



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

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΡΓΩΝ ΟΛΟΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ  
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΩΝ  
ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Γεράσιμος-Φίλιππος Γ. Τάντουλος**

Επιβλέπων: Δημήτρης Π. Νικολάου, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Υπεύθυνος καθηγητής: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019





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

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΡΓΩΝ ΟΛΟΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ  
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΩΝ  
ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Γεράσιμος-Φίλιππος Γ. Τάντουλος**

Επιβλέπων: Δημήτρης Π. Νικολάου, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Υπεύθυνος καθηγητής: Φραγκίσκος Β.Τοπαλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Μαρτίου 2018

.....  
Φραγκίσκος Β.Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Φ. Γκόνος

Αναπληρωτής Καθηγητής

.....  
Πάυλος Σ. Γεωργιλιάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2019



.....  
Γεράσιμος-Φίλιππος Γ. Τάντουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός  
και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Γεράσιμος-Φίλιππος Τάντουλος 2019  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος – All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό.

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

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



## *Ευχαριστίες*

*Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Φραγκίσκο Τοπαλή, που με εμπιστεύθηκε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της υλοποίησης της.*

*Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Νικολάου, ηλεκτρολόγο μηχανικό και υποψήφιο διδάκτορα της σχολής καθώς η βοήθεια και η καθοδήγηση του έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συνεχή στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.*





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει μεθόδους αξιολόγησης έργων οδοφωτισμού με δυνατότητα επιλογής των ποιοτικών και ποσοτικών δεικτών ποιότητας του έργου. Για το σκοπό αυτό ένα μεγάλο της εργασίας αφιερώθηκε στον υπολογισμό και την αξιολόγηση εγκαταστάσεων οδοφωτισμού, οι οποίες χαρακτηρίζονταν από διαφορετικούς στόχους κάθε φορά.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στο ορατό φάσμα, στην θερμοκρασία χρώματος, ενώ παράλληλα αναλύονται βασικά μεγέθη του φωτισμού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα φωτιστικά που χρησιμοποιούν φωτεινές πηγές LED, τα οπτικά που χρησιμοποιούνται σε αυτά και τέλος περιγράφονται και οι φωτεινές πηγές νέας τεχνολογίας τύπου OLED.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται η τεχνική έκθεση CEN/TR 13201-1, η οποία περιέχει την μεθοδολογία για τον υπολογισμό των κλάσεων οδοφωτισμού. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια εναλλακτική μέθοδος για τον υπολογισμό των κλάσεων σύμφωνα με το παράρτημα της τεχνικής έκθεσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, συγκρίνονται οι δυο μέθοδοι επιλογής κλάσεων του προηγούμενου κεφαλαίου μέσω τριών διαφορετικών σεναρίων και προκύπτουν αρκετά ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, κρίθηκε σκόπιμο να ερευνηθεί και να παρουσιαστεί ο τρόπος που εφαρμόζεται το ευρωπαϊκό πρότυπο οδοφωτισμού σε διάφορες χώρες της Ευρώπης. Οι ευρωπαϊκές χώρες μέσω ειδικών νόμων ή οδηγιών στον εθνικό οδηγό οδοφωτισμού τους, έχουν εμπλουτίσει τον κοινό ευρωπαϊκό οδηγό που ακολουθούν τα κράτη μέλη.

Το έκτο κεφάλαιο, πραγματεύεται θεωρητικά σε πρώτο στάδιο τα εναλλακτικά σενάρια οδοφωτισμού διαφορετικών στόχων που θα υπολογιστούν στο έβδομο κεφάλαιο. Συνεπώς, παρουσιάζονται, αρχικά, εγκαταστάσεις που επιτρέπουν σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας, στην συνέχεια εξηγείται το φαινόμενο της φωτορύπανσης και τέλος αναλύονται παράγοντες που συμβάλλουν στην οπτική άνεση του χρήστη όπως η θάμβωση και η ομοιομορφία λαμπρότητας. Επίσης, στόχος του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τους λόγους για τους οποίους μια εγκατάσταση με ποιοτικούς στόχους φωτισμού είναι σημαντική.

Στο έβδομο κεφάλαιο, υπολογίζονται και αξιολογούνται μέσω προσομοιώσεων (με την χρήση των λογισμικών Dialux και Oxytech) τα εναλλακτικά σενάρια. Πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκαν τα παρακάτω: ένα σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης (με την χρήση των δεικτών Dr,De), ένα σενάριο περιορισμού της φωτορύπανσης (με την χρήση του δείκτη UFR), ένα σενάριο μειωμένης θάμβωσης (με την χρήση του δείκτη TI) και τέλος ένα σενάριο μεγιστοποίησης της ομοιομορφίας της λαμπρότητας (με την χρήση του δείκτη U<sub>o</sub>). Τα παραπάνω σενάρια υλοποιήθηκαν σε δυο ενδεικτικούς καννάβους και αξιολογήθηκαν με βάση τεχνικούς δείκτες όπως: Φ<sub>A</sub>,UF,N<sub>p</sub>,N<sub>inst</sub>. Τέλος, για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκε και τεχνοοικονομική μελέτη με στόχο να συγκριθούν οι παραπάνω εγκαταστάσεις οδοφωτισμού και για το κόστος εγκατάστασης και κατανάλωσής τους.

Στο όγδοο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης προβλημάτων, η μέθοδος ιεράρχησης βαρών AHP και η μέθοδος κατάταξης εναλλακτικών σεναρίων PROMETHEE.

Στο ένατο κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι που αναλύθηκαν στο όγδοο κεφάλαιο προκειμένου να επιλεγεί το καταλληλότερο σενάριο από αυτά που υπολογίστηκαν στο έβδομο κεφάλαιο με βάση τις προτιμήσεις του λήπτη απόφασης.

Μάλιστα υπολογίσθηκε η κατάταξη των εναλλακτικών σεναρίων για δυο διαφορετικά προβλήματα, όπου το κάθε πρόβλημα είχε διαφορετική κατανομή στα βάρη των κριτηρίων.

Τέλος στο δέκατο κεφάλαιο, συνοψίζονται οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, προτείνονται και θέματα που θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η περαιτέρω ερευνά τους καθώς «γεννήθηκαν» από την παρούσα διπλωματική.

Λέξεις Κλειδιά :

Φωτισμός δρόμων, Ευρωπαϊκό Πρότυπο, Επιλογή Κλάσεων, μέθοδος παραρτήματος, Ευρωπαϊκές χώρες και οδοφωτισμός, προσαρμοστικός φωτισμός, φωτορύπανση, θάμβωση δυσφορίας, θάμβωση ανικανότητας, ομοιόμορφος φωτισμός, μέθοδος AHP, μέθοδος PROMETHEE.

