αθήνας. Η κατηγορία CE4 βασίζεται στην οριζόντια ένταση φωτισμού.



Εικόνα 9-9 Οδός Τσουρουκτσόγλου. Κατηγορία φωτισμού CE4

### 9.3.2 Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού ME3c

Τα στοιχεία του δρόμου που επιλέχθηκε ως τυπικός για την συγκεκριμένη κατηγορία είναι:

Πίνακας 9-5 Γεωμετρικές διαστάσεις τυπικού δρόμου ME3c

Πλάτος δρόμου (m)	8
Διάταξη ιστών	Χιαστί (staggered)
Απόσταση ιστών (m)	30
Ύψος τοποθέτησης φωτιστικού(m)	8.5
Ανακλαστικότητα ασφάλτου Q <sub>0</sub>	R3 0.07
Κλίση βραχίονα στήριξης(°)	0-15°
Μήκος βραχίονα στήριξης (m)	0-1.2
Αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας	2

Ο δρόμος που μπορεί αυτός ο συνδυασμός διαστάσεων και κατηγορίας φωτισμού να αντιπροσωπεύει είναι ένας κεντρικός προαστιακός άξονας.

### 9.3.3 Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού ME4a

Οι διαστάσεις του τυπικού για την κατηγορία δρόμου φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 9-6 Γεωμετρικές διαστάσεις τυπικού δρόμου ME4a

Πλάτος δρόμου (m)	9
Διάταξη ιστών	Διπλή( Και στις δυο πλευρές)
Απόσταση ιστών (m)	40
Ύψος τοποθέτησης φωτιστικού(m)	12
Ανακλαστικότητα ασφάλτου Q <sub>o</sub>	R3 0.07
Κλίση βραχίονα στήριξης(°)	0-15°
Μήκος βραχίονα στήριξης (m)	0-1.2
Αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας	2

Αυτός ο τυπικός δρόμος με την συγκεκριμένη κατηγορία φωτισμού, μπορεί να αφορά έναν ισόπεδο κόμβο κατά μήκος ενός επαρχιακού δρόμου.

### 9.3.4 Διαστασιολόγηση τυπικού δρόμου για κατηγορία φωτισμού ME2

Οι διαστάσεις του δρόμου για την συγκεκριμένη κατηγορία φωτισμού είναι:

Πίνακας 9-7 Γεωμετρικές διαστάσεις τυπικού δρόμου ME2

Πλάτος δρόμου (m)	10
Διάταξη ιστών	A) Διπλή (και στις δυο πλευρές)
	B) Στο κέντρο της νησίδας
Απόσταση ιστών (m)	30
	40
Ύψος τοποθέτησης φωτιστικού(m)	12
	14
Ανακλαστικότητα ασφάλτου Q <sub>o</sub>	R3 0.07
Κλίση βραχίονα στήριξης(°)	0-15°
Μήκος βραχίονα στήριξης (m)	0-1.2
Αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας	3



Οι διαστάσεις αυτές μπορεί να αφορούν μεγάλο κεντρικό δρόμο της Αθήνας με μεγάλη κυκλοφοριακή ροή και ταχύτητες. (πχ τμήμα Λ. Κηφισίας από Χαλάνδρι μέχρι Κατεχάκη, Εθνική Οδός Αθηνών Λαμίας, ύψος Ν. Φιλαδέλφειας κ.α.)

*Εικόνα 9-10 Λεωφόρος Χαλανδρίου. Κατηγορία φωτισμού ME2*

#### **9.4 Χάρτες ικανοτήτων φωτιστικών LED**



Στην προηγούμενη παράγραφο αναλύσαμε τους τυπικούς δρόμους για κάθε κατηγορία φωτισμού. Αυτό όμως δεν θα αρκούσε για να φτιάξουμε ένα χάρτη δυνατοτήτων για την εκάστοτε κατηγορία. Έτσι με βάση τις διαστάσεις των τυπικών δρόμων δημιουργήσαμε καινούργιους δρόμους με αυξανόμενες διαστάσεις.

Οι παράμετροι τους οποίους επηρεάσαμε ήταν η απόσταση των ιστών και το πλάτος των δρόμων. Ουσιαστικά σκοπός μας είναι η παροχή ενός εργαλείου- χάρτη που θα δείχνει ποια περιοχή διαστάσεων μπορούν τα LED να ικανοποιήσουν, υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Η ανάλυση έγινε και για τους τρεις τύπους φωτιστικών LED, ανά κατηγορία φωτισμού δρόμου. Τα αποτελέσματα τα αναπαριστούμε σε πίνακες με κάθετη παράμετρο την απόσταση των ιστών και οριζόντια παράμετρο το πλάτος του δρόμου.

Οι λοιπές μεταβλητές όπως η προεξοχή και η κλίση, τέθηκαν ως ελεύθερες μεταβλητές και δεν έγινε αναφορά τους για λόγους οικονομίας χώρου. Δεν ξεπερνάνε τα όρια όμως που έχουμε θέσει για τις τιμές τους. Πρέπει να τονιστεί πως κάθε κελί

των ακόλουθων πινάκων αποτελεί και μια ξεχωριστή περίπτωση πιθανού δρόμου. Επομένως για κάθε καινούργιο δρόμο είναι πιθανό η κλίση και η προεξοχή να αλλάζουν, για αυτό το λόγο δόθηκαν τα όρια τους και όχι οι ακριβείς τιμές τους.

Με **πράσινο** κελί  συμβολίζουμε την ικανότητα του φωτιστικού να πληροί τις φωτοτεχνικές απαιτήσεις της κατηγορίας και με **κόκκινο**  την αδυναμία.

Απαραίτητο κρίνεται να σημειωθεί πως για την αποδοχή μιας μέτρησης ως αποτυχημένης ή επιτυχημένης ορίσθηκε ένα διάστημα ανοχής γύρω από το όρια των απαιτήσεων της κατηγορίας φωτισμού το οποίο κυμαίνεται στο  $\pm 10\%$ . Δηλαδή ένα έχω απαίτηση  $1 \text{ cd/m}^2$ , μια μέτρηση είναι αποδεκτή εάν κυμαίνεται στο  $0.9 < L_{\text{avg}} < 1.1 \text{ cd/m}^2$

#### Κατηγορία φωτισμού CE4

Πίνακας 9-8 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού A για την κατηγορία CE4

<b>Luminaire A</b>		1 παρατηρητής						
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		6	7	8	9	10	11	12
6,5	25							
	27							
	30							
	32							
	35							
	37							
	40							

Πίνακας 9-9 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού B για την κατηγορία CE4

<b>Luminaire B</b>		1 παρατηρητής						
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		6	7	8	9	10	11	12
6,5	25							
	27							
	30							
	32							
	35							
	37							
	40							



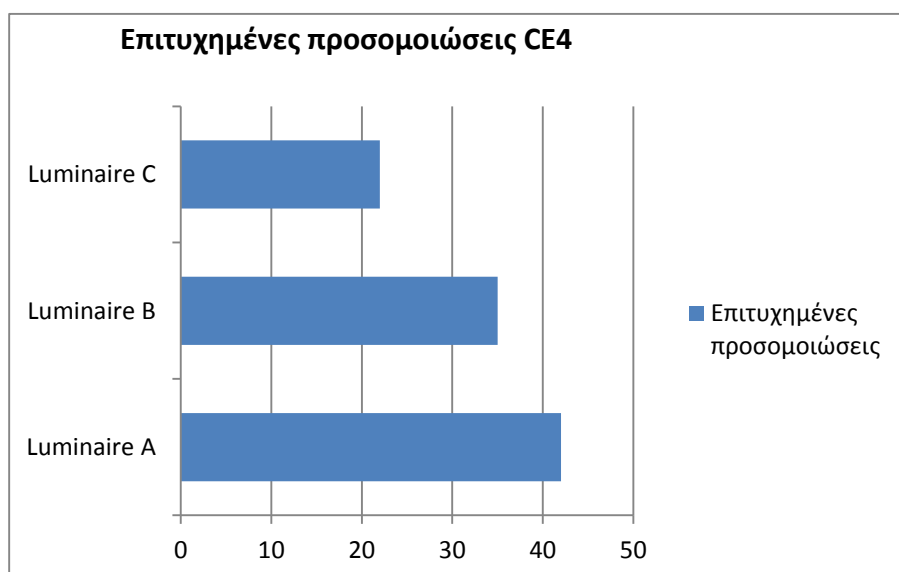
Πίνακας 9-10 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού C για την κατηγορία CE4

Luminaire C		1 παρατηρητής						
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		6	7	8	9	10	11	12
6,5	25	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
	27	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
	30	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
	32	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red
	35	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Red
	37	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	40	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red

Τα αποτελέσματα για την κλάση φωτισμού CE4 φανερώνουν την ικανότητα των φωτιστικών LED που δοκιμάστηκαν να ικανοποιούν το 85,7% των δοκιμασιών. Το ποσοστό αυτό ταυτίζεται με το ποσοστό επιτυχίας των φωτιστικών LED τύπου A, τα οποία είχαν και τις καλύτερες επιδόσεις. Να σημειωθεί πως τα LED τύπου A και B έχουν ασύμμετρους φακούς για το επίπεδο C90-C270 και φωτίζουν πιο πολύ τον δρόμο, έχοντας ως αποτέλεσμα την καλύτερη επίδοση τους σε πλατείες δρόμους.

Απ' την άλλη μεριά, τα φωτιστικά LED τύπου C έχουν συμμετρικούς φακούς στο επίπεδο C90-C270 και δεν μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις λόγω περιορισμένης κλίσης τοποθέτησης (0-15°). Διαπιστώνουμε λοιπόν στην πράξη την ανωτερότητα των ασύμμετρων φακών έναντι των συμμετρικών για αυτού του είδους την χρήση.

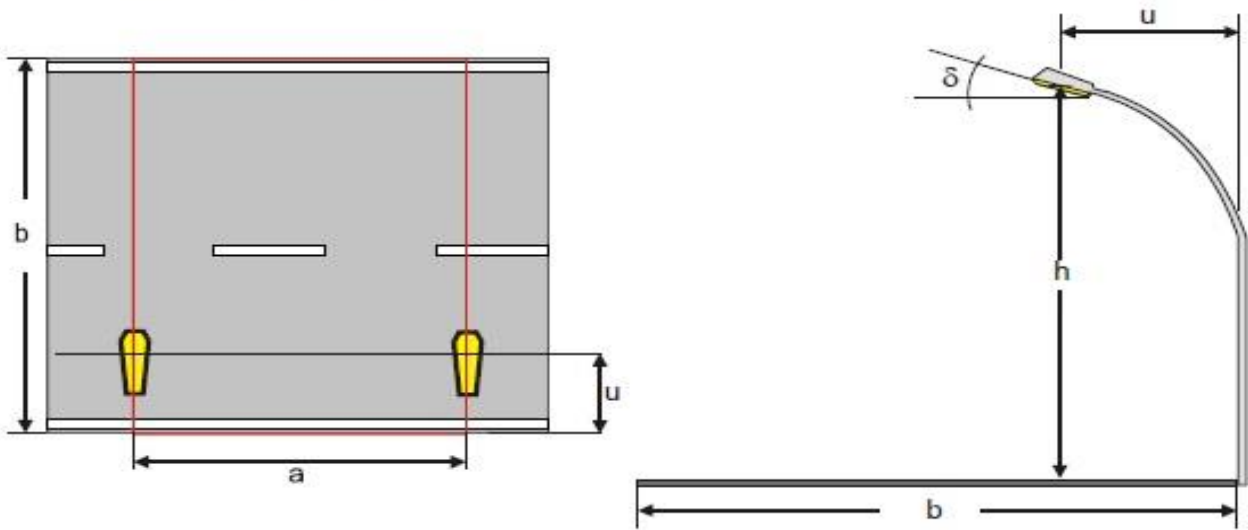
Σε γενικές γραμμές διαπιστώνουμε ότι τα φωτιστικά LED είναι ικανά να φωτίσουν το συντριπτικά μεγαλύτερο μέρος των πιθανών συνδυασμών δρόμων. Ακόμη, πολλοί συνδυασμοί είναι ιδιαίτερος δύσκολοι στην εφαρμογή τους και θεωρούνται οριακοί για τις δυνατότητες οποιασδήποτε τεχνολογίας.



Διάγραμμα 9.1 Ο αριθμός των επιτυχημένων προσομοιώσεων σε σύγκριση για κάθε φωτιστικό LED 136



## 2.2.1 Result overview, Road



### Luminaire data

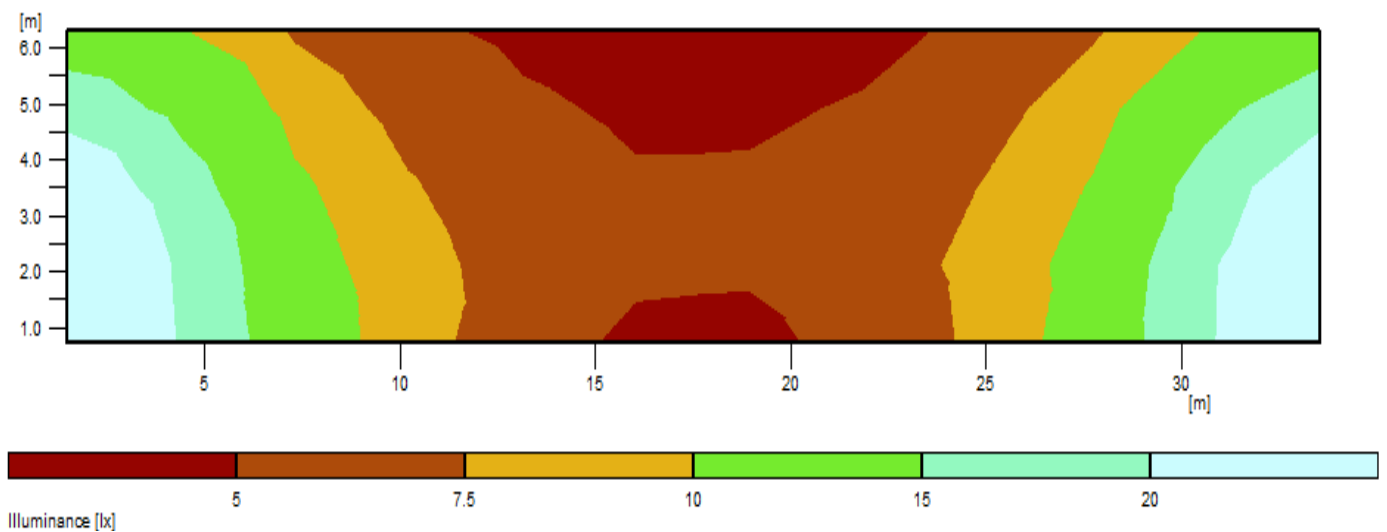
Manufacturer : EIC - ILS Innovating LED Lighting Solutions  
 Order No. : ILD-STR-45830-S  
 Luminaire name : ILD-STR-45830-S  
 Equipment : 1 x SC-LD04501 / 4140 lm

Road layout	: without central reservation	Luminaire placing	: Right row
Width of roadway (b)	: 6.00 m	photometric centre height.(h)	: 6.50 m
No. of lanes	: 1	Luminaire spacing (a)	: 30.00 m
Road surface category	: R3	Luminaires - outreach (u)	: 1.00 m
q0	: 0.07	Inclination (δ)	: 15.00°
Right hand drivers		Maintenance factor	: 0.80