## Abstract

This diploma thesis focuses on the methodology of evaluation of street lighting projects with the possibility of selecting the qualitative and quantitative quality indicators of the project. To this end, a major work was devoted to the calculation and evaluation of street lighting installations, which were characterized by different objectives at a time.

In the first chapter, an introduction to the visible spectrum, color temperature is made, while fundamental photometry is also analyzed.

The second chapter is dedicated to LED luminaires, their optic system and to OLED technology.

In the third chapter, the Technical Report CEN/TR 13201-1 which used for the street lighting installations is analyzed, along with an alternative method of calculating classes (Annex).

In the fourth chapter the two methods of class selection are compared through three scenarios and the outcome is quite interesting.

In the fifth chapter, it was considered appropriate to investigate and present how the European Standard for street lighting installations is applied in various European countries. European countries, through specific laws or directives in their national road lighting guide, have enriched the common European guidebook of Member States.

The sixth chapter presents in theory alternative scenarios of street lighting installations of different objectives. Therefore, installations which allow significant reductions in energy consumption are presented, then the phenomenon of light pollution is explained and finally factors that contribute to the visual comfort of the user such as glare and uniformity of luminance are analyzed. Also, the purpose of the chapter is to explain why an installation with quality lighting objectives is important.

In the seventh chapter alternative scenarios are calculated and evaluated through simulations (software programs such as Dialux and Oxytech are used). In particular, the following scenarios have been calculated: a scenario of economical implementation (based on  $D_p$ ,  $D_e$ ), a reduced light pollution scenario (based on UFR), a reduced glare scenario (based on TI), a maximal uniformity scenario (based on  $U_o$ ). The above scenarios were implemented in two indicative grids and were evaluated by technical indicators such as:  $\Phi_A$ , UF,  $N_p$ ,  $N_{inst}$ , while for each scenario, a feasibility study was carried out to assess the cost of their installation and consumption.

The eighth chapter, presents the theory of multicriteria problem analysis, the AHP weighting and the PROMETHEE method.

In the ninth chapter, the methods analyzed in the eighth chapter are used to select the most appropriate scenario from those calculated in chapter seven based on the preference of the decision-maker. Indeed, the classification of the alternative scenarios was calculated for two different problems where each problem had a different distribution over the criteria weights.

Finally, chapter 10 sums up the observations and conclusions from the whole thesis and proposes topics that would be of interest in further research as they were born out of this diploma thesis.

## Key words

Street Lighting, European Standard, Selection of classes, Annex Method, European countries and road lighting, adaptive lighting, light pollution, discomfort glare, disability glare, uniformity, AHP method, PROMETHEE method

Περιεχόμενα	
<b>Περίληψη</b> .....	<b>9</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>11</b>
<b>Ευρετήριο Πινάκων</b> .....	<b>17</b>
<b>Ευρετήριο Εικόνων</b> .....	<b>20</b>
<b>Κεφάλαιο Πρώτο: Εισαγωγικές έννοιες του φωτισμού</b> .....	<b>22</b>
1.1 Φως και ορατό φάσμα .....	22
1.2 Ευαισθησία ανθρώπινου ματιού .....	23
1.3 Θερμοκρασία χρώματος .....	23
1.4 Ποιότητα χρώματος πηγής:.....	24
1.5 Θεμελιώδη μεγέθη.....	25
1.6 Πολικό διάγραμμα .....	27
Βιβλιογραφία .....	28
<b>Κεφάλαιο Δεύτερο: Φωτιστικά LED</b> .....	<b>29</b>
2.1 Εισαγωγή.....	29
2.2 Φωτεινές πηγές LED.....	29
2.2.1 Θετικά φωτεινών πηγών LED .....	31
2.2.2 Μειονεκτήματα φωτεινών πηγών LED .....	32
2.3 Φωτεινές πηγές OLED .....	33
2.4 Οπτικά φωτιστικών LED .....	35
2.4.1 Φακοί.....	36
2.4.2 Κατοπτρικοί φακοί .....	36
2.4.3 Φακοί διάθλασης.....	36
Βιβλιογραφία .....	37
<b>Κεφάλαιο Τρίτο : Κλάσεις Οδοφωτισμού</b> .....	<b>38</b>
3.1 Εισαγωγή.....	38
3.2 Επιλογή κλάσης.....	39
3.2.1 Επιλογή κλάσης μέσω του πίνακα βαρών .....	39
3.2.2 Επιλογή κλάσης μέσω εναλλακτικής μεθόδου .....	42
Βιβλιογραφία .....	44
<b>Κεφάλαιο Τέταρτο : Σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων επιλογής κλάσεων</b> ...	<b>45</b>
4.1 Εισαγωγή.....	45
4.2 Πρώτος ενδεικτικός κάρναβος.....	45
4.3 Δεύτερος ενδεικτικός κάρναβος .....	46
4.4 Τρίτος ενδεικτικός κάρναβος .....	47
<b>Κεφάλαιο Πέμπτο: Ευρωπαϊκές χώρες και ευρωπαϊκός οδηγός EN13201</b> .....	<b>49</b>
5.1: Ισπανία και δείκτης αποδοτικότητας.....	49
5.1.1 Καταλανικός νόμος για την μείωση της λάμψης του ουρανού.....	50

5.2 Ιταλία.....	50
5.2.1 Δυνατότητα dimming.....	50
5.2.2 Φωτορύπανση.....	51
5.3 Φινλανδία.....	52
5.3.1 Dimming.....	52
5.3.2 Σβήσιμο φωτιστικών το βράδυ.....	53
5.4 Γερμανία.....	53
5.5 Βέλγιο.....	54
Βιβλιογραφία.....	55
<b>Κεφάλαιο Έκτο : Θεωρητική προσέγγιση εναλλακτικών σεναρίων.....</b>	<b>56</b>
6.1 Εισαγωγή.....	56
6.2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για οδοφωτισμό.....	57
6.2.2 Έξυπνες πόλεις και προσαρμοστικός φωτισμός.....	61
6.2.3 Προσαρμοστικός φωτισμός μέσω πρόβλεψης.....	62
6.3 Φωτορύπανση.....	63
6.3.1 Εισαγωγή.....	63
6.3.2 Αιτίες φωτεινής ρύπανσης.....	65
6.3.3 Επιπτώσεις της φωτεινής ρύπανσης.....	65
6.3.3.1 Αστρονομία.....	65
6.3.3.2 Οικολογία.....	66
6.3.3.3 Ανθρώπινη υγεία.....	66
6.3.4 Τρόποι περιορισμού φωτορύπανσης.....	67
6.4 Θάμβωση.....	68
6.4.1 Εισαγωγή.....	68
6.4.2 Αιτίες θάμβωσης.....	69
6.4.3 Αποτελέσματα θάμβωσης.....	69
6.4.4 Τρόποι περιορισμού θάμβωσης.....	70
6.5 Ομοιόμορφος φωτισμός.....	71
6.5.1 Ολική ομοιομορφία λαμπρότητας.....	71
6.5.2 Κατά μήκος ομοιομορφία.....	72
6.5.3 Αποτελέσματα μιας ομοιόμορφης εγκατάστασης.....	73
Βιβλιογραφία.....	74
<b>Κεφάλαιο Έβδομο : Διατύπωση εναλλακτικών σεναρίων αξιολόγησης.....</b>	<b>76</b>
<b>ενδεικτικών καννάβων.....</b>	<b>76</b>
7.1 Εισαγωγή.....	76
7.2 Τυπικοί κάρναβοι.....	77
7.3 Δείκτες αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων.....	78
7.3.1 Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού.....	78

7.3.2 Δείκτες αξιολόγησης σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5.....	78
7.3.3 Υπολογισμός συντελεστή συντήρησης.....	84
7.4 Οικονομικότερη υλοποίηση με βάση τους δείκτες Dr,De.....	85
7.4.1 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο E1.....	85
7.4.2 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο B5.....	91
7.5 Περιορισμός φωτορύπανσης.....	97
7.5.1.1 Σενάριο φωτορύπανσης στον τυπικό κάρναβο E1.....	98
7.5.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	98
7.5.2.1 Σενάριο φωτορύπανσης στον τυπικό κάρναβο B5.....	99
7.5.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	99
7.5.3 Ειδική περίπτωση σεναρίου φωτορύπανσης στον τυπικό κάρναβο B5.....	101
7.6 Ελάχιστη τιμή θάμβωσης.....	102
7.6.1 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο E1.....	102
7.6.2 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο B5.....	107
7.7 Μεγιστοποίηση της ομοιομορφίας της λαμπρότητας.....	113
7.7.1 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο E1.....	113
7.7.2 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο B5.....	118
Βιβλιογραφία.....	124
<b>Κεφάλαιο Όγδοο: Πολυκριτηριακή ανάλυση δεδομένων.....</b>	<b>125</b>
8.1 Εισαγωγή.....	125
8.1.1 Δομή πολυκριτηριακής ανάλυσης.....	126
8.1.2 Λύσεις ενός πολυκριτηριακού προβλήματος.....	127
8.2 Μέθοδος AHP.....	128
8.3 Στάδια AHP.....	128
8.3.1 Υπολογισμός βάρους κριτηρίου.....	129
8.3.2 Υπολογισμός πίνακα τιμών αξιολόγησης εναλλακτικών επιλογών.....	130
8.3.3 Κατάταξη εναλλακτικών επιλογών.....	130
8.4 PROMETHEE.....	131
8.4.1 Ιστορική αναδρομή.....	131
8.4.2 Εισαγωγή.....	131
8.4.3 Μέθοδος PROMETHEE.....	133
8.4.4 Υπολογισμός πίνακα βαθμού υπεροχής.....	136
8.4.5 Κατάταξη.....	136
Βιβλιογραφία.....	138
<b>Κεφάλαιο Ένατο: Πολυκριτηριακή ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων.....</b>	<b>139</b>
9.1 Εισαγωγή.....	139
9.2 Παρουσίαση δεδομένων.....	139
9.3 Οικονομικότερη εγκατάσταση.....	142

9.3.1 Υπολογισμός των βαρών με την μέθοδο AHP .....	143
9.3.2 Υπολογισμός της κατάταξης των εναλλακτικών σεναρίων με την μέθοδο PROMETHEE .....	145
9.4 Ποιοτική και φιλική εγκατάσταση προς τον χρήστη.....	150
9.4.1 Υπολογισμός των βαρών με την μέθοδο AHP .....	150
9.4.2 Υπολογισμός της κατάταξης των εναλλακτικών σεναρίων με την μέθοδο PROMETHEE .....	152
<b>Κεφάλαιο Δέκατο: Τελικά συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα</b> .....	<b>154</b>
10.1 Τελικά συμπεράσματα .....	154
10.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	155
<b>Παράρτημα Α : Αποτελέσματα λογισμικού Oxytech.....</b>	<b>156</b>
<b>Παράρτημα Β : Αποτελέσματα προσομοίωσης λογισμικού Dialux.....</b>	<b>158</b>
B1 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης σε κάναβο E1.....	158
B2 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης σε κάναβο B5.....	161



## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1 Ποιότητα χρώματος διαφορετικών τύπων λαμπτήρων.

Πίνακας 3.1 Επιλογή Κλάσεων

Πίνακας 5.1 Ελάχιστες τιμές και τιμές αναφοράς αποδοτικότητας εγκατάστασης για φωτισμό εξωτερικών χώρων στην Ισπανία

Πίνακας 5.2 Προτεινόμενα όρια του δείκτη RULO σε κάθε ζώνη

Πίνακας 5.3 Περιοδική μείωση του φωτισμού βάσει των κλάσεων φωτισμού με τη χρήση δυο βημάτων μεθόδου ελέγχου

Πίνακας 5.4 Μέγιστη ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο ανά τύπο δρόμου και επίπεδα φωτισμού (kWh / (y·km)) που χρησιμοποιούνται για την παροχή δανείων

Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά καννάβων

Πίνακας 7.2 Τιμές ορίων αξιολόγησης EN 13201

Πίνακας 7.3 Παρουσίαση κατηγοριών φωτεινής έντασης

Πίνακας 7.4 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάνναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.5 Χαρακτηριστικά φωτιστικού Τύπου I και Τύπου II

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάνναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.7 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάνναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.8 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάνναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.9 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάνναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.10 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάνναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.11 Ετήσιο κόστος καθαρισμού φωτιστικών στον κάνναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.12 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάνναβο B5

Πίνακας 7.13 Χαρακτηριστικά φωτιστικού Τύπου III και χαρακτηριστικά φωτιστικού Τύπου IV

Πίνακας 7.14 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάνναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.15 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάνναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.16 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάνναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.17 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάνναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.18 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάνναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.19 Ετήσιο κόστος καθαρισμού φωτιστικών στον κάνναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