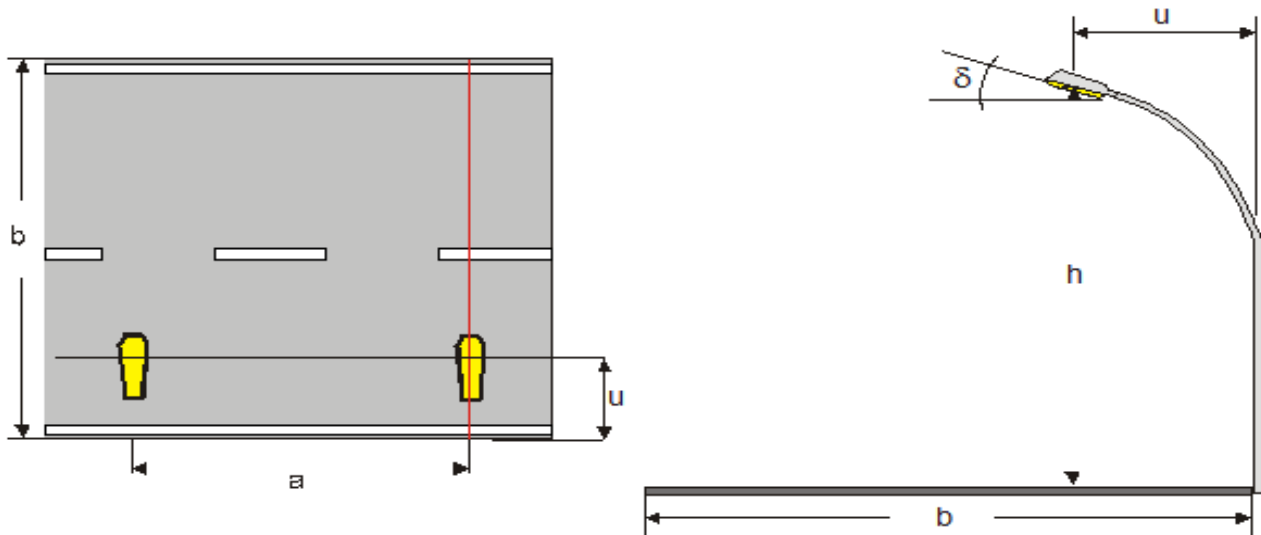
### Horizontal illuminance E

Average	: 10.5 lx	(CE4 min. 10)
Min / average	: 0.53	(CE4 min. 0.4)

Εικόνα 9-11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δρόμου CE4, πλάτους 6μ, απόσταση ιστών 30μ, μονόπλευρη διάταξη με χρήση φωτιστικού LED C



Εικόνα 9-12 Αναπαράσταση της έντασης φωτισμού με την χρήση ψευδοχρωμάτων, περίπτωση LED C



### Luminaire data

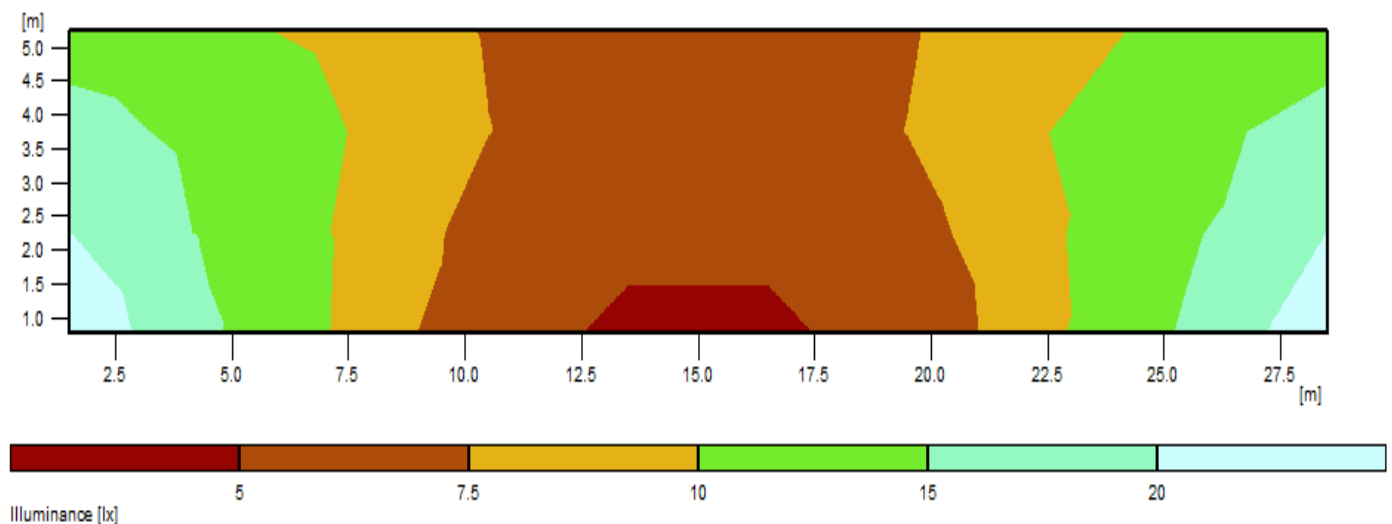
Manufacturer : PHILIPS/2013-09-07 Eulumdat/1 B-Tilt = 0.00  
 Order No. : BGP322 T35 DM GRN48/- No  
 Luminaire name : BGP322 T35 DM GRN48/- No  
 Equipment : 1 x GRN48-2S/830 / 4800 lm

Road layout	: without central reservation	Luminaire placing	: Right row
Width of roadway (b)	: 6.00 m	photometric centre height. (h)	: 6.50 m
No. of lanes	: 1	Luminaire spacing (a)	: 30.00 m
Road surface category	: R3	Luminaires - outreach (u)	: 0.00 m
q0	: 0.07	Inclination (δ)	: 0.00°
Right hand drivers		Maintenance factor	: 0.80

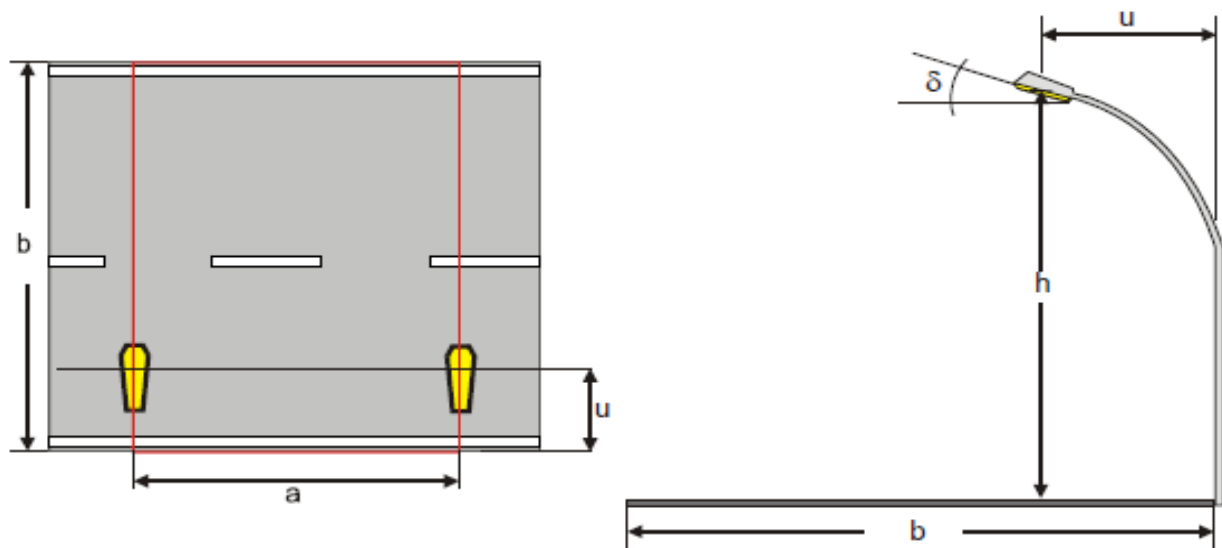
### Horizontal illuminance E

Average : 10.7 lx (CE4 min. 10)  
 Min / average : 0.43 (CE4 min. 0.4)

Εικόνα 9-13 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δρόμου CE4, πλάτους 6μ, απόσταση ιστών 30μ, μονόπλευρη διάταξη με χρήση φωτιστικού LED A



Εικόνα 9-14 Αναπαράσταση της έντασης φωτισμού με την χρήση ψευδοχρωμάτων, περίπτωση LED A



**Luminaire data**

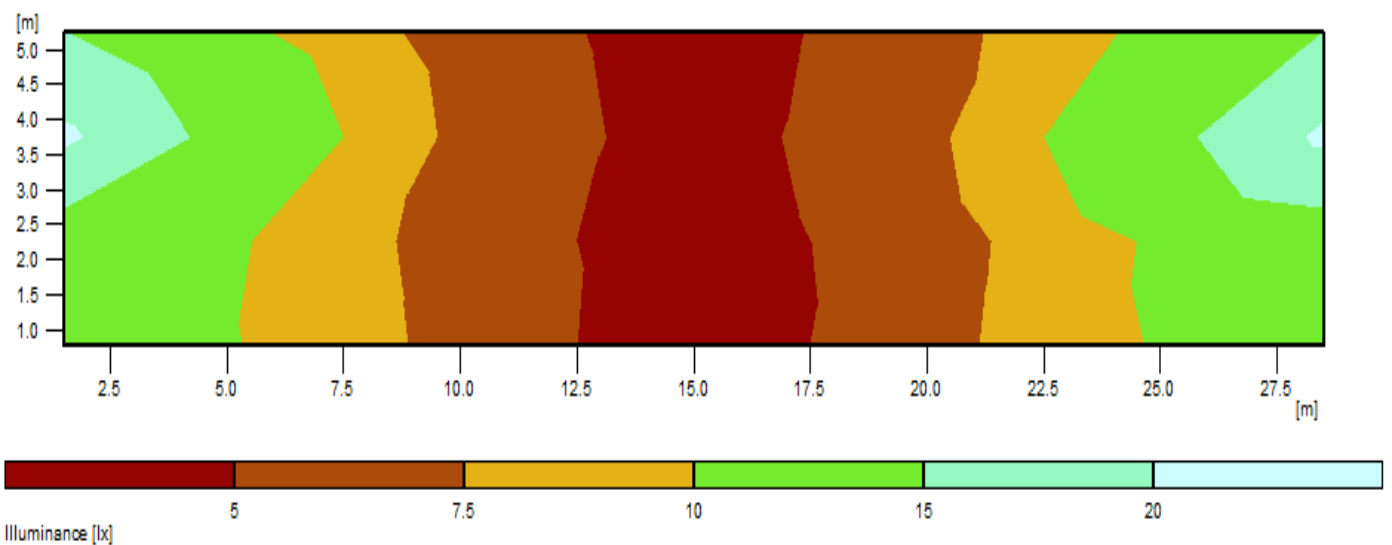
Manufacturer : Disano  
 Order No. : 3275 24 led  
 Luminaire name : 3275 Mini Stelvio - Plus L - P  
 Equipment : 1 x RebEs-24led/700 3275 / 3734 lm

Road layout	: without central reservation	Luminaire placing	: Right row
Width of roadway (b)	: 6.00 m	photometric centre height.(h)	: 6.50 m
No. of lanes	: 1	Luminaire spacing (a)	: 30.00 m
Road surface category	: R3	Luminaires - outreach (u)	: 1.20 m
q0	: 0.07	Inclination (δ)	: 0.00°
Right hand drivers		Maintenance factor	: 0.80

**Horizontal illuminance E**

Average : 9.1 lx (CE4 min. 10)  
 Min / average : 0.48 (CE4 min. 0.4)

Εικόνα 9-15 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δρόμων CE4, πλάτους 6μ, απόσταση ιστών 30μ, μονόπλευρη διάταξη με χρήση φωτιστικού LED B



Εικόνα 9-16 Αναπαράσταση της έντασης φωτισμού με την χρήση ψευδοχρωμάτων, περίπτωση LED B

Κατηγορία φωτισμού ME3c

Πίνακας 9-11 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού A για την κατηγορία ME3c

<b>Luminaire A</b>		2 παρατηρητές						
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		7	8	9	10	11	12	13
8,5	25							
	27							
	30							
	32							
	35							
	37							
	40							

Πίνακας 9-12 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού B για την κατηγορία ME3c

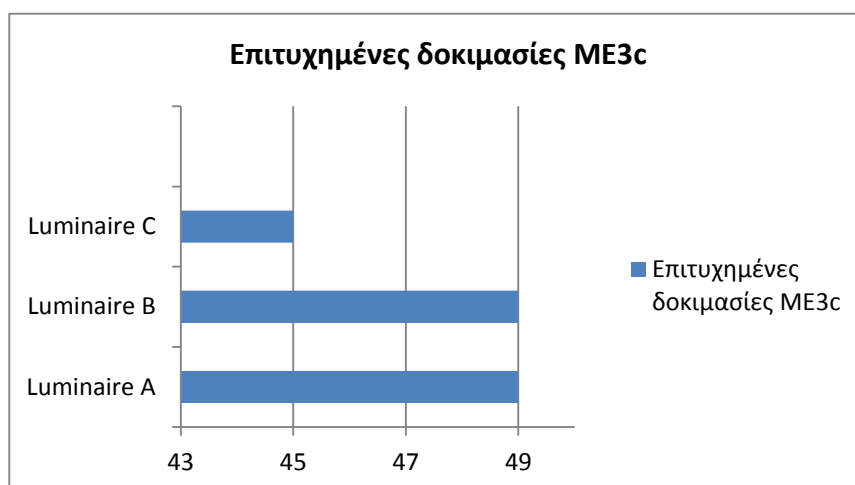
<b>Luminaire B</b>		2 παρατηρητές						
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		7	8	9	10	11	12	13
8,5	25							
	27							
	30							
	32							
	35							
	37							
	40							

Πίνακας 9-13 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού C για την κατηγορία ME3c

<b>Luminaire C</b>		2 παρατηρητές						
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		7	8	9	10	11	12	13
8,5	25							
	27							
	30							
	32							
	35							
	37							
	40							

Στην κλάση φωτισμού ME3c τα φωτιστικά LED ικανοποιούν τις απαιτήσεις όλων των πιθανών συνδυασμών δρόμων, εκτός του φωτιστικού C το οποίο λόγω του συμμετρικού του φακού και του περιορισμού της κλίσης τοποθέτησης δεν μπορεί να καλύψει τα μεγάλα πλάτη του δρόμου.

Θεωρείται σημαντικό να σημειωθεί πως για τις περιπτώσεις των φωτιστικών A, B στις περιπτώσεις όπου το πλάτος ήταν μεγάλο ο δείκτης του περιβάλλοντος φωτισμού S<sub>r</sub> έπεφτε σε μη επιτρεπτά επίπεδα σε σχέση με τις απαιτήσεις του προτύπου. Θεωρήθηκε όμως δευτερεύων παράγοντας και έτσι οι δοκιμασίες θεωρήθηκαν επιτυχείς.