- Πίνακας 7.20 Υπολογισμός δείκτη UFR σε ειδική περίπτωση σεναρίου φωτορύπανσης στον κάρναβο Β5
- Πίνακας 7.21 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μειωμένης τιμής θάμβωσης
- Πίνακας 7.22 Χαρακτηριστικά φωτιστικού Τύπου VI
- Πίνακας 7.23 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.24 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.25 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.26 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.27 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.28 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.29 Χαρακτηριστικά φωτιστικών Τύπου VII και Τύπου VIII
- Πίνακας 7.30 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.31 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.32 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.33 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.34 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης
- Πίνακας 7.35 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.36 Χαρακτηριστικά φωτιστικών Τύπου IX και Τύπου X
- Πίνακας 7.37 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.38 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.39 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.40 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.41 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάρναβο Ε1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.42 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.43 Χαρακτηριστικά φωτιστικών Τύπου XI και Τύπου XII
- Πίνακας 7.44 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο Β5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.45 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο Β5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας
- Πίνακας 7.46 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Πίνακας 7.47 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου  
μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Πίνακας 7.48 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάρναβο Β5 σεναρίου  
μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Πίνακας 8.1 Κλίμακα Απόλυτων Αριθμών

Πίνακας 8.2 Πίνακας Απόφασης

Πίνακας 9.1 Δεδομένα πολυκριτηριακού προβλήματος

Πίνακας 9.2 Επιλογή βάρους κριτηρίων

Πίνακας 9.3 Κανονικοποιημένος πίνακας δυαδικών συγκρίσεων

Πίνακας 9.4 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων Α κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.5 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων Β κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.6 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων C κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.7 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων D κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.8 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων E κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.9 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων F κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.10 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του Α κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.11 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του Β κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.12 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του C κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.13 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του D κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.14 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του E κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.15 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του F κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.16 Υπολογισμός του βαθμού υπεροχής και τελική κατάταξη των σεναρίων

Πίνακας 9.17 Επιλογή Βάρους Κριτηρίων

Πίνακας 9.18 Κανονικοποιημένος Πίνακας Δυαδικών Συγκρίσεων

Πίνακας 9.19 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων E κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.20 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του E κριτηρίου αξιολόγησης

Πίνακας 9.21 Υπολογισμός του βαθμού υπεροχής και τελική κατάταξη των σεναρίων

Πίνακας Α.1 Κατανομή φωτεινής ροής φωτιστικού Τύπου III

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Εικόνα 1.2 Καμπύλες ευαισθησίας ανθρώπινου ματιού.

Εικόνα 1.3 Θερμοκρασία χρώματος

Εικόνα 1.4 Θεμελιώδη μεγέθη φωτοτεχνίας

Εικόνα 1.5 Επίπεδα C0-C180 και C90-C270

Εικόνα 2.1 Η εξέλιξη της αποδοτικότητας των λαμπτήρων με το πέρασμα των χρόνων.

Εικόνα 2.2 Πιθανές διατάξεις κόκκινων, πράσινων και μπλε πομπών OLED

Εικόνα 2.3 Κατανομή φωτεινής έντασης φωτεινής πηγής LED

Εικόνα 2.4 Φακός διάθλασης, κατοπτρικός φακός, φακός σε LED

Εικόνα 3.1 Πίνακας εναλλακτικής μεθόδου επιλογής κλάσεων

Εικόνα 3.2 Διάγραμμα επιλογής κλάσεων

Εικόνα 6.1 Δορυφορική εικόνα Βερολίνου 2013.

Εικόνα 6.2 Τοποθέτηση Αισθητήρων IR και PIR.

Εικόνα 6.3 Αισθητήρας IR

Εικόνα 6.4 Διάγραμμα ροής εγκατάστασης προσαρμοστικού οδοφωτισμού

Εικόνα 6.5 Φωτεινή Ρύπανση το 1993

Εικόνα 6.6 Φωτεινή Ρύπανση το 2010

Εικόνα 6.7 Φωτεινή Ρύπανση της Ευρώπης τώρα (αριστερά) και σε υποθετικό σενάριο αντικατάστασης λαμπτήρων με LED 4000K

Εικόνα 6.8 Φωτιστικό εξωτερικού χώρου χωρίς περιορισμό της φωτεινής εκπομπής

Εικόνα 6.9 Θάμβωση

Εικόνα 6.10 Εγκατάσταση με υψηλό δείκτη θάμβωσης

Εικόνα 6.11 Αντικείμενα με αντανάκλαστικές ιδιότητες ανάλογες με αυτές των ρούχων των πεζών

Εικόνα 6.12 Χαμηλή τιμή ολικής ομοιομορφίας (αριστερά) – Χαμηλή τιμή κατά μήκος ομοιομορφίας (δεξιά)

Εικόνα 7.1 Γωνίες υπολογισμού φωτεινής ροής  $\Phi_A$

Εικόνα 7.2 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου I/II

Εικόνα 7.3 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου III/IV

Εικόνα 7.4 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου V

Εικόνα 7.5 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου VI

Εικόνα 7.6 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου VII/VIII

Εικόνα 7.7 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου IX/X

Εικόνα 7.8 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου XI/XII

*Εικόνα 8.1 Συνάρτηση προτίμησης*

*Εικόνα 8.2 Τύποι συναρτήσεων προτίμησης*

*Εικόνα 9.1 Γράφημα αναπαράστασης βαρών*

*Εικόνα 9.2 Γράφημα αναπαράστασης βαρών*

*Εικόνα Β.1 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Ε1 με θερμοκρασία χρώματος 4000K*

*Εικόνα Β.2 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Ε1 με θερμοκρασία χρώματος 3000K*

*Εικόνα Β.3 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Ε1 με θερμοκρασία χρώματος 4000K  
(ισοδύναμες γραμμές)*

*Εικόνα Β.4 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Ε1 με θερμοκρασία χρώματος 3000K  
(ισοδύναμες γραμμές)*

*Εικόνα Β.5 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Β5 με θερμοκρασία χρώματος 4000K*

*Εικόνα Β.6 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Β5 με θερμοκρασία χρώματος 3000K*

*Εικόνα Β.7 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Β5 με θερμοκρασία χρώματος 4000K  
(ισοδύναμες γραμμές)*

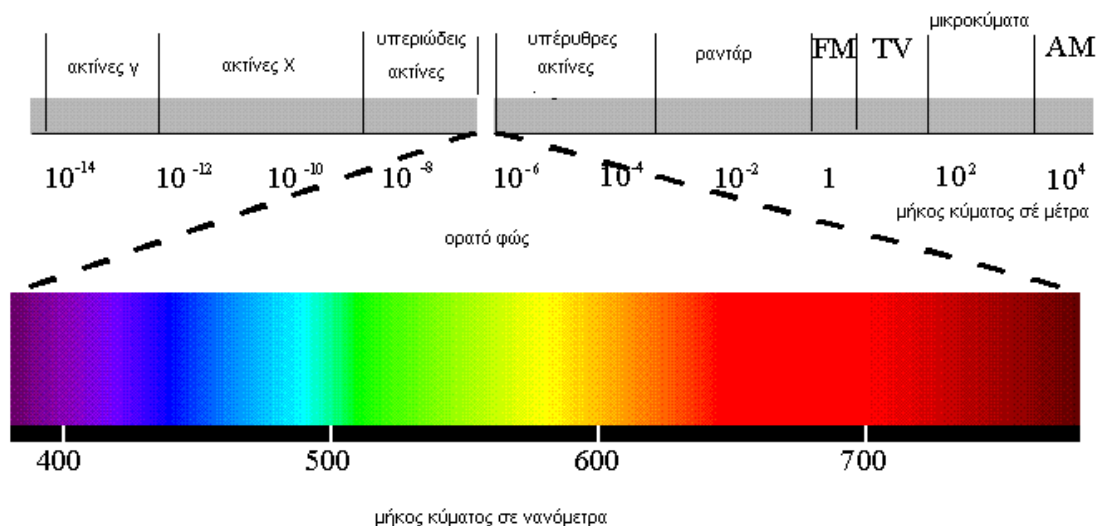
*Εικόνα Β.8 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Β5 με θερμοκρασία χρώματος 3000K  
(ισοδύναμες γραμμές)*

## Κεφάλαιο Πρώτο: Εισαγωγικές έννοιες του φωτισμού

### 1.1 Φως και ορατό φάσμα

Φως ορίζεται ως η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανιχνεύει το ανθρώπινο μάτι και που εκλαμβάνεται ως αίσθηση αυτής. Συνεπώς είναι το αίτιο της όρασης. Η αντίληψη αυτή του «ορατού» φωτός αποτελεί τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [1].

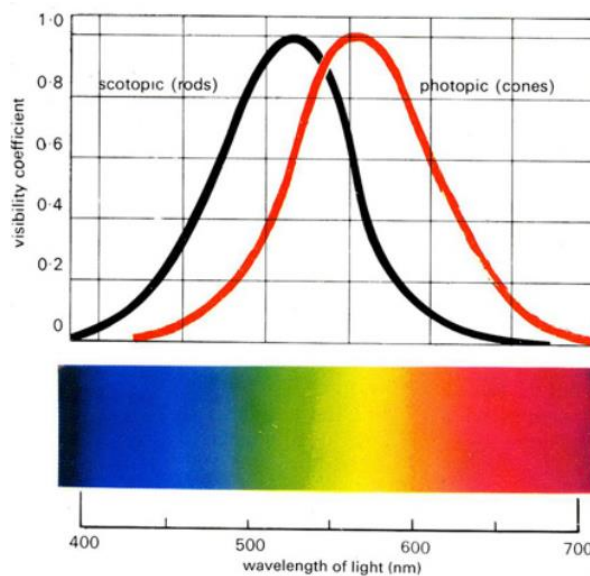
Το ορατό φάσμα ορίζεται ως το τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μπορεί να αντιληφθεί ο άνθρωπος με το την αίσθηση της όρασης. Το φάσμα αυτό εκτείνεται σε ακτινοβολίες που έχουν μήκος κύματος από 400nm έως 700nm. Το ορατό φως παράγεται από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα και στα μόρια. Κάθε υποπεριοχή του ορατού φάσματος προκαλεί στον άνθρωπο την αίσθηση κάποιου συγκεκριμένου χρώματος. Προσεγγιστικά τα μήκη κύματος των διαφόρων χρωμάτων του ορατού φάσματος φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Οι ακτινοβολίες με μήκος κύματος κάτω από 400nm αποτελούν την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ οι ακτινοβολίες με μήκος κύματος πάνω από τα 700nm αποτελούν την υπέρυθη ακτινοβολία.



Εικόνα 1.1 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

## 1.2 Ευαισθησία ανθρώπινου ματιού

Παρόλα αυτά ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν αντιλαμβάνεται με την ίδια ευκολία το σύνολο του ορατού φάσματος. Η ευαισθητοποίηση του ανθρώπινου οφθαλμού στο ορατό φως γίνεται σταδιακά, φθάνοντας την μέγιστη τιμή της στο μήκος κύματος των 555nm κατά την διάρκεια της μέρας και τα 507nm κατά την νύχτα. Ο διαχωρισμός των διαφορετικών μηκών κύματος σε μέρα και νύχτα σχετίζεται με τον τύπο όρασης που χρησιμοποιείται κάθε στιγμή της μέρας. Την μέρα λοιπόν, χρησιμοποιείται κυρίως φωτοπική όραση ενώ την νύχτα η σκοτοπική όραση. Ο συντελεστής φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού  $V_\lambda$  είναι καθαρός αριθμός και καθορίζει την ευαισθητοποίηση του ματιού [2].



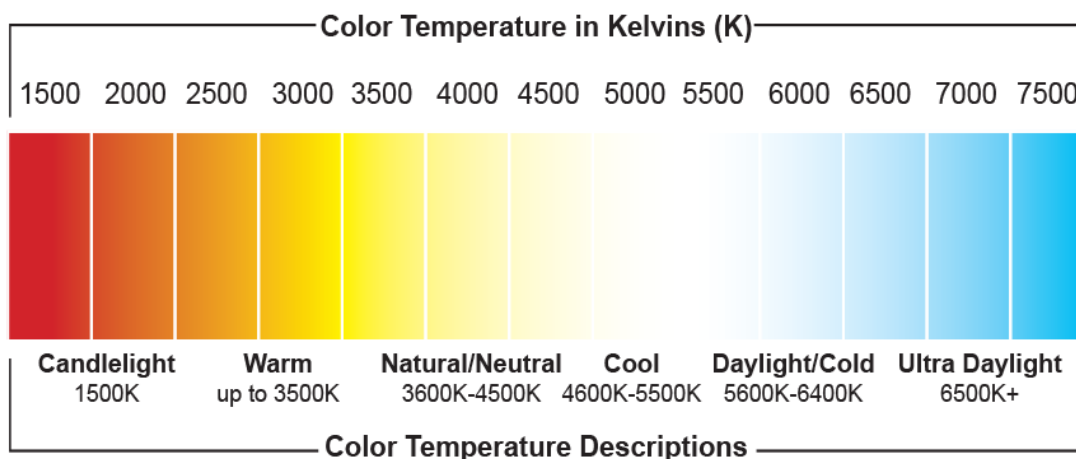
Εικόνα 1.2 Καμπύλες ευαισθησίας ανθρώπινου ματιού.