Διάγραμμα 9.2 Ο αριθμός των επιτυχημένων προσομοιώσεων σε σύγκριση για κάθε φωτιστικό LED

### Κατηγορία φωτισμού ME4α

Πίνακας 9-14 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού A για την κατηγορία ME4α

<b>Luminaire A</b>		2 παρατηρητές					4 παρατηρητές	
Ύψος Ιστού	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		9	10	11	12	13	14	15
12m	30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	45	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14m	50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	60	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

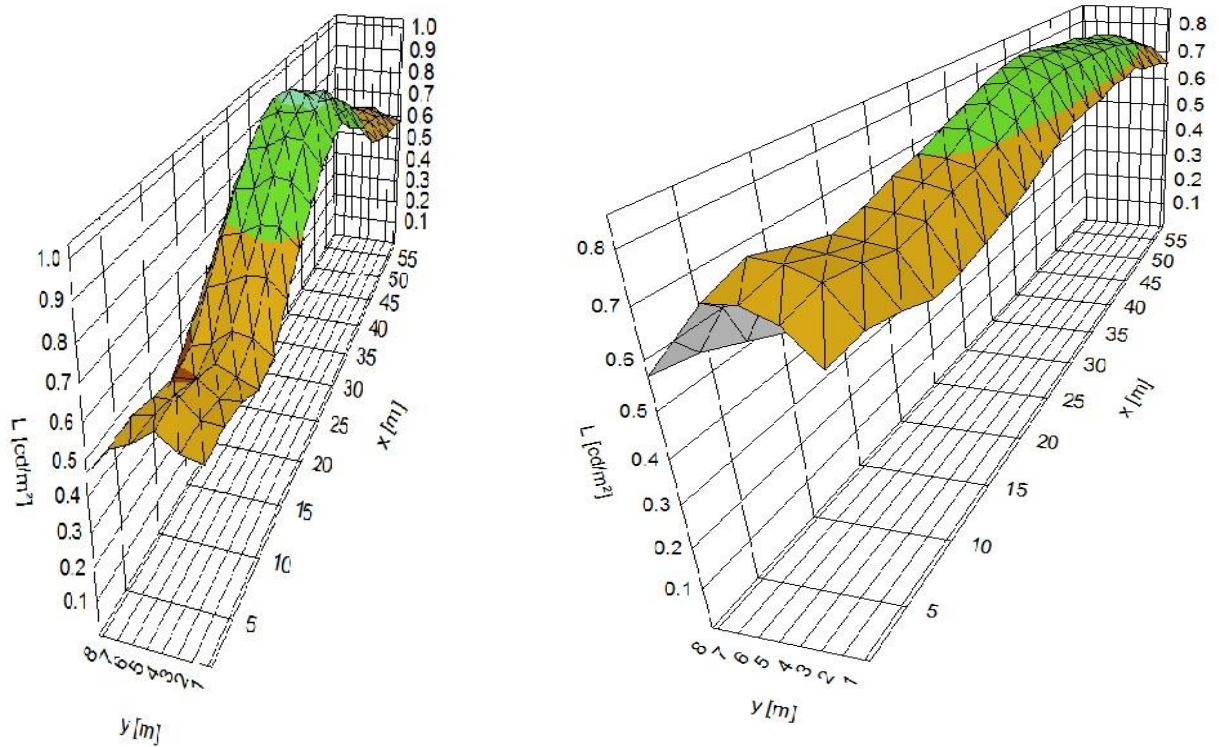
Πίνακας 9-15 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού B για την κατηγορία ME4a

<b>Luminaire B</b>		2 παρατηρητές					4 παρατηρητές	
Ύψος Ιστού	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		9	10	11	12	13	14	15
12m	30	■	■	■	■	■	■	■
	35	■	■	■	■	■	■	■
	40	■	■	■	■	■	■	■
	45	■	■	■	■	■	■	■
14m	50	■	■	■	■	■	■	■
	60	■	■	■	■	■	■	■

Πίνακας 9-16 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού C για την κατηγορία ME4a

<b>Luminaire C</b>		2 παρατηρητές					4 παρατηρητές	
Ύψος Ιστού	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)						
		9	10	11	12	13	14	15
12m	30	■	■	■	■	■	■	■
	35	■	■	■	■	■	■	■
	40	■	■	■	■	■	■	■
	45	■	■	■	■	■	■	■
14m	50	■	■	■	■	■	■	■
	60	■	■	■	■	■	■	■

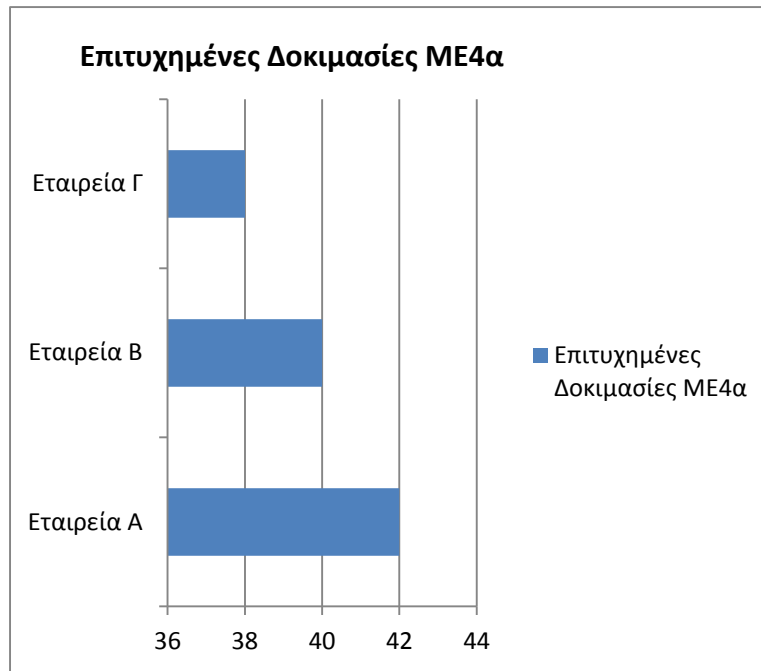
Στην κατηγορία φωτισμού ME4a παρατηρούμε πως τα LED καλύπτουν στο 100% τους δοθέντες από τους πίνακες συνδυασμούς δρόμων. Τα φωτιστικά, βέβαια, B,C χάνουν την διαμήκη ομοιομορφία που απαιτείται για στενούς δρόμους με μεγάλη απόσταση ιστών σε αυτή την διάταξη. Αυτό συμβαίνει διότι, ο παρατηρητής-οδηγός έχει έντονες αυξομειώσεις στο επίπεδο της λαμπρότητας που δέχεται κατά μήκος του δρόμου (Zebra Effect).



Διάγραμμα 9.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση του επιπέδου λαμπρότητας για τον παρατηρητή στην θέση  $y=2.25m$  με φωτιστικό C (αριστερά) και φωτιστικό A (δεξιά)

Οι παραπάνω εικόνες φανερώνουν την έννοια της διαμήκους ομοιομορφίας στον φωτισμό δρόμων. Και οι δυο απεικονίσεις δείχνουν το επίπεδο λαμπρότητας του εξεταζόμενου τμήματος δρόμου όπως το αντιλαμβάνεται ο οδηγός στην θέση  $y=2.25m$ . Στο αριστερά τρισδιάστατο διάγραμμα παρατηρούμε τις έντονες αλλαγές τις λαμπρότητας για  $y=2.25m$ , ενώ στα δεξιά βλέπουμε τις πιο απαλές μεταβάσεις στα επίπεδα φωτεινότητας για τον ίδιο δρόμο φυσικά.

Το παράδοξο με τα φωτιστικά B,C είναι ότι ενώ για απόσταση ιστών 60m και μικρά πλάτη δεν έχουν καλές διαμήκεις ομοιομορφίες, στα μεγαλύτερα πλάτη πετυχαίνουν τις ομοιομορφίες. Αυτό θεωρούμε ότι συμβαίνει λόγω του είδους του φακού, αλλά και της αλλαγής της θέσης του οδηγού- παρατηρητή.



Διάγραμμα 9.4 Ο αριθμός των επιτυχημένων προσομοιώσεων σε σύγκριση για κάθε φωτιστικό LED

Κατηγορία φωτισμού ME2

A) Διάταξη στο κέντρο της νησίδας

Πίνακας 9-17 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού A για την κατηγορία ME2

<b>Luminaire A</b>		3 παρατηρητές			4 παρατηρητές		
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)					
		10	11	12	13	14	15
12m	30	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	35	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	40	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	45	Green	Green	Green	Green	Green	Red
14m	50	Green	Red	Red	Red	Red	Red
	60	Red	Red	Red	Red	Red	Red

Πίνακας 9-18 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού B για την κατηγορία ME2

<b>Luminaire B</b>		3 παρατηρητές			4 παρατηρητές		
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)					
		10	11	12	13	14	15
12m	30	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	35	Green	Green	Green	Green	Red	Red
	40	Green	Green	Red	Red	Red	Red
	45	Red	Red	Red	Red	Red	Red
14m	50	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	60	Red	Red	Red	Red	Red	Red

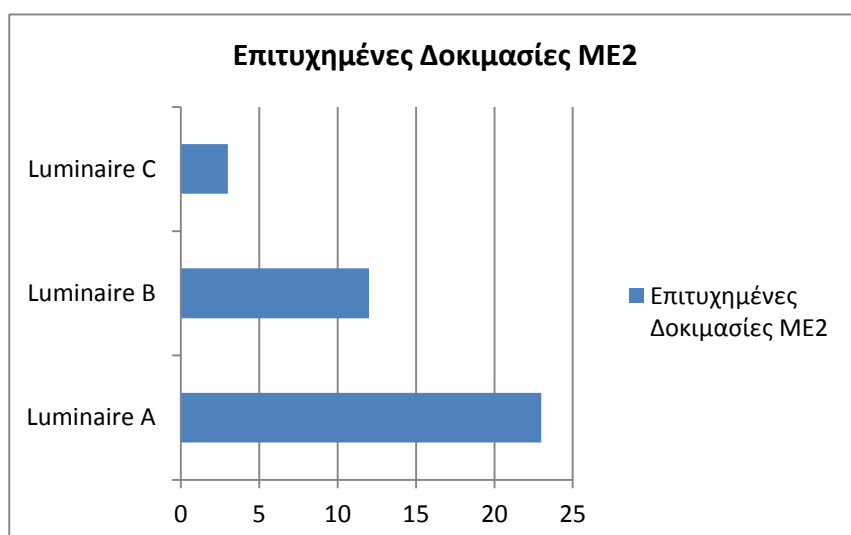


Πίνακας 9-19 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού C για την κατηγορία ME2

<b>Luminaire C</b>		3 παρατηρητές			4 παρατηρητές		
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)					
		10	11	12	13	14	15
12m	30	Green	Red	Red	Red	Red	Red
	35	Green	Red	Red	Red	Red	Red
	40	Green	Red	Red	Red	Red	Red
	45	Red	Red	Red	Red	Red	Red
14m	50	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	60	Red	Red	Red	Red	Red	Red

Η κατηγορία ME2 είναι η πιο απαιτητική κατηγορία φωτισμού που είχαμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Παρατηρούμε ότι οι επιδόσεις των LED είναι μειωμένες σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Να σημειωθεί πως η αδυναμία των LED δεν ήταν θέμα φακών δηλαδή ελλιπούς ομοιομορφίας λαμπρότητας στο οδόστρωμα, αλλά έλλειψης ισχύος.

Αναμένουμε στα επόμενα χρόνια τα LED να είναι ικανά να αντικαταστήσουν τα HPS 400W. Ακόμη η μελέτη της ανάγκης για αύξηση της τιμής του συντελεστή συντήρησης από το 0.8, το οποίο θεωρείται υποτιμητικό για την τεχνολογία LED, σε μεγαλύτερες τιμές έτσι ώστε να μην υπερδιαστασιολογούμε τις εγκαταστάσεις φωτισμού είναι επιτακτική.



Διάγραμμα 9.5 Ο αριθμός των επιτυχημένων προσομοιώσεων σε σύγκριση για κάθε φωτιστικό LED

B) Διάταξη φωτιστικών και στις δυο πλευρές αντικριστά

Πίνακας 9-20 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού A για την κατηγορία ME2

<b>Luminaire A</b>		3 παρατηρητές				4 παρατηρητές	
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)					
		10	11	12	13	14	15
12m	30						
	35						
	40						
	45						
14m	50						
	60						

Πίνακας 9-21 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού B για την κατηγορία ME2

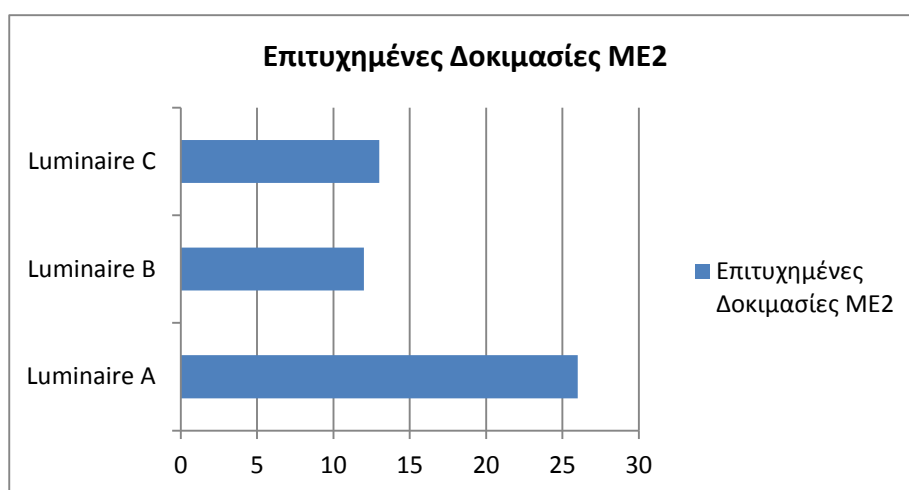
<b>Luminaire B</b>		3 παρατηρητές				4 παρατηρητές	
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)					
		10	11	12	13	14	15
12m	30						
	35						
	40						
	45						
14m	50						
	60						

Πίνακας 9-22 Χάρτης αποτελεσμάτων φωτιστικού C για την κατηγορία ME2

<b>Luminaire C</b>		3 παρατηρητές				4 παρατηρητές	
Ύψος Ιστού(m)	Απόσταση Ιστών(m)	Πλάτος Δρόμου(m)					
		10	11	12	13	14	15
12m	30						
	35						
	40						
	45						
14m	50						
	60						

Με την διάταξη B οι επιδόσεις των φωτιστικών αυξήθηκαν σε μεγάλο βαθμό και φαίνεται να είναι πιο αποδοτικός τρόπος εγκατάστασης φωτιστικών για αυτοκινητόδρομους από άποψη φωτισμού. Ωστόσο τα κόστη για την διάταξη B είναι μεγαλύτερα καθώς έχουμε περισσότερους ιστούς. Για τις μετρήσεις στην κατηγορία ME2 αξίζει να αναφερθεί ότι στις απαιτητικές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν φωτιστικά με θερμοκρασίες χρώματος 5700K λόγω μεγαλύτερης απόδοσης. Αυτό

αφορά τα φωτιστικά Α τα οποία είχαν την καλύτερη επίδοση και σε αυτήν την κατηγορία και γενικότερα.

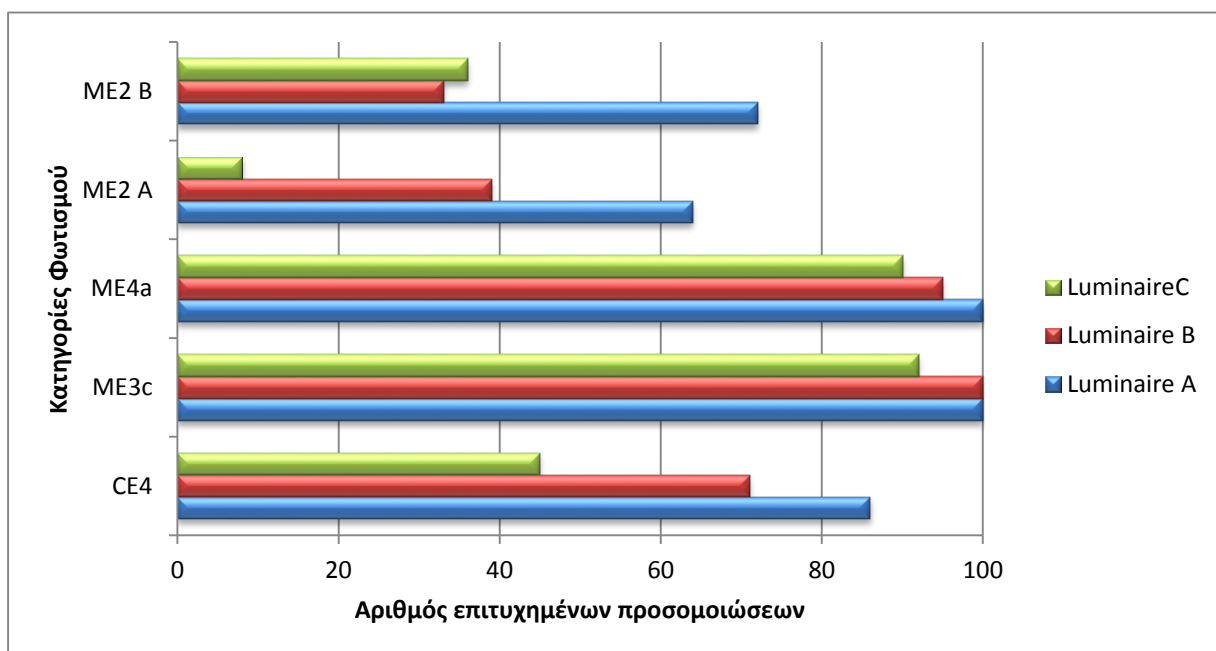


Διάγραμμα 9.6 Ο αριθμός των επιτυχημένων προσομοιώσεων σε σύγκριση για κάθε φωτιστικό LED

Έχοντας παρουσιάσει τους χάρτες αποτελεσμάτων των τριών φωτιστικών για κάθε κατηγορία φωτισμού καλύψαμε ένα εύρος 212 πιθανών συνδυασμών διαστάσεων, πλάτους και απόστασης ιστών, για συγκεκριμένα ύψη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε πιο συγκεντρωτική μορφή είναι τα εξής:

Πίνακας 9-23 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα επίδοσης φωτιστικών LED A,B,C

Κατηγορία Φωτισμού	Αρ. Δοκιμασιών	Διάταξη Ιστών	Επιτυχία Φωτιστικών A (%)	Επιτυχία Φωτιστικών B(%)	Επιτυχία Φωτιστικών C (%)	Επιτυχία Φωτιστικών LED
CE4	49	Μονόπλευρη	86	71	45	42
ME3c	49	Χιαστί	100	100	92	49
ME4a	42	Διπλή Διάταξη	100	95	90	42
ME2	36	Διπλή στις 2 πλευρές	64	39	8	23
	36	Στη Διαχωριστική Νησίδα	72	33	36	26
<b>Σύνολο</b>	212		183	150	121	183
Επιτυχία %			86,3	70,8	57,1	86,3



Διάγραμμα 9.7 Συγκεντρωτικό διάγραμμα επιδόσεων φωτιστικών LED A,B,C

Από τα αποτελέσματα διακρίνουμε ότι τα φωτιστικά A έχουν την δυνατότητα να καλύψουν το μεγαλύτερο εύρος πιθανών τύπων δρόμων και συγκεκριμένα το 86.3% των πιθανών συνδυασμών που δοκιμάστηκαν. Τα φωτιστικά B ανταπεξήλθαν στο 70.8% των δοκιμασιών, ενώ τα φωτιστικά C στο 57.1%

Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι η δυνατότητες των LED ποικίλουν και η εφαρμογή τους σε μια εγκατάσταση φωτισμού πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά. Ωστόσο έχουν την δυνατότητα να καλύψουν το μεγαλύτερο μέρος των απαιτήσεων .

### Γενικές Παρατηρήσεις

- ✓ Μελετώντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε πως τα φωτιστικά LED, ανεξαρτήτως εταιρίας, ανταπεξήλθαν στο 86.3% των περιπτώσεων που δοκιμάστηκαν. Οι θερμοκρασίες χρώματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θερμές αποχρώσεις του λευκού στο 95% των περιπτώσεων [3000K, 4100K], με μόνη εξαίρεση όπως αναφέρθηκε οι περιπτώσεις των μεγάλων δρόμων σε απόσταση ιστών 60m (κατηγορία ME2).

- ✓ Σκοπός των δοκιμασιών που έγιναν με προσομοιώσεις στο ηλεκτρονικό πρόγραμμα Relux, ήταν να γίνει μια μικρή αποτίμηση των δυνατοτήτων των φωτιστικών LED που κυκλοφορούν αυτή την στιγμή στην ελληνική αγορά.
- ✓ Οι υπολογισμοί έγιναν με τα φωτομετρικά δεδομένα των κατασκευαστών και δεν έχουν εξακριβωθεί στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.
- ✓ Έγινε προσπάθεια για την κάλυψη όλων των ρεαλιστικών συνδυασμών των παραμέτρων
- ✓ Η αποδοχή ή όχι μιας προσομοίωσης είχε παράθυρο +/- 10% από τα αναγραφόμενα όρια στα εκάστοτε φωτομετρικά δεδομένα.

### **9.5 Τεχνολογία LED και εξοικονόμηση ενέργειας σε τυπικές περιπτώσεις δρόμων-Σύγκριση με φωτιστικά HPS-HID**

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάσαμε το 1<sup>ο</sup> σημαντικό σκέλος των αποτελεσμάτων, τους χάρτες δυνατοτήτων όπως τους ονομάσαμε, για κάθε κατηγορία φωτισμού ξεχωριστά. Οι χάρτες μας δείχνουν το κατά πόσο είναι ικανά τα φωτιστικά LED να καλύψουν τις εκάστοτε απαιτήσεις που τους τέθηκαν.

Αυτό που δεν έγινε φανερό στην προηγούμενη παράγραφο, μέσω των χαρτών, είναι το ποσοστό της πιθανής εξοικονομούμενης ενέργειας, δηλαδή ενεργειακού και οικονομικού οφέλους που προκύπτει από την υιοθέτηση της τεχνολογίας LED έναντι της συμβατικής τεχνολογίας φωτιστικών HPS HID.

Στις επόμενες σελίδες θα παρουσιάσουμε τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας που προκύπτουν για κάθε κλάση φωτισμού ξεχωριστά. Αξίζει να τονιστεί πως η μελέτη εξοικονόμησης και σύγκρισης των LED με τα HPS-HID έγινε για τους τυπικούς δρόμους κάθε κατηγορίας φωτισμού, όπως αυτοί έχουν ορισθεί στην παράγραφο 9.3

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με αυτή της δημιουργίας των χαρτών δυνατοτήτων. Για κάθε κατηγορία φωτισμού, δηλαδή διαφορετικές φωτομετρικές απαιτήσεις, βρήκαμε το κατάλληλο HPS φωτιστικό από τον κατάλογο της εταιρίας Philips και το συγκρίναμε με το αντίστοιχο LED και των τριών εταιριών.

Στους πίνακες που ακολουθούν οι ισχύεις όλων των φωτιστικών είναι κανονικοποιημένες στην ισχύ του φωτιστικού HPS HID. Οι δοκιμές έγιναν με το πρόγραμμα Relux.

### 9.5.1 Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατηγορία φωτισμού CE4

Έχοντας ορίσει τις τυπικές διαστάσεις δρόμου για την κατηγορία CE4, αναζητούμε το HPS HID φωτιστικό που πληροί τις απαιτήσεις φωτισμού. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας

Πίνακας 9-24 Εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση LED A,B,C για τυπικό δρόμο CE4

Luminaire	Ισχύς(W)	Ισχύς (%)	Απόδοση (lm/W)	Θερμοκρασία χρώματος(K)	CRI	Εξοικονόμηση ενέργειας(%)
HPS	80	100	61	1750	25	-
LED A	47	59	91	3000	>80	41
LED B	54	68	69	4000	>80	32
LED C	45	56	91	3000	>80	44

Η κατανάλωση ενέργειας των διάφορων τύπων LED ποικίλει. Η κατανάλωση ενέργειας των φωτιστικών A,C είναι σχεδόν ίδια και το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας είναι 44% για το φωτιστικό C και 41% για το φωτιστικό A. Το φωτιστικό B παρατηρούμε ότι εκπέμπει με σημαντικά μικρότερη απόδοση την φωτεινή ροή και το ποσοστό εξοικονόμησης είναι μικρότερο κατά 10%, δηλαδή 32%.

Σε παρόμοια επίπεδα είναι και η εξοικονόμηση ενέργειας για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς του χάρτη αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης κατηγορίας. Επομένως η μέση εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται είναι της τάξης του 39%

### 9.5.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατηγορία φωτισμού ME3c

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια με αυτή της προηγούμενης κατηγορίας. Τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της τεχνολογίας LED φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα

Πίνακας 9-25 Εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση LED A,B,C για τυπικό δρόμο ME3c

Luminaire	Ισχύς(W)	Ισχύς (%)	Απόδοση (lm/W)	Θερμοκρασία χρώματος(K)	CRI	Εξοικονόμηση ενέργειας(%)
HPS	80	100	61	1750	25	-
LED A	47	59	91	3000	>80	41
LED B	54	68	69	4000	>80	32
LED C	46	58	91	3000	>80	42

Τα αποτελέσματα για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι παρόμοια με αυτά της κλάσης φωτισμού CE4. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια φωτιστικά A,B,C. Η διάταξη σε

γιαστί επιτρέπει την χρήση μικρής ισχύος φωτιστικών, καθώς επιτυγχάνονται εύκολα επίπεδο λαμπρότητας και ομοιομορφίες. Συγκεκριμένα τα φωτιστικά A,C έχουν την ίδια ισχύ, 59% και 58% αντίστοιχα. Το φωτιστικό B έχει ισχύ 68%

Η μέση εξοικονόμηση ενέργειας που αναμένεται για αυτή την κατηγορία είναι της τάξης του 38% με την διακύμανση να κυμαίνεται σε μικρά επίπεδα, καθιστώντας την μέση εξοικονόμηση ενέργειας αξιόπιστη.

### **9.5.3 Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατηγορία φωτισμού ME4a**

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτή την κλάση φωτισμού αναμένουμε να είναι του ίδιου επιπέδου, διότι οι αλλαγές δεν είναι σημαντικές στις φωτομετρικές απαιτήσεις. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

*Πίνακας 9-26 Εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση LED A,B,C για τυπικό δρόμο ME4a*

Luminaire	Ισχύς(W)	Ισχύς (%)	Απόδοση (lm/W)	Θερμοκρασία χρώματος(K)	CRI	Εξοικονόμηση ενέργειας(%)
HPS	114	100	76	1750	25	-
LED A	60	53	94	3000	>80	47
LED B	80	70	81	4000	>80	30
LED C	64	56	88	3000	>80	44

Η μέση εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση φωτιστικών τεχνολογίας LED είναι 40%. Τα φωτιστικά A, C είναι της ίδιας ισχύος περίπου 53% και 56% σε σχέση με την ισχύ του HPS. Το φωτιστικό B έχει μικρότερη απόδοση και ως εκ τούτου έχει μεγαλύτερη ισχύ, 70%.

Η εξοικονόμηση ενέργειας όσον αφορά τον χάρτη δυνατοτήτων κινείται στα ίδια ποσοστά με μικρές αποκλίσεις. Ο μελέτη του τυπικού δρόμου δίνει μια γενική εικόνα όλου του χάρτη.

### **9.5.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στην κατηγορία φωτισμού ME2**

Η κατηγορία ME2 είναι η πιο απαιτητική κατηγορία φωτισμού που εξετάστηκε. Η επίδοση των φωτιστικών LED ήταν η πιο περιορισμένη σε σχέση με τις λοιπές κατηγορίες. Εξετάστηκαν δυο περιπτώσεις ME2 και ο διαχωρισμός βασίστηκε στην διάταξη των ιστών των φωτιστικών.

Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση έχουμε διάταξη στο κέντρο της νησίδας, ενώ στην 2<sup>η</sup> περίπτωση έχουμε τοποθέτηση των ιστών και στις δυο πλευρές του δρόμου αντικριστά. Τα αποτελέσματα της εξοικονόμησης ενέργειας για την κάθε κατηγορία φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες:

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις τα νούμερα είναι κανονικοποιημένα με βάση την ισχύ του συμβατικού λαμπτήρα HPS HID.

Πίνακας 9-27 Εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση LED A,B,C για τυπικό δρόμο ME2(A)

<u>Διάταξη στο κέντρο της νησίδας</u>						
Luminaire	Ισχύς(W)	Ισχύς (%)	Απόδοση (lm/W)	Θερμοκρασία χρώματος(K)	CRI	Εξοικονόμηση ενέργειας(%)
HPS	169	100	79	1750	25	-
LED A	143	85	92	3000	>80	15
LED B	189	112	72	4000	>80	-12
LED C	119	71	98	3000	>80	29

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτήν την κατηγορία φωτισμού είναι αρκετά περιορισμένη. Μάλιστα το φωτιστικό B έχει ισχύ μεγαλύτερη από αυτήν του συμβατικού φωτιστικού κατά 12%. Το φωτιστικό A πετυχαίνει εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 15%, ενώ το φωτιστικό C επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ποσοστό εξοικονόμησης που κυμαίνεται στο 29%.

Πίνακας 9-28 Εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση LED A,B,C για τυπικό δρόμο ME2 (B)

<u>Διάταξη και στις δυο πλευρές αντικριστά</u>						
Luminaire	Ισχύς(W)	Ισχύς (%)	Απόδοση (lm/W)	Θερμοκρασία χρώματος(K)	CRI	Εξοικονόμηση ενέργειας(%)
HPS	276	100	94	1750	25	-
LED A	171	62	92	4000	>70	38
LED B	245	89	70	4000	>80	11
LED C	178	64	87	3000	>80	36

Τα ποσοστά εξοικονόμησης με αυτή την διάταξη αυξάνονται σε σχέση με την προηγούμενη διάταξη για την κατηγορία ME2. Συγκεκριμένα, τα φωτιστικά A,C έχουν παρόμοια απόδοση και η εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν είναι 38% και 36% αντίστοιχα. Το φωτιστικό B, έχει χαμηλότερη απόδοση και η ενέργεια που εξοικονομεί είναι της τάξης του 11%.