Εξετάζοντας τώρα την εικόνα 1.2 είναι προφανές ότι κατά την διάρκεια της μέρας ο ανθρώπινος οφθαλμός αντιλαμβάνεται καλύτερα το πρασινοκίτρινο χρώμα, ενώ η μικρότερη ευαισθησία παρουσιάζεται στις κόκκινες και μπλε αποχρώσεις.

## 1.3 Θερμοκρασία χρώματος

Οι φωτεινές πηγές συχνά εκπέμπουν ένα μεγάλο εύρος από διαφορετικά μήκη κύματος, παρόλο που εκπέμπουν ένα χρώμα. Για το συγκεκριμένο χρώμα κάθε πηγής, χρησιμοποιείται ο όρος θερμοκρασία χρώματος της πηγής.

Η θερμοκρασία χρώματος είναι το μέτρο για να περιγράψει το χρώμα των φωτεινών πηγών. Εκφράζεται με την ισοδύναμη θερμοκρασία στην οποία όταν βρεθεί το μέλαν σώμα θα παράγει φως του ίδιου χρώματος με την πηγή. Συνεπώς, το χρώμα φωτεινής πηγής εκφράζεται με την θερμοκρασία του αντίστοιχου μέλανος σώματος με ομοιόχρωμο φως.



Εικόνα 1.3 Θερμοκρασία χρώματος

Όπως φαίνεται και από την εικόνα, όσο ψηλότερη είναι η θερμοκρασία χρώματος τόσο ψυχρότερη είναι η απόχρωση της πηγής. Θερμοκρασίες χρώματος των 5300K και άνω αντιστοιχούν σε λευκή και ψυχρή απόχρωση, ενώ θερμοκρασίες χρώματος μικρότερες των 3300K αντιστοιχούν σε θερμές αποχρώσεις.

Στις εγκαταστάσεις οδοφωτισμού χρησιμοποιούνται κυρίως πηγές κιτρινωπής, ουδέτερης και λευκής απόχρωσης που αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 2500K και 5000K.

#### 1.4 Ποιότητα χρώματος πηγής:

Οι φωτεινές πηγές του ίδιου χρώματος μπορεί να αποδίδουν λίγο διαφορετικά όσον αφορά την ρεαλιστική αναπαραγωγή του χρώματος ενός αντικειμένου. Έτσι η ποιότητα χρώματος δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία χρώματος της πηγής, αλλά από το φάσμα τού μήκος κύματος που εκπέμπει η πηγή.

Οι φωτεινές πηγές οι οποίες παρέχουν ένα φάσμα που καλύπτει όλα τα μήκη κύματος μπορούν να αποδώσουν όλους τους χρωματικούς συνδυασμούς του αντικειμένου που φωτίζεται. Αντίθετα, φωτεινές πηγές που εκπέμπουν μόνο συγκεκριμένα χρώματα μπορεί να υποστηρίξουν τα αντίστοιχα χρώματα του φωτιζόμενου αντικειμένου.

Σύμφωνα με την Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de l'Éclairage – CIE ) η ποιότητα του χρώματος μιας φωτεινής πηγής εκφράζεται από τον δείκτη χρωματικής απόδοσης  $R_a$  ή αλλιώς CRI (Color Rendering Index).

Ο δείκτης υπολογίζεται από την σχέση:

$$Ra = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (100 - 4.6\Delta E_i)$$

Όπου:  $\Delta E_i$  είναι οι αποστάσεις στον χρωματικό χώρο.



## 1.5 Θεμελιώδη μεγέθη

### Φωτεινή ροή(Luminous Flux) :

Φωτεινή ροή  $\Phi$  ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ενέργειας  $Q$  που εκπέμπει μια σημειακή φωτεινή πηγή, τοποθετημένη στην κορυφή ενός κώνου, εντός του κώνου αυτού, σε χρόνο  $dt$  προς τον χρόνο αυτό.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Ως *φωτεινή ενέργεια*  $Q$  ορίζουμε το κλάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στην ζώνη φάσματος του ορατού φωτός, η οποία γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι.

Αυτή προκύπτει από το ολοκλήρωμα του γινομένου της κατανομής της ακτινοβολίας και του συντελεστή φασματικής ευαισθησίας στην ζώνη ορατού φωτός ( $\lambda= 380\text{nm}-780\text{nm}$ ).

$$Q = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} V_{\lambda} W_{\lambda} d\lambda$$

Η φωτεινή ροή μετράται σε lumen (lm).

### Φωτεινή ένταση (Luminous Intensity):

Φωτεινή ένταση ή ένταση φωτεινής πηγής  $I$  ορίζεται ως ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής  $d\Phi$  που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία  $d\omega$  προς την γωνία αυτή.

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

Η φωτεινή ένταση μετράται σε candela (cd).

Για τον φωτισμό δρόμων η χωρική κατανομή της φωτεινής ροής πρέπει να διασφαλίζει επαρκή φωτισμό για τον δρόμο, τα αντικείμενα και τους χρήστες που βρίσκονται στον δρόμο, ενώ ο φωτισμός προς τα πάνω συχνά είναι ανεπιθύμητος.

### Ένταση φωτισμού (Illuminance) :

Ένταση φωτισμού  $E$  ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής που προσπίπτει σε μια επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής.

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

Η Ένταση φωτισμού μετράται σε lux.

## Λαμπρότητα (Luminance) :

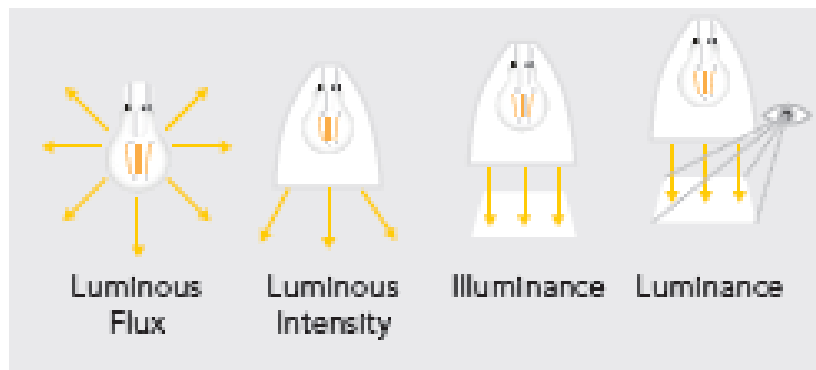
Λαμπρότητα  $L$  ορίζεται ως η φωτεινή ένταση σε μια δεδομένη κατεύθυνση που διαιρείται με μια προβαλλόμενη περιοχή όπως φαίνεται από τον παρατηρητή.

$$L = \frac{I}{S_{surface}}$$

Η Λαμπρότητα μετράται σε  $cd/m^2$ .

Μια επιφάνεια γίνεται ορατή από το φως που αντανακλάται σε αυτή και εισχωρεί στο μάτι του παρατηρητή. Έτσι, όπως αναφέρθηκε, η ένταση φωτισμού στην επιφάνεια του δρόμου, αναφέρεται μόνο στην ποσότητα της φωτεινής ροής που φτάνει στο οδόστρωμα και όχι στο πόσο φωτεινό θα είναι. Η φωτεινότητα του δρόμου εξαρτάται από την ποσότητα του φωτός που θα αντανακλαστεί στην κατεύθυνση του παρατηρητή [3].

Ελάχιστες τιμές της λαμπρότητας καθορίζονται για τις κλάσεις των δρόμων σύμφωνα με το πρότυπο EN13201.

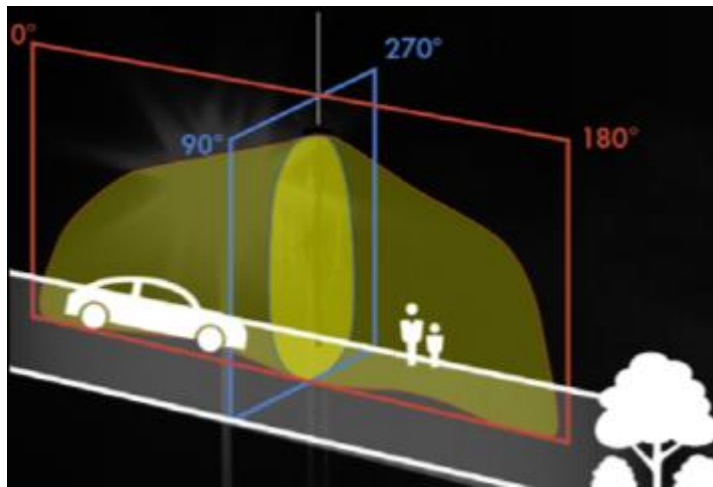


Εικόνα 1.4 Θεμελιώδη μεγέθη φωτοτεχνίας

## 1.6 Πολικό διάγραμμα

Όλα τα φωτιστικά χαρακτηρίζονται από το διάγραμμα κατανομής της φωτεινής τους έντασης. Η φωτεινή ένταση ενός φωτιστικού σώματος μετράται σε ένα σύνολο τυποποιημένων επιπέδων. Η CIE έχει επιλέξει τρεις ομάδες επιπέδων οι οποίες έχουν καθοριστεί ως τυποποιημένα επίπεδα μέτρησης της φωτεινής έντασης των φωτιστικών σωμάτων. Για τα φωτιστικά που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις οδοφωτισμού χρησιμοποιούνται τα επίπεδα C. Στα επίπεδα C ο άξονας περιστροφής διέρχεται από το φωτομετρικό κέντρο του φωτιστικού σώματος και είναι κατακόρυφος. Ο άξονας περιστροφής των επιπέδων περιστροφής είναι αυστηρά κατακόρυφος στο χώρο και δεν ακολουθεί την κλίση του φωτιστικού όταν αυτό τοποθετηθεί σε κλίση.

Βάση των κανονισμών της διεθνούς επιτροπής φωτισμού (Commission Internationale de l'Éclairage–CIE) επιλέγονται τα επίπεδα C0-C180 και C90-C270 προκειμένου να περιγράψει η κατανομή της φωτεινής έντασης του φωτιστικού. Τα παραπάνω επίπεδα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για μια αποδοτική εγκατάσταση οδοφωτισμού. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 1.5 το επίπεδο C0-C180 φωτίζει κατά μήκος του οδοστρώματος, ενώ το C90-C270 φωτίζει σε όλο το πλάτος του οδοστρώματος που βρίσκεται στην ίδια ευθεία με το φωτιστικό [4]. Αρκετά πολικά διαγράμματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7 καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο η κατανομή της φωτεινής ροής στην επιλογή του κατάλληλου φωτιστικού για κάθε σενάριο.



Εικόνα 1.5 Επίπεδα C0-C180 και C90-C270

## **Βιβλιογραφία**

1. *www.wikipedia.org*
2. *Φωτοτεχνία, Εκδόσεις Τζιολα Φ.Β.Τοπαλής, Α.Οικονόμου, Σ.Κουρτέση*
3. *Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Street Lighting and Traffic Signals June 2017*
4. *www.ledil.com/wpcontent/uploads/2018/04/Guide\_for\_street\_lighting\_optics\_v1-0.pdf*

## Κεφάλαιο Δεύτερο: Φωτιστικά LED

### 2.1 Εισαγωγή

Μία εγκατάσταση οδοφωτισμού μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- Το οπτικό σύστημα που αποτελείται από τα φωτιστικά, (συμπεριλαμβάνονται οι φακοί ανάκλασης, διάθλασης), λαμπτήρες ή άλλες φωτεινές πηγές και τα συστήματα ελέγχου.
- Το σύστημα υποστήριξης που αποτελείται από τους ιστούς τοποθέτησης των φωτιστικών και την εγκατάστασή τους.
- Το ηλεκτρικό σύστημα που αποτελείται από την τροφοδότηση του συστήματος και τις εγκαταστάσεις ελέγχου και μετρήσεων κατανάλωσης.

Στο παρόν κεφάλαιο, λοιπόν, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν στοιχεία από το οπτικό σύστημα κυρίως των φωτιστικών που περιλαμβάνουν τύπους φωτεινών πηγών φωτοεκπέμπουσες διόδους ή κοινώς LED. Τα LED εξαιτίας της υψηλής αποδοτικότητας τους αλλά και της χαμηλής τους κατανάλωσης κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στην αγορά του οδοφωτισμού. Μάλιστα όλα τα φωτιστικά που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια στο έκτο κεφάλαιο θα χρησιμοποιούν LED, γι' αυτό και κρίνεται απαραίτητη μια παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών αυτών των φωτιστικών.