Γενικότερα θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι προσπαθήσαμε να βρούμε τις βέλτιστες περιπτώσεις με τις, κατά το δυνατόν, χαμηλότερες θερμοκρασίες χρώματος. Ωστόσο θα πρέπει να εξεταστεί η χρήση υψηλότερων θερμοκρασιών χρώματος για αυτή την κατηγορία καθώς μεσοπικά θα είχαμε πιο καλή οπτική απόδοση και η απόδοση των LED θα ήταν πιο υψηλή σε lm/W.

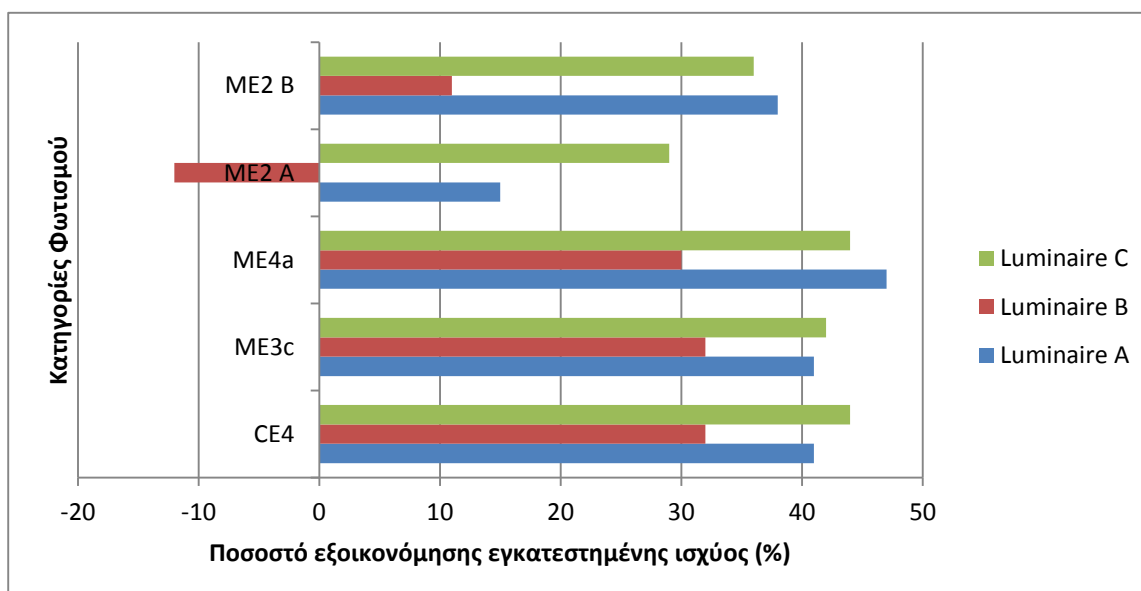
#### 9.5.4 Συγκεντρωτική παρουσίαση εξοικονόμησης ενέργειας με φωτιστικά LED

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζουμε συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα της αξιολόγησης ως προς την ικανότητα εξοικονόμησης ενέργειας των φωτιστικών LED σε σύγκριση με φωτιστικά HPS-HID.

Πίνακας 9-29 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση LED A,B,C

Κατηγορία Φωτισμού	Διάταξη	Εξοικονόμηση Φωτιστικών A(%)	Εξοικονόμηση Φωτιστικών B(%)	Εξοικονόμηση Φωτιστικών C (%)	Μέση Εξοικονόμηση Κατηγορίας(%)
CE4	Μονόπλευρη	41	32	44	39
ME3c	Χιαστή	41	32	42	38
ME4a	Διπλή Διάταξη	47	30	44	40
ME2	A) Διπλή στις 2 πλευρές	15	-12	29	11
	B) Στη Διαχωριστική Νησίδα	38	11	36	28
Μέση Εξοικ. Τύπου LED		36	19	39	

Η μέση εξοικονόμηση ενέργειας για το φωτιστικό τύπου A είναι 36% για το φωτιστικό τύπου B είναι 19% και για το φωτιστικό τύπου C είναι 39%. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάστηκε στην κατηγορία ME4a, διότι η



Διάγραμμα 9.8 Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας σε συγκεντρωτική μορφή

διάταξη που εφαρμόστηκε επιτρέπει την ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύ. Συγκεκριμένα για την κατηγορία CE4 είχαμε μέση εξοικονόμηση ισχύος 39% , για την ME3c 38% και για την ME4a 40%. Στην κατηγορία ME2 είχαμε τα χαμηλότερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας και αυτό διότι έχει τις πιο απαιτητικές φωτομετρικές απαιτήσεις. Στην περίπτωση αυτή φάνηκε ότι τα LED που κυκλοφορούν δεν είναι σε θέση από άποψη ισχύος και απόδοσης να καλύψουν τις απαιτήσεις. Η μέση εξοικονόμηση εγκατεστημένης ισχύος ανήλθε σε 11% για την διάταξη A και 28% για την διάταξη B. Μάλιστα το φωτιστικό B με την διάταξη A είχε κατά 12% μεγαλύτερη ισχύ από το συμβατικό φωτιστικό HPS.

Η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος και κατά συνέπεια καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κινείται στα επίπεδα του 35-40%, με βάση τις καλύτερες επιδόσεις των φωτιστικών A,C. Αξίζει να σημειωθεί πως τα δεδομένα αυτά αλλάζουν, ίσως και σε τριμηνιαία βάση, λόγω της συνεχούς εξέλιξης των προϊόντων SSL όσον αφορά την απόδοση (efficacy).

## **9.6 Περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση της ενοποιημένης φωτομετρίας.**

Ενδιαφέρουσα προέκταση της μελέτης εξοικονόμησης ενέργειας στον οδοφωτισμό με χρήση της τεχνολογίας LED θα ήταν η ενσωμάτωση της ενοποιημένης φωτομετρίας στις μετρήσεις που διεξήχθησαν.

Η ενοποιημένη φωτομετρία ή μεσοπική φωτομετρία όπως αλλιώς συναντάται εκμεταλλεύεται καλύτερα το φάσμα εκπομπής των LED διότι έχει ως συνάρτηση ευαισθησίας την μεσοπική. Έτσι, με την χρήση της μεσοπικής φωτομετρίας τα LED θα είχαν μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τα HPS λόγω του πιο μετατοπισμένου προς τα αριστερά φάσματος τους

Βέβαια όπως αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο υπάρχει έντονη διαμάχη για το επίπεδο της επιτρεπόμενης θερμοκρασίας χρώματος που θα πρέπει ένας άνθρωπος να εκτίθεται κατά την διάρκεια της νύκτας. Όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο πιο υψηλός είναι ο δείκτης S/P και τόσο πιο μεγάλη είναι η απόδοση των LED μεσοπικά.

Ας πάρουμε το παράδειγμα ενός LED 4100K. Κατά προσέγγιση ένα τέτοιας θερμοκρασίας LED έχει δείκτη S/P περίπου 1.50. Σε ένα δρόμο κατηγορίας φωτισμού

ME4a όπου το επίπεδο λαμπρότητας είναι στα μεσαία μεσοπικά επίπεδα λαμπρότητας από τους πίνακες MOVE προκύπτει ότι η μεσοπική λαμπρότητα είναι υψηλότερη από την φωτοπική. Έτσι εάν εφαρμόζαμε όρια μεσοπικής φωτομετρίας, δηλαδή απαιτούσαμε η μεσοπική λαμπρότητα να είναι 0.75 και όχι η φωτοπική, θα είχαμε ένα 5-10% εξοικονόμηση ισχύος από αυτή και μόνο την αλλαγή.

Θα πρέπει να ευρεθεί μια γραμμή ισορροπίας, ένα ανώτατο όριο για την ψυχρότητα του φάσματος εκπομπής, έτσι ώστε οι επιπτώσεις στην υγεία να είναι οι ελάχιστες αποδεκτές και ύστερα να εξεταστεί η προοπτική εξοικονόμησης ενέργειας που προκύπτει από την αξιοποίηση της «μπλε φωτεινής ροής» μέσω της ενοποιημένης φωτομετρίας.

Βέβαια η παρούσα ανάλυση δεν έχει καλυφθεί στην διπλωματική εργασία, ωστόσο θα αποτελούσε μια ενδιαφέρουσα προέκταση.

### **9.7 Οικονομική ανάλυση μιας εγκατάστασης συστήματος φωτισμού**

Οι οικονομικοί παράμετροι που αφορούν ένα σύστημα φωτισμού και την βιωσιμότητα του μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Αυτές αφορούν άμεσες και έμμεσες δαπάνες που θα απαιτηθούν καθ' όλη την διάρκεια ζωής του συστήματος. Μπορούμε να διαχωρίσουμε λοιπόν τις εξής κατηγορίες δαπάνης:

- ✓ Το αρχικό κόστος επένδυσης, αφορά το ποσό των χρημάτων που είναι απαραίτητα για να εγκατασταθεί το σύστημα φωτισμού. Αυτό αφορά έξοδα για αγορά ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, καλωδίων, ιστών, εργατικών και φυσικά φωτιστικών.
- ✓ Το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας, αφορά το ποσό των χρημάτων που θα δαπανούνται σε βάθος χρόνου για την ηλεκτρική ενέργεια. Εξαρτάται από το τιμολόγιο του ενεργειακού παρόχου και από την συνολική εγκατεστημένη ισχύ.
- ✓ Το κόστος συντήρησης, αφορά τα χρήματα που πρέπει να δαπανηθούν για να μπορέσει η εγκατάσταση να λειτουργεί αδιάκοπα. Εξαρτάται από την ποιότητα των φωτιστικών και την διάρκεια ζωής τους.

Ένας δείκτης βιωσιμότητας της επένδυσης για φωτισμό δρόμων πρέπει να είναι ο εκτιμώμενος χρόνος απόσβεσης ( Payback period) και ο δείκτης καθαρής παρούσας αξίας (Net Present Value) καθώς και ο δείκτης επιστροφής κεφαλαίου (ROI).

Ο δείκτης ROI ορίζεται ως:

$$ROI = \frac{\text{Κέρδη Επένδυσης} - \text{Έξοδα Επένδυσης}}{\text{Έξοδα Επένδυσης}}$$

Ο δείκτης της Χρονικής Απόσβεσης ορίζεται ως:

$$\text{Payback period} = \frac{\text{Κόστος Επένδυσης}}{\text{Ετήσια Οικονομικά οφέλη}}$$

Ο δείκτης Καθαρής Παρούσας Αξίας ορίζεται ως:

$$NPV = -K_0 + \sum_{t=1}^t \frac{KTP_t}{(1+p)^t}$$

όπου  $K_0$  είναι το αρχικό κόστος της επένδυσης,  $KTP_t$  οι καθαρές ταμειακές ροές ανά έτος και  $p$  το επιτόκιο αναγωγής.

Και οι τρεις παραπάνω δείκτες χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την βιωσιμότητα μιας επένδυσης. Συνήθως αυτός που χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι ο δείκτης της χρονικής απόσβεσης, καθώς είναι ο πιο απλός και εύχρηστος για την κατανόηση των οικονομικών δεδομένων της επένδυσης.

Για να γίνει κατανοητός ο τρόπος υπολογισμού της περιόδου απόσβεσης κεφαλαίου παραθέτουμε δυο παραδείγματα σύγκρισης επένδυσης με φωτιστικά HPSL και LED.

#### Παράδειγμα Α

Έστω δημοτική υπηρεσία που θέλει να αντικαταστήσει τα υπάρχοντα φωτιστικά τεχνολογίας ατμών υδραργύρου 125W. Η δημοτική αρχή σκέφτεται μεταξύ άλλων επιλογών της, να τοποθετήσει φωτιστικά σώματα τεχνολογίας LED. Θα εξετάσουμε την βιωσιμότητα της επένδυσης με τα οικονομικά κριτήρια που αναφέραμε.

Για χάριν του παραδείγματος θεωρούμε ότι τα φωτιστικά απευθύνονται για φωτισμό τυπικών δρόμων CE4. Όπως είδαμε στον τυπικό δρόμο για την κατηγορία CE4 τα

φωτιστικά που είναι κατάλληλα για τον φωτισμό της, είναι 45W φωτιστικά LED τύπου C. Για να υπολογίσουμε τους βασικούς οικονομικούς δείκτες, θα αναλύσουμε το πρόβλημα στις βασικές κατηγορίες δαπάνης:

1. Κόστος Επένδυσης : Τα χρήματα που θα δαπανηθούν αφορούν την αγορά του φωτιστικού. Με βάση το τιμολόγιο του φωτιστικού C το κόστος αγοράς ενός τέτοιου φωτιστικού είναι 352€.

2. Ταμειακές ροές από μείωση κατανάλωσης ενέργειας: Με βάση το τιμολόγιο Γ-4 της ΔΕΗ οι δήμοι πληρώνουν κατά μέσο όρο 0.098795€/kwh. Οι ταμειακές ροές που προκύπτουν από την μείωση της εγκατεστημένης ισχύος είναι:

Η ενέργεια που δαπανούσε ο δήμος με τα φωτιστικά ατμών υδραργύρου είναι  $137 * \frac{4015}{1000} = 550,055 \text{ Kwh}$ . Εάν προχωρήσουμε σε αγορά φωτιστικών LED τότε

η εξοικονομούμενη ηλεκτρική ενέργεια θα είναι  $(1 - \frac{45}{137}) * 550,055 = 369,362 \text{ Kwh}$ . Το αντίστοιχο όφελος σε ευρώ θα είναι 36,491 €/έτος.

3. Εξοδα από συντήρηση της εγκατάστασης:

Με την χρήση φωτιστικών τεχνολογίας LED υποθέτοντας ότι έχουν μέση διάρκεια ζωής 50.000 ώρες, οι αλλαγές στα LED που θα απαιτηθούν είναι 1,6 φορές περίπου. Από το τιμολόγιο της εταιρίας προκύπτει ότι το κόστος αγοράς ενός COB LED είναι 100€. Οπότε τα κόστη συντήρησης για το φωτιστικό LED C είναι  $1,6 * (100 + 25) = 200\text{€}$  ή 10€/έτος. Να σημειωθεί πως το φωτιστικό LED C δεν προβλέπει καθαρισμό στο πλάνο συντήρησης του, διότι είναι πλήρως σφραγισμένο.

Ο δείκτης χρονικής απόσβεσης του κεφαλαίου στην επένδυση σε LED είναι:

$$Payback Period_{LED} = \frac{352}{36,49 - 10} = 13,3 \text{ \acute{e}τη}$$

Ένα ακόμη κριτήριο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι ο δείκτης επιστροφής κεφαλαίου:

$$ROI_{LED} = \frac{36,49 * 20 - 352 - 200}{352 + 200} = 0,322$$

Σαν γενική παρατήρηση μπορούμε να αναφέρουμε ότι οι παραπάνω υπολογισμοί είναι ενδεικτικοί, διότι για την απλούστευση του προβλήματος δεν λάβαμε υπόψη της αύξηση των τιμολογίων της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως επίσης τυχόν ανατιμήσεις στα ανταλλακτικά κ.α. Αυτό που μπορούμε να εξάγουμε με ασφάλεια είναι ότι με την αντικατάσταση των υπαρχόντων φωτιστικών με φωτιστικά τεχνολογίας LED, πετυχαίνουμε σημαντική εξοικονόμηση, ενέργειας, χρημάτων και εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Η αξιολόγηση της επένδυσης της δημοτικής αρχής με το οικονομικό κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας περιλαμβάνει την υποτίμηση του νομίσιματος συναλλαγής, δηλαδή τον πληθωρισμό. Θεωρούμε ως επιτόκιο αναγωγής το 3%. Οπότε με βάση το κριτήριο έχουμε

$$ΚΠΑ = -352 + \sum_{t=1}^{20} \frac{26,49}{(1,03)^t} = 42,104$$

Ο δείκτης αυτός ουσιαστικά φανερώνει εάν η επένδυση είναι κερδοφόρα με προεξοφλημένες τις ταμειακές ροές στο παρόν.

### Παράδειγμα Β

Εστω η δημοτική αρχή ότι θέλει να αντικαταστήσει τα φθαρμένα φωτιστικά της με λαμπτήρες HPS 70W με φωτιστικά τύπου LED. Η δημοτική υπηρεσία έχει ουσιαστικά δύο επιλογές. Είτε να τα αντικαταστήσει απευθείας με LED είτε να αγοράσει καινούργια φωτιστικά HPS τα οποία είναι πιο φθηνά και να πορευθεί με αυτά.

Θα χρησιμοποιήσουμε ξανά το φωτιστικό LED C με τιμή καταλόγου 352€. Θα πρέπει να υπολογίσουμε τα κέρδη που προκύπτουν από την εξοικονόμηση ενέργειας και τα κέρδη που προκύπτουν από την μείωση της συντήρησης της εγκατάστασης φωτισμού. Ακόμη στο πρόβλημα θα πρέπει να προσθέσουμε την τιμή ενός νέου φωτιστικού HPS, η οποία από τον τιμοκατάλογο της Γ.Γ.Δ.Ε είναι 250€ ή 12,5 €/έτος

Εάν υποθέσουμε ότι ένας λαμπτήρας HPS έχει μέση διάρκεια ζωής 24.000 ώρες και το πλάνο επένδυσης μας είναι εικοσαετές, τότε οι λαμπτήρες θα πρέπει να αλλαχτούν περίπου 4 φορές. Από το τιμολόγιο της Γ.Γ.Δ.Ε., το κόστος ενός λαμπτήρα HPSL 70W ανέρχεται σε 19,5€ και ο καθαρισμός ενός φωτιστικού HPSL σε ανάρτηση <8,0μ κοστολογείται με 20€. Ακόμη το κόστος ημερομισθίων και λοιπών εξόδων για

κάθε επίσκεψη αλλαγής λαμπτήρα, θεωρείται 25€ . Το φωτιστικό θα καθαρίζεται ανά 4 χρόνια. Συνολικά το κόστος συντήρησης είναι:

$$3,4 * (19,5 + 25) + 5 * 20 = 251,3 \text{ € ή } 12,6\text{€/έτος}$$

Όπως είδαμε στο παράδειγμα Α το φωτιστικό LED θα έχει συνολικά αναμενόμενα έξοδα συντήρησης 10€ ανά έτος, οπότε το κέρδος που θα έχουμε ανά έτος από την συντήρηση θα είναι 2,6€.

Από την εξοικονόμηση ενέργειας αναμένουμε  $\left(1 - \frac{45}{80}\right) * 80 * \frac{4015}{1000} = 140,525 \text{ Kwh}$  ή  $13,9 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}$  με την υπόθεση ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θα παραμείνει σταθερή.

Οι συνολικές καθαρές ταμειακές ροές που έχουμε είναι  $13,9+2,6+12,5=29\text{€/έτος}$ . Στις ταμειακές ροές συμπεριλάβαμε και τα λεφτά που γλυτώνουμε από την αγορά φωτιστικού HPS εάν κρατούσαμε τα ίδια, διότι η αλλαγή τους μέσα στην εικοσαετία είναι δεδομένη. Στο προηγούμενο παράδειγμα δεν προσθέσαμε αυτού του είδους την δαπάνη στις καθαρές ταμειακές ροές καθώς δεν υπήρχε σενάριο που τα φωτιστικά υδραργύρου θα διατηρούνταν.

Όποτε η περίοδος χρονικής απόσβεσης είναι :

$$Payback Period_{LED} = \frac{352}{29} = 12,1 \text{ έτη}$$

και ο δείκτης απόσβεσης κεφαλαίου είναι :

$$ROI_{LED} = \frac{29 * 20 - 352}{352} = 0,6477$$

Ο δείκτης Καθαρής Παρούσας Αξίας είναι :

$$ΚΠΑ = -352 + \sum_{t=1}^{20} \frac{16,5}{(1,03)^t} = 79,447$$

Επομένως διαπιστώνουμε πως η επένδυση σε φωτιστικά LED είναι επικερδής για την δημοτική αρχή. Την επιλογή αγοράς φωτιστικών HPS την ενσωματώσαμε στο πρόβλημα μέσω των ταμειακών ροών. Εξάλλου δεν έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτή την περίπτωση διότι θα τα αντικαθιστούσαμε εν νέου με τον ίδιο λαμπτήρα.





## **10 Συμπεράσματα- προοπτικές για την χρήση των LED στον φωτισμό δρόμων**

Τα LED είναι η νέα τεχνολογία που θα εδραιωθεί στην βιομηχανία φωτισμού τα επόμενα χρόνια. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας LED στα φωτιστικά δρόμου προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα αλλά η χρήση της πρέπει να γίνεται με σωστή μελέτη και όχι για ευκαιριακούς λόγους. Η αντιμετώπιση των LED θα πρέπει να μην καταλήξει να είναι λογιστική, εννοώντας το πόσο που αυτά εξοικονομούν σε ενέργεια αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τις άλλες προοπτικές που ανοίγουν στην βέλτιστη σχεδίαση ενός συστήματος φωτισμού δρόμου.

Σε αυτήν την εργασία ασχοληθήκαμε με το να εξετάσουμε τις τωρινές δυνατότητες των φωτιστικών LED που υπάρχουν στην ελληνική αγορά. Επιλέξαμε τρία φωτιστικά που εμπορεύονται στην Ελλάδα , και τα υποβάλαμε σε προσομοιώσεις για διάφορους τύπους δρόμων και κατηγορίες φωτισμού. Οι κατηγορίες φωτισμού που επιλέξαμε ήταν τέσσερις. Η CE4 ,ME3c, ME4a και η ME2. Αυτές οι κατηγορίες κατά EN 13201 έχουν διαφορετικές φωτομετρικές απαιτήσεις εξατομικευμένες αποκλειστικά στο υπό μελέτη τμήμα δρόμου.

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε ένα συμπέρασμα των δυνατοτήτων των φωτιστικών LED, ορίσαμε τυπικούς δρόμους ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, για κάθε κατηγορία φωτισμού. Στην συνέχεια, για να δημιουργήσουμε τους χάρτες αποτελεσμάτων, επεκτείναμε τους δρόμους. Αυξήσαμε το πλάτος τους και την απόσταση των ιστών των φωτιστικών. Πραγματοποιήσαμε μια ανάλυση ευαισθησίας, και βρήκαμε μέχρι ποιο όριο πλάτους και απόστασης ιστών για δεδομένα ύψη, είναι τα LED ικανά να πληρούν τις απαιτήσεις κατά το πρότυπο EN 13201. Τα αποτελέσματα τα συνοψίσαμε στους πίνακες αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 9.

Στην συνέχεια, έχοντας μια εικόνα για το εύρος δυνατοτήτων των LED, θελήσαμε να διαπιστώσουμε την πραγματική εξοικονόμηση ενέργειας που αυτά προσφέρουν. Έτσι στους ίδιους δρόμους τα συγκρίναμε με φωτιστικά τεχνολογίας HPSL και είδαμε το ποσοστό εξοικονόμησης που προσφέρουν. Η μελέτη εξοικονόμησης εγκατεστημένης ισχύος και κατά συνέπεια ενέργειας, έγινε για όλες τις κατηγορίες φωτισμού.

Τα αποτελέσματα για το εύρος δυνατοτήτων των LED που κυκλοφορούν στην ελληνική αγορά είναι ικανοποιητικά. Κατά μέσο όρο τα φωτιστικά τεχνολογίας LED κάλυψαν το 71,4% των περιπτώσεων δρόμων που τους τέθηκε ως δοκιμασία.

Συγκεκριμένα κατά μέσο όρο το LED A είχε τις μεγαλύτερες επιδόσεις με ποσοστό 86,3%, το LED B με 70,8% και το LED C με 57,1%. Να σημειωθεί πως τα ποσοστά αυτά διαμορφώθηκαν από την υπάρχουσα τεχνολογία η οποία αλλάζει με ταχείς ρυθμούς.

Όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν σε σχέση με την τεχνολογία HPSL, αυτή κυμαίνεται κατά μέσο όρο στο 31,2 % και για τα τρία φωτιστικά. Κατά μέσον όρο για όλες τις κατηγορίες φωτισμού, το LED A πέτυχε εξοικονόμηση της τάξης του 36% , το LED B 19% και το LED C 39%.

Η ικανότητα των φωτιστικών να επιτύχουν τις φωτομετρικές απαιτήσεις των πιθανών γεωμετρικών συνδυασμών, θα μπορούσαμε να πούμε ότι βασίστηκε στο μεγαλύτερο ποσοστό στην σχεδίαση των οπτικών τους συστημάτων. Εκτός από τους αυτοκινητόδρομους με μεγάλη απόσταση ιστών και πλάτος, καθώς και υψηλές απαιτήσεις σε λαμπρότητα που φάνηκε ότι η τεχνολογία SSL θέλει ακόμη εξέλιξη στην ενεργειακή απόδοση, οι άλλες περιπτώσεις απαιτούσαν την ανάγκη εξατομίκευσης των φακών των LED στις εκάστοτε ανάγκες.

Θεωρούμε ότι η τεχνολογία SSL θα πρέπει να θεωρείται η τεχνολογία του μέλλοντος στον φωτισμό, όχι μόνο για την εξοικονόμηση που προσφέρει, αλλά και για την δυνατότητα που προσφέρει σε σχεδιαστές να αναπτύξουν οπτικά συστήματα για την κάθε επιθυμία και ανάγκη. Αν μας επιτρέπεται , θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την αναλογία της ανακάλυψης του τρανζίστορ και τους ορίζοντες που άνοιξε στην επιστήμη των υπολογιστών. Το LED ανοίγει μια νέα δίοδο εκπληκτικών δυνατοτήτων για τον φωτισμό δρόμων και για το φωτισμό γενικότερα.

Αναφερόμενοι στις επιπλέον δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία SSL θα θέλαμε να δώσουμε ορισμένα παραδείγματα των προοπτικών που αυτά προσφέρουν στον τομέα του φωτισμού δρόμων:

Η δυνατότητα των LED να εκπέμπουν σχεδόν στιγμιαία, από την στιγμή που θα τροφοδοτηθούν με ηλεκτρική ισχύ, το εύρος επιλογής που παρέχουν για θερμοκρασίες χρώματος κ.α., τα καθιστά πιο αποδοτικά σε συστήματα κεντρικής διαχείρισης φωτισμού απ' ότι συμβατικές τεχνολογίες λαμπτήρων.

Η εξελικτική τάση που δημιούργησαν τα LED στον τομέα του φωτισμού δρόμων, οδηγεί στην δημιουργία των έξυπνων αυτοκινητόδρομων. Σε συνδυασμό με τα διασυνδεδεμένα πλέον αυτοκίνητα και τα συστήματα δορυφορικής παρακολούθησης

τα LED συμβάλλουν στην δημιουργία ενός αυτοκινητόδρομου που θα φωτίζεται ανάλογα με τις εκάστοτε κυκλοφοριακές ανάγκες.

Με το σύστημα κεντρικής διαχείρισης ELMS (Electrical and Lighting Management System) ο φωτισμός στους δρόμους ενδέχεται να αλλάξει ριζικά. Τα επίπεδα λαμπρότητας του δρόμου θα μεταβάλλονται συνεχώς για να καλύψουν τις ανάγκες των οδηγών που κυκλοφορούν εκείνη την στιγμή. Ακόμα σε συνθήκες μη χρησιμοποίησης του δρόμου τα φώτα θα μπορούν να σβήνουν για ακόμη περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Ένας ακόμη λόγος που το σύστημα κεντρικής διαχείρισης μας βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι η δυνατότητα απαλοιφής της επίδρασης του συντελεστή συντήρησης. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο του φωτισμού δρόμων, συντελεστής συντήρησης χρησιμοποιείται για να υπερ- εκτιμεί την αρχική σχεδίαση έτσι ώστε όταν το σύστημα φωτισμού θα έχει φθαρεί να μπορεί να ανταπεξέρχεται στις απαιτήσεις φωτισμού του δρόμου. Για παράδειγμα όταν έχουμε συντελεστή συντήρησης 0,8 και το επιθυμητό επίπεδο λαμπρότητας είναι  $0,75 \text{ cd/m}^2$ , τότε στην πραγματικότητα ο αρχικός σχεδιασμός προβλέπει ότι το επίπεδο λαμπρότητας θα είναι  $(1/0,8)*0,75= 0,94 \text{ cd/m}^2$ .

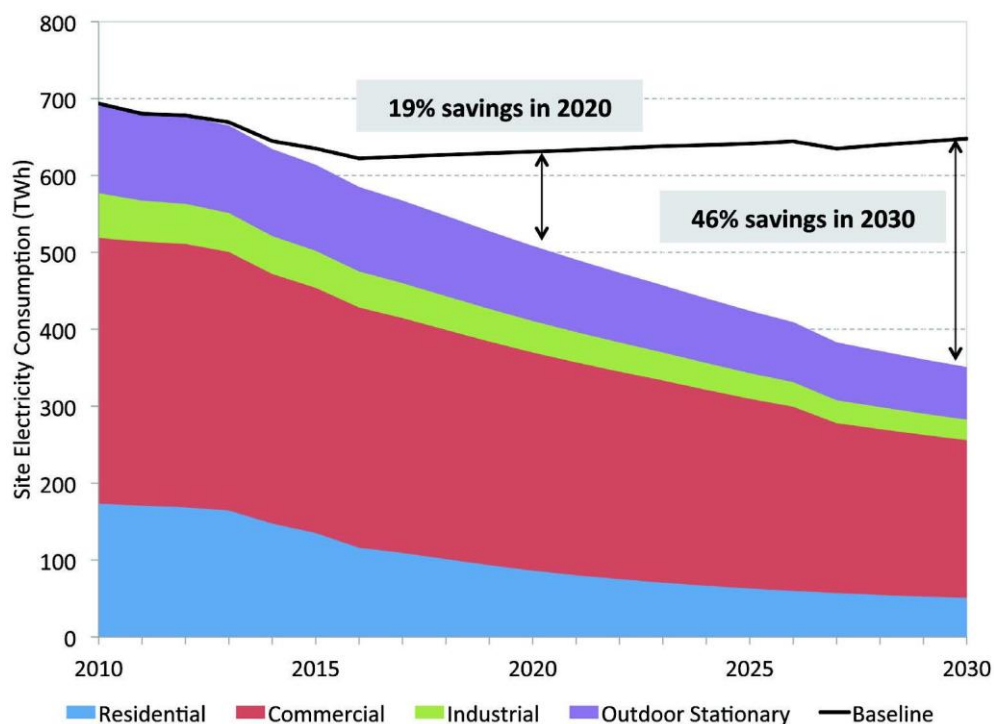
Αντιλαμβανόμαστε ότι υπάρχει ένα 25% περιττό επίπεδο φωτισμού από την αρχή λειτουργίας του συστήματος φωτισμού. Με την χρήση ενός συστήματος ελέγχου, το επίπεδο φωτισμού θα μπορούσε να ρυθμιστεί εξ αρχής στο κανονικό επίπεδο.

Ένα άλλο πλεονέκτημα που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε και να το δούμε ως προοπτική είναι η θερμοκρασία χρώματος των LED. Επειδή όπως είδαμε τα LED εκπέμπουν πιο αριστερά προς τα μικρά μήκη κύματος έχουν κατά βάση πιο ψυχρές αποχρώσεις από τα φωτιστικά HPS.

Το φάσμα εκπομπής τους μπορεί να αξιοποιηθεί με την χρήση της μεσοπικής φωτομετρίας. Υπάρχουν έρευνες που συνδέουν την υψηλή θερμοκρασία χρώματος με καλύτερα αντανακλαστικά και οπτική απόδοση γενικότερα, όσον αφορά την περιφερειακή όραση του ανθρώπου.

Από την άλλη μεριά θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις ιατρικές έρευνες που έχουν δημοσιευθεί και υποστηρίζουν πως η εκπομπή ψυχρού και μετατοπισμένου προς τα αριστερά φάσματος φωτός επιδρά αρνητικά στην υγεία και ιδιαίτερα στην παραγωγή και έκκριση της μελατονίνης.

Συνοψίζοντας θα θέλαμε επιγραμματικά να παραθέσουμε τους στόχους και τις προοπτικές του Αμερικάνικου Υπουργείου Ενέργειας για την εξάπλωση των LED στην τεχνολογία φωτισμού και τα οφέλη που θα προκύψουν από αυτή όσον αφορά την προβλεπόμενη εξοικονόμηση ενέργειας.



Όπως φαίνεται στο σχήμα η πρόβλεψη επισημαίνει ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας LED στην βιομηχανία φωτισμού, θα μειώσει στο μισό την ενέργεια που δαπανάται στις Η.Π.Α. για φωτισμό. Συγκεκριμένα μέχρι το 2020 υπολογίζεται ότι η καταναλισκόμενη για φωτισμό ενέργεια θα έχει μειωθεί κατά 19% και μέχρι το 2030 θα έχει μειωθεί κατά 46%.

Στο εικοσαετές πλάνο 2010-2030 υπολογίζεται ότι η συνολική ενέργεια που θα εξοικονομηθεί θα είναι 2.700 TWh (cumulative energy savings) ή 250 δισεκατομμύρια δολάρια σε σημερινές τιμές ενέργειας. Επιπλέον με την υπόθεση ότι ο τρόπος παραγωγής ενέργειας παραμένει σταθερός για τα επόμενα 20 χρόνια, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θα μειωθούν κατά 1.800 τόνους.

# 11 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακες υπολογισμού συντελεστή μειωμένης λαμπρότητας για όλες τις κατηγορίες οδοστρώματος.

Πίνακας 11-1 Συντελεστής μειωμένης λαμπρότητας για κατηγορία R1, R3

$\beta$ tan $\gamma$	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655	655
0.25	619	619	619	619	610	610	610	610	610	610	610	610	610	601	601	601	601	601	601	601
0.5	539	539	539	539	539	539	521	521	521	521	521	503	503	503	503	503	503	503	503	503
0.75	431	431	431	431	431	431	431	431	431	395	386	371	371	371	371	371	386	395	395	395
1	341	341	341	341	323	323	305	296	287	287	278	269	269	269	269	269	278	278	278	278
1.25	269	269	269	260	251	242	224	207	198	189	189	180	180	180	180	189	198	207	224	224
1.5	224	224	224	215	198	180	171	162	153	148	144	144	139	139	139	144	148	153	162	180
1.75	189	189	189	171	153	139	130	121	112	108	103	99	99	103	108	112	121	130	139	139
2	162	162	157	135	117	108	99	94	90	85	85	83	84	84	86	90	94	99	103	111
2.5	121	121	117	95	79	66	60	57	54	52	51	50	51	52	54	58	61	65	69	75
3	94	94	86	66	49	41	38	36	34	33	32	31	31	33	35	38	40	43	47	51
3.5	81	80	66	46	33	28	25	23	22	22	21	21	22	22	24	27	29	31	34	38
4	71	69	55	32	23	20	18	16	15	14	14	14	15	17	19	20	22	23	25	27
4.5	63	59	43	24	17	14	13	12	12	11	11	11	12	13	14	14	16	17	19	21
5	57	52	36	19	14	12	10	9.0	9.0	8.8	8.7	8.7	9.0	10	11	13	14	15	16	16
5.5	51	47	31	15	11	9.0	8.1	7.8	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
6	47	42	25	12	8.5	7.2	6.5	6.3	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
6.5	43	38	22	10	6.7	5.8	5.2	5.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
7	40	34	18	8.1	5.6	4.8	4.4	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
7.5	37	31	15	6.9	4.7	4.0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
8	35	28	14	5.7	4.0	3.6	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
8.5	33	25	12	4.8	3.6	3.1	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
9	31	23	10	4.1	3.2	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
9.5	30	22	9.0	3.7	2.8	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
10	29	20	8.2	3.2	2.4	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
10.5	28	18	7.3	3.0	2.2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
11	27	16	6.6	2.7	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
11.5	26	15	6.1	2.4	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
12	25	14	5.6	2.2	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

$Q_0 = 0.10; S1 = 0.25; S2 = 1.53$

a

$\beta$ tan $\gamma$	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390
0.25	411	411	411	411	411	411	411	411	411	411	379	368	357	357	346	346	346	335	335	335
0.5	411	411	411	411	403	403	384	379	370	346	325	303	281	281	271	271	271	260	260	260
0.75	379	379	379	368	357	346	325	303	281	260	238	216	206	206	206	206	208	206	206	206
1	335	335	335	325	292	291	260	238	216	195	173	152	152	152	152	152	141	141	141	141
1.25	303	303	292	271	238	206	184	152	130	119	108	100	103	106	108	108	114	114	119	119
1.5	271	271	260	227	179	152	141	119	108	93	80	76	76	80	84	87	89	91	93	95
1.75	249	238	227	195	152	124	106	91	78	67	61	52	54	58	63	67	69	71	73	74
2	227	216	195	152	117	95	80	67	61	52	45	40	41	45	49	52	54	56	57	58
2.5	195	190	146	110	74	58	48	40	35	30	27	24	26	28	30	33	35	38	40	41
3	160	155	115	67	43	33	26	21	18	17	16	16	17	17	18	21	22	24	26	27
3.5	146	131	87	41	25	18	15	13	12	11	11	11	11	11	12	14	15	17	18	21
4	132	113	67	27	15	12	10	9.4	8.7	8.2	7.9	7.6	7.9	8.7	9.6	11	12	13	15	17
4.5	118	95	50	20	12	8.9	7.4	6.6	6.3	6.1	5.7	5.6	5.8	6.3	7.1	8.4	10	12	13	14
5	106	81	38	14	8.2	6.3	5.4	5.0	4.8	4.7	4.5	4.4	4.8	5.2	6.2	7.4	8.5	9.5	10	11
5.5	96	69	29	11	6.3	5.1	4.4	4.1	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
6	87	58	22	8.0	5.0	3.9	3.5	3.4	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
6.5	78	50	17	6.1	3.8	3.1	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
7	71	43	14	4.9	3.1	2.5	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
7.5	67	38	12	4.1	2.6	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
8	63	33	10	3.4	2.2	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
8.5	58	28	8.7	2.9	1.9	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
9	55	25	7.4	2.5	1.7	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
9.5	52	23	6.5	2.2	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
10	49	21	5.6	1.9	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
10.5	47	18	5.0	1.7	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
11	44	16	4.4	1.6	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
11.5	42	14	4.0	1.5	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
12	41	13	3.6	1.4	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

$Q_0 = 0.07; S1 = 0.58; S2 = 1.80$

b

Πίνακας 11-2 Συντελεστής μειωμένης λαμπρότητας για κατηγορία R1, R3

$\beta$ tan $\gamma$	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294	294
0.25	326	326	321	321	317	312	308	308	303	298	294	280	271	262	258	253	249	244	240	240
0.5	344	344	339	339	326	317	308	298	289	276	262	235	217	204	199	199	199	199	194	194
0.75	357	353	353	339	321	303	285	267	244	222	204	176	158	149	149	149	145	136	136	140
1	362	362	352	326	276	249	226	204	181	158	140	118	104	100	100	100	100	100	100	100
1.25	357	357	348	298	244	208	176	154	136	118	104	83	73	70	71	74	77	77	77	78
1.5	353	348	326	267	217	176	145	117	100	86	78	72	60	57	58	60	60	60	61	62
1.75	339	335	303	231	172	127	104	89	79	70	62	51	45	44	45	46	45	45	46	47
2	326	321	280	190	136	100	82	71	62	54	48	39	34	34	34	35	36	36	37	38
2.5	289	280	222	127	86	65	54	44	38	34	25	23	22	23	24	24	24	24	24	25
3	253	235	163	85	53	38	31	25	23	20	18	15	15	14	15	15	16	16	17	17
3.5	217	194	122	60	35	25	22	19	16	15	13	9.9	9.0	9.0	9.9	11	11	12	12	13
4	190	163	90	43	26	20	16	14	12	9.9	9.0	7.4	7.0	7.1	7.5	8.3	8.7	9.0	9.0	9.9
4.5	163	136	73	31	20	15	12	9.9	9.0	8.3	7.7	5.4	4.8	4.9	5.4	6.1	7.0	7.7	8.3	8.5
5	145	109	60	24	16	12	9.0	8.2	7.7	6.8	6.1	4.3	3.2	3.3	3.7	4.3	5.2	6.5	6.9	7.1
5.5	127	94	47	18	14	9.9	7.7	6.9	6.1	5.7										
6	113	77	36	15	11	9.0	8.0	6.5	5.1											
6.5	104	68	30	11	8.3	6.4	5.1	4.3												
7	95	60	24	8.5	6.4	5.1	4.3	3.4												
7.5	87	53	21	7.1	5.3	4.4	3.6													
8	83	47	17	6.1	4.4	3.6	3.1													
8.5	78	42	15	5.2	3.7	3.1	2.6													
9	73	38	12	4.3	3.2	2.4														
9.5	69	34	9.9	3.8	3.5	2.2														
10	65	32	9.0	3.3	2.4	2.0														
10.5	62	29	8.0	3.0	2.1	1.9														
11	59	26	7.1	2.6	1.9	1.8														
11.5	56	24	6.3	2.4	1.8															
12	53	22	5.6	2.1	1.8															

$Q_0 = 0.07; S1 = 1.11; S2 = 2.38$

c

$\beta$ tan $\gamma$	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264
0.25	297	317	317	317	317	310	304	290	284	277	271	244	231	224	224	218	218	211	211	211
0.5	330	343	343	343	330	310	297	284	277	264	251	218	198	185	178	172	172	165	165	165
0.75	376	383	370	350	330	304	277	251	231	211	198	165	139	132	132	125	125	125	119	119
1	396	396	396	330	290	251	218	198	185	165	145	112	86	86	86	86	86	87	87	87
1.25	403	409	370	310	251	211	178	152	132	115	103	77	66	65	65	63	65	66	67	68
1.5	409	396	356	284	218	172	139	115	100	88	79	61	50	50	50	50	52	55	55	55
1.75	409	396	343	251	178	139	108	88	75	66	59	44	37	37	37	38	40	41	42	45
2	409	383	317	224	145	106	86	71	59	53	45	33	29	29	29	30	32	33	34	37
2.5	396	356	264	152	100	73	55	45	37	32	28	21	20	20	20	21	22	24	25	26
3	370	304	211	95	63	44	30	25	21	17	16	13	12	12	13	13	15	16	17	19
3.5	343	271	165	63	40	26	19	15	13	12	11	9.8	9.1	8.8	8.8	9.4	11	12	13	15
4	317	238	132	45	24	16	13	11	9.6	9.0	8.4	7.5	7.4	7.4	7.5	7.9	8.6	9.4	11	12
4.5	297	211	106	33	17	11	9.2	7.9	7.3	6.6	6.3	6.1	6.1	6.2	6.5	6.7	7.1	7.7	8.7	9.6
5	277	185	79	24	13	8.3	7.0	6.3	5.7	5.1	5.0	5.0	5.1	5.4	5.5	5.8	6.1	6.3	6.9	7.7
5.5	257	161	59	19	9.9	7.1	5.7	5.0	4.6	4.2										
6	244	140	46	13	7.7	5.7	4.8	4.1	3.8											
6.5	231	122	37	11	5.9	4.6	3.7	3.2												
7	218	106	32	9.0	5.0	3.8	3.2	2.6												
7.5	205	94	26	7.5	4.4	3.3	2.8													
8	193	82	22	6.3	3.7	2.9	2.4													
8.5	184	74	19	5.3	3.2	2.5	2.1													
9	174	66	16	4.6	2.8	2.1														
9.5	169	59	13	4.1	2.5	2.0														
10	164	53	12	3.7	2.2	1.7														
10.5	158	49	11	3.3	2.1	1.7														
11	153	45	9.5	3.0	2.0	1.7														
11.5	149	41	8.4	2.6	1.7															
12	145	37	7.7	2.5	1.7															

$Q_0 = 0.08; S1 = 1.55; S2 = 3.03$

d

## Πίνακες MOVE για γρήγορο υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας

S/P	Base light level (photopic luminance (cd/m <sup>2</sup> ))											
	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36
0.25	0.0573	0.0704	0.0849	0.1009	0.1184	0.1373	0.1574	0.1788	0.2012	0.2246	0.2487	0.2736
0.35	0.0728	0.0877	0.1037	0.1209	0.1392	0.1585	0.1787	0.1998	0.2217	0.2442	0.2674	0.2912
0.45	0.0864	0.1026	0.1197	0.1377	0.1565	0.1760	0.1963	0.2172	0.2387	0.2607	0.2831	0.3060
0.55	0.0983	0.1156	0.1335	0.1521	0.1713	0.1911	0.2113	0.2320	0.2532	0.2747	0.2966	0.3188
0.65	0.1092	0.1273	0.1459	0.1649	0.1844	0.2043	0.2245	0.2451	0.2659	0.2871	0.3085	0.3301
0.75	0.1191	0.1379	0.1570	0.1764	0.1961	0.2161	0.2363	0.2567	0.2773	0.2981	0.3190	0.3401
0.85	0.1283	0.1477	0.1672	0.1869	0.2068	0.2268	0.2470	0.2672	0.2876	0.3081	0.3286	0.3492
0.95	0.1368	0.1566	0.1765	0.1965	0.2165	0.2365	0.2566	0.2767	0.2969	0.3170	0.3372	0.3574
1.05	0.1448	0.1651	0.1853	0.2054	0.2255	0.2456	0.2656	0.2856	0.3055	0.3254	0.3452	0.3651
1.15	0.1523	0.1730	0.1935	0.2138	0.2339	0.2540	0.2739	0.2937	0.3135	0.3331	0.3526	0.3721
1.25	0.1593	0.1803	0.2010	0.2215	0.2417	0.2617	0.2816	0.3013	0.3208	0.3402	0.3594	0.3786
1.35	0.1661	0.1873	0.2082	0.2288	0.2491	0.2691	0.2888	0.3084	0.3277	0.3469	0.3658	0.3847
1.45	0.1724	0.1940	0.2150	0.2357	0.2560	0.2759	0.2956	0.3150	0.3341	0.3531	0.3718	0.3903
1.55	0.1785	0.2003	0.2215	0.2422	0.2625	0.2824	0.3020	0.3213	0.3402	0.3590	0.3774	0.3957
1.65	0.1843	0.2063	0.2276	0.2484	0.2687	0.2886	0.3081	0.3272	0.3460	0.3645	0.3827	0.4007
1.75	0.1899	0.2120	0.2335	0.2543	0.2746	0.2944	0.3138	0.3328	0.3514	0.3697	0.3877	0.4054
1.85	0.1952	0.2175	0.2391	0.2599	0.2802	0.3000	0.3193	0.3381	0.3566	0.3747	0.3924	0.4099
1.95	0.2003	0.2228	0.2444	0.2653	0.2856	0.3053	0.3244	0.3432	0.3615	0.3794	0.3969	0.4141
2.05	0.2053	0.2279	0.2496	0.2705	0.2907	0.3103	0.3294	0.3480	0.3661	0.3838	0.4012	0.4182
2.15	0.2100	0.2327	0.2545	0.2754	0.2956	0.3152	0.3341	0.3526	0.3706	0.3881	0.4052	0.4220
2.25	0.2146	0.2374	0.2592	0.2801	0.3003	0.3198	0.3387	0.3570	0.3748	0.3922	0.4091	0.4257
2.35	0.2190	0.2419	0.2637	0.2847	0.3048	0.3242	0.3430	0.3612	0.3789	0.3960	0.4120	0.4291
2.45	0.2233	0.2463	0.2682	0.2891	0.3092	0.3285	0.3472	0.3652	0.3828	0.3998	0.4164	0.4325
2.55	0.2275	0.2505	0.2724	0.2933	0.3134	0.3326	0.3512	0.3691	0.3865	0.4034	0.4198	0.4357
2.65	0.2315	0.2546	0.2765	0.2974	0.3174	0.3366	0.3551	0.3729	0.3901	0.4068	0.4230	0.4388
2.75	0.2354	0.2585	0.2805	0.3014	0.3213	0.3404	0.3588	0.3765	0.3936	0.4101	0.4261	0.4417

Πίνακας 11-3 Υπολογισμός της μεσοπικής λαμπρότητας για διάφορες τιμές συντελεστών S/P



Base light level (photopic luminance (cd/m <sup>2</sup> ))												
S/P	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60
0.25	0.2990	0.3250	0.3514	0.3782	0.4053	0.4327	0.4604	0.4883	0.5164	0.5446	0.5730	0.60
0.35	0.3154	0.3400	0.3650	0.3904	0.4160	0.4419	0.4681	0.4944	0.5210	0.5477	0.5745	0.60
0.45	0.3293	0.3529	0.3768	0.4010	0.4254	0.4500	0.4749	0.4999	0.5251	0.5504	0.5759	0.60
0.55	0.3413	0.3640	0.3870	0.4102	0.4336	0.4571	0.4809	0.5047	0.5287	0.5528	0.5771	0.60
0.65	0.3519	0.3739	0.3961	0.4184	0.4409	0.4635	0.4862	0.5091	0.5320	0.5551	0.5782	0.60
0.75	0.3613	0.3827	0.4042	0.4258	0.4474	0.4692	0.4911	0.5130	0.5350	0.5571	0.5792	0.60
0.85	0.3700	0.3907	0.4116	0.4325	0.4534	0.4745	0.4955	0.5166	0.5378	0.5589	0.5802	0.60
0.95	0.3777	0.3980	0.4182	0.4385	0.4589	0.4792	0.4995	0.5199	0.5403	0.5606	0.5810	0.60
1.05	0.3849	0.4047	0.4244	0.4442	0.4639	0.4836	0.5033	0.5229	0.5426	0.5622	0.5818	0.60
1.15	0.3915	0.4109	0.4301	0.4494	0.4685	0.4876	0.5067	0.5257	0.5447	0.5637	0.5826	0.60
1.25	0.3976	0.4165	0.4354	0.4541	0.4728	0.4914	0.5099	0.5283	0.5467	0.5650	0.5833	0.60
1.35	0.4033	0.4219	0.4403	0.4586	0.4768	0.4949	0.5129	0.5307	0.5486	0.5663	0.5839	0.60
1.45	0.4087	0.4268	0.4449	0.4628	0.4805	0.4981	0.5156	0.5330	0.5503	0.5675	0.5845	0.60
1.55	0.4137	0.4315	0.4492	0.4667	0.4840	0.5012	0.5182	0.5351	0.5519	0.5686	0.5851	0.60
1.65	0.4184	0.4359	0.4532	0.4703	0.4873	0.5040	0.5207	0.5371	0.5534	0.5696	0.5857	0.60
1.75	0.4228	0.4400	0.4570	0.4738	0.4904	0.5067	0.5229	0.5390	0.5549	0.5706	0.5862	0.60
1.85	0.4271	0.4440	0.4606	0.4771	0.4933	0.5093	0.5251	0.5408	0.5562	0.5715	0.5867	0.60
1.95	0.4310	0.4477	0.4640	0.4802	0.4960	0.5117	0.5272	0.5424	0.5575	0.5724	0.5871	0.60
2.05	0.4348	0.4512	0.4673	0.4831	0.4987	0.5140	0.5291	0.5440	0.5587	0.5732	0.5876	0.60
2.15	0.4384	0.4545	0.4703	0.4859	0.5011	0.5162	0.5309	0.5455	0.5599	0.5740	0.5880	0.60
2.25	0.4419	0.4577	0.4733	0.4885	0.5035	0.5182	0.5327	0.5469	0.5610	0.5748	0.5884	0.60
2.35	0.4451	0.4607	0.4760	0.4910	0.5057	0.5202	0.5343	0.5483	0.5620	0.5755	0.5890	0.60
2.45	0.4483	0.4636	0.4787	0.4934	0.5079	0.5220	0.5359	0.5496	0.5630	0.5762	0.5892	0.60
2.55	0.4513	0.4664	0.4813	0.4957	0.5099	0.5238	0.5375	0.5508	0.5639	0.5768	0.5895	0.60
2.65	0.4541	0.4691	0.4837	0.4980	0.5119	0.5255	0.5389	0.5520	0.5649	0.5775	0.5899	0.60
2.75	0.4569	0.4716	0.4860	0.5000	0.5138	0.5272	0.5403	0.5531	0.5657	0.5781	0.5902	0.60



## Πίνακας τιμών συναρτήσεων φασματικής ευαισθησίας

Πίνακας 11-4 Φωτοπική και σκοτοπική συνάρτηση ευαισθησίας. Πίνακας τιμών

$\lambda$ nm	Photopic Luminous Efficiency	Photopic lm / W Conversion	Scotopic Luminous Efficiency	Scotopic lm / W Conversion
380	0.000039	0.027	0.000589	1.001
390	.000120	0.082	.002209	3.755
400	.000396	0.270	.009290	15.793
410	.001210	0.826	.034840	59.228
420	.004000	2.732	.096600	164.220
430	.011600	7.923	.199800	339.660
440	.023000	15.709	.328100	557.770
450	.038000	25.954	.455000	773.500
460	.060000	40.980	.567000	963.900
470	.090980	62.139	.676000	1149.200
480	.139020	94.951	.793000	1348.100
490	.209020	142.078	.904000	1536.800
500	.323000	220.609	.982000	1669.400
507	.444310	303.464	1.000000	1700.000
510	.503000	343.549	.997000	1694.900
520	.710000	484.930	.935000	1589.500
530	.862000	588.746	.811000	1378.700
540	.954000	651.582	.650000	1105.000
550	.994950	679.551	.481000	817.700
555	1.000000	683.000	.402000	683.000
560	.995000	679.585	.328800	558.960
570	.952000	650.216	.207600	352.920
580	.870000	594.210	.121200	206.040
590	.757000	517.031	.065500	111.350
600	.631000	430.973	.033150	56.355
610	.503000	343.549	.015930	27.081
620	.381000	260.223	.007370	12.529
630	.265000	180.995	.003335	5.670
640	.175000	119.525	.001497	2.545
650	.107000	73.081	.000677	1.151
660	.061000	41.663	.000313	0.532
670	.032000	21.856	.000148	0.252
680	.017000	11.611	.000072	0.122
690	.008210	5.607	.000035	.060
700	.004102	2.802	.000018	.030
710	.002091	1.428	.000009	.016
720	.001047	0.715	.000005	.008
730	.000520	0.355	.000003	.004
740	.000249	0.170	.000001	.002
750	.000120	0.082	.000001	.001
760	.000060	0.041		
770	.000030	0.020		

## 12 Βιβλιογραφία

CITIZEN ELECTRONICS. *Heat Dissipation Design*. Yamanashi: CITIZEN ELECTRONICS , 2010.

Anne-Mari Ylinen, Leena Tahka-mo, Marjukka Puolakka, DSc Liisa Halonen. «Road Lighting Quality, Energy Efficiency, and Mesopic Design – LED Street Lighting Case Study.» *LEUKOS*, 2011, JULY εκδ.

ASSIST, Alliance for Solid- State Illumination Systems and Technologies. *Outdoor Lighting: Visual Efficacy*. Lighting Research Center, Rensselaer, 2009.

CELMA. *The importance of lighting. The quality of light. Enhancing life*. Brussels: CELMA, n.d.

*Disano illuminazione* . n.d. [www.disano.it](http://www.disano.it).

Donald K. Carter, Stephen Quick, Stefani Danes, Elise Gatti, Karen Branick. *LED Street Light Research Project*. Pittsburgh: Remaking Cities Institute , 2011.

Eloholma, Marjukka. *Development of visual performance based mesopic photometry*. Espoo: Helsinki University of Technology , 2005.

Fabio Falchi, Pierantonio Cinzano, Christopher D. Elvidge, David M. Keith, Abraham Haim. «Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility.» *Journal of Environmental Management*, 2011, ELSEVIER εκδ.

Fördergemeinschaft Gutes Licht. *LED- Light from the Light Emitting Diode*. Frankfurt: Fördergemeinschaft Gutes Licht, n.d.

Fusheng Li PhD, Yuming Chen PhD, Yang Liu PhD, Dahua Chen. «Comparative In Situ Study of LEDs and HPS in Road Lighting.» *LEUKOS*, 2012, JANUARY εκδ.

Gibbons, Ronald B. «Connected Roadway Lighting- from Evolution to Revolution.» *NEMA electroindustry*, 2013, SEPTEMBER εκδ.

*Google*. n.d. [www.google.com](http://www.google.com).

*Gravanis Lighting* . n.d. [www.lightingdg.com](http://www.lightingdg.com).

IESNA Illuminating Engineering Society of North America. *THE LIGHTING HANDBOOK REFERENCE & APPLICATIONS, Ninth Edition*. New York: IESNA, 2000.

*ILS Innovative LED Lighting Solutions*. n.d. [www.ils.com.gr](http://www.ils.com.gr).

International Dark-Sky Association. *Outdoor Lighting Code Handbook*. Tucson: International Dark Sky Association, 2002.

James Benya, Lisa Hescong, Terry McGowan, Francis Rubinstein. *Advanced Lighting Guidelines*. White Salmon: New Buildings Institute , 2003.

LEDIL. *STRADA Lens Guide*. LEDIL. n.d.

Mary Ashe, Dan Chwastyk, Caroline de Monasterio, Mahima Gupta, Mika Pegors. *2010 U.S. Lighting Market Characterization*. U.S Department of Energy, 2012.

Minchen Wei, Kevin W. Houser. «Status of Solid-State Lighting Based on Entries to the 2010 US DOE Next Generation Luminaire Competition.» *LEUKOS*, 2012, APRIL εκδ.

Navigant Consulting . *Energy Savings Potential of Solid State Lighting in General Illumination Applications 2010 to 2030*. Washington DC : U.S. Department of Energy, 2010.

Paul Lutkevich, Don McLean, Joseph Cheung. *FHWA Lighting Handbook*. New Jersey: Parsons Brinckerhoff, 2012.

*Philips Lighting* . n.d. [www.lighting.philips.gr](http://www.lighting.philips.gr).

Pritchard, D. C. *LIGHTING SIXTH EDITION*. New York: PEARSON Longman, 1999.

*Rensselaer Lighting Research Center*. n.d. [www.lrc.rpi.edu](http://www.lrc.rpi.edu).

Ron Lenk, Carol Lenk. *Practical Lighting Design with LEDs*. Hoboken New Jersey: IEEE Press, 2011.

Ryer, Alex. *Light Measurement Handbook*. Newburyport: International Light , 1999.

- Sarah Laxhmi Chellappa, Roland Steiner, Peter Blattner, Peter Oelhafen, Thomas Gotz, Christian Cajochen. *Non-Visual Effects of Light on Melatonin, Alertness and Cognitive Performance: Can Blue-Enriched Light Keep Us Alert?* Lausanne: Michael H. Herzog, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 2011.
- Taylor, Alma E. F. *Illumination Fundamentals*. Lighting Research Center, Rensselaer, 2000.
- USAID. *Energy Efficient Street Lighting Guidelines*. USAID, 2010.
- Wikipedia. n.d. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).
- Zexin Feng, Yi Luo, Yanjun Han. *Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio*. Optical Society of America, 2010.
- ZUMTOBEL STAFF. *The Lighting Handbook*. ZUMTOBEL STAFF, 2004.
- Βαλσαμάκης, Μάριος Δ. *Φωτισμός Δρόμων και Εξοικονόμηση Ενέργειας*. Αθήνα : ΕΜΠ, 2008.
- Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού. *Τιμές πωλήσεως ηλεκτρικής ενέργειας υπό χαμηλή τάση*. Αθήνα, n.d.
- Έργων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων. *Κοστολόγηση εργασιών ηλεκτροφωτισμού σε δημόσιες εγκαταστάσεις*. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων . Αθήνα , n.d.
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. *ΠΡΑΣΙΝΟ ΒΙΒΛΙΟ Φως στο μέλλον. Επιτάχυνση της εξάπλωσης των καινοτόμων τεχνολογιών φωτισμού*. Βρυξέλες: Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2011.
- Κουτρούλης, Χαράλαμπος Γ. «Φωτορύπανση .» *ΠΕΡΙΣΚΟΠΙΟ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ* , 2002, Δεκέμβριος εκδ.
- Παναγάκος, Παναγιώτης. «Ο οδικός φωτισμός σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13201/2004.» *ΔΕΛΤΙΟ ΠΣΔΜ-Η*, 2007.
- Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Λάμπρος Οικονόμου, Σταυρούλα Κουρτέση. *ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑ*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.