### 2.2 Φωτεινές πηγές LED

Από φυσική άποψη όλες οι τεχνολογίες λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται για το φωτισμό του δρόμου μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε ορατό φως. Λαμπτήρες υψηλής εκκένωσης έχουν κυριαρχήσει στο φωτισμό του δρόμου εδώ και δεκαετίες, αλλά η τεχνολογία LED αντικαθιστά όλους τους άλλους τύπους λαμπτήρων, ιδιαίτερα για νέα συστήματα φωτισμού οδών [1].

Οι φωτοεκπέμπουσες διόδους είναι ένας συνδυασμός ημιαγωγών p-n, όπου όταν εφαρμοσθεί τάση στους δύο ημιαγωγούς εκπέμπεται ακτινοβολία. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ημιαγωγία υψηλής καθαρότητας με μικρές ποσότητες προσθέτων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο είδη προσθέτων. Το ένα είναι υλικό τύπου n, το οποίο έχει συγκεντρωμένη περίσσεια ηλεκτρονίων, ενώ το άλλο είναι υλικό τύπου p με συγκεντρωμένο έλλειμα ηλεκτρονίων ή περίσσεια οπών, οι οποίες δρουν ως θετικά φορτία. Όταν εφαρμόζεται τάση στα δύο ηλεκτρόδια, προκαλείται μετακίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών προς την διεπιφάνεια, όπου κατά την επαφή τους παράγονται φωτόνια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ηλεκτροφωτοδιαύγεια [2].

Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός και συνεπώς το χρώμα του, εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Για φωτισμό δρόμου χρησιμοποιούνται συνήθως μπλε LED, παρέχοντας λευκό φως όταν χρησιμοποιείται επικάλυψη φωσφόρου. Το μπλε LED διεγείρει τους φωσφόρους με το μήκος κύματος εκπομπής τους. Οι ιδιότητες εκπομπής και απορρόφησης των φωσφόρων αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, ενώ έχουν αντίκτυπο στο φάσμα εκπομπών των LED. Η μίξη αρκετών φωσφόρων προσφέρει το πλεονέκτημα ενός ευρύτερου φάσματος εκπομπών

χρωμάτων. Η συγκέντρωση φωσφόρου στο στρώμα συνδετικού σιλικόνης, καθορίζει τη χρωματικότητα των LED. Η συγκέντρωση φωσφόρου εξαρτάται από τρεις παράγοντες που περιγράφονται από δύο παραμέτρους: την αναλογία πράσινου / ερυθρού φωσφόρου και την ποσότητα συνδετικού υλικού σιλικόνης. Φωτιστικά LED με θερμοκρασία χρώματος κάτω των 3300K αντιστοιχούν σε θερμές αποχρώσεις και χρειάζονται αυξημένη ποσότητα κόκκινων και πράσινων φωσφόρων (απαιτείται και μεγάλη ποσότητα πράσινων φωσφόρων για να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία χρώματος), με αποτέλεσμα να περιορίζεται η εκπομπή μπλε ακτινοβολίας από τα LED καθώς απορροφάται από αυτά. Αντίθετα, φωτιστικά με ψυχρότερη θερμοκρασία χρώματος δεν χρειάζονται μεγάλη ποσότητα κόκκινων ή πράσινων φωσφόρων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εκπομπή μπλε ακτινοβολίας, ενώ η ποσότητα μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας είναι σχεδόν ίση [3].

Τα LED που εκπέμπουν μπλε ακτινοβολία έχουν την υψηλότερη απόδοση όλων των τύπων LED, με αναλογία μετατροπής 55%. Το υπόλοιπο 45% μετατρέπεται σε θερμότητα. Αυτή η ανάπτυξη θερμοκρασίας (η θερμοκρασία του υλικού ημιαγωγού LED) μειώνει τόσο την αποτελεσματικότητα όσο και τη διάρκεια ζωής, όποτε ένας καλός θερμικός σχεδιασμός είναι απαραίτητος. Για να διασκορπιστεί η θερμότητα, το τσιπ LED και ο ανακλαστήρας τοποθετούνται σε ένα σύστημα ψύξης. Το σύστημα ψύξης μεταφέρει την θερμότητα στο φωτιστικό και από εκεί η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον.

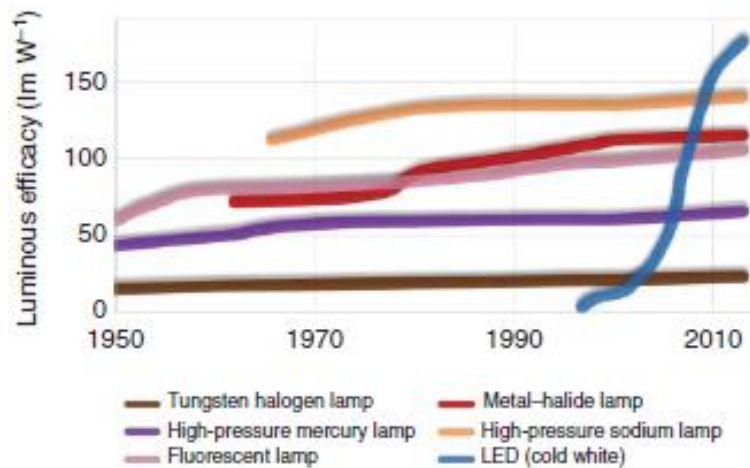
Η θερμοκρασία λειτουργίας του τσιπ LED είναι κρίσιμη πτυχή, επηρεάζοντας ιδιαίτερα την αποτελεσματικότητα και την διάρκεια ζωής. Τα δεδομένα απόδοσης των τσιπ LED καθορίζονται για θερμοκρασία 25°C. Ωστόσο, οι πραγματικές θερμοκρασίες σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας μπορεί εύκολα να φθάσουν τους 60°C-90°C, προκαλώντας μια πτώση της εξόδου της φωτεινής ροής έως 40%. Παρόλα αυτά, τα μπλε LED επηρεάζονται λιγότερο από τις αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας, καθώς η μείωση της φωτεινής τους ροής κυμαίνεται από 5 έως 20% σε θερμοκρασία λειτουργίας 80 ° C.

Οι πηγές LED δεν μπορούν να λειτουργήσουν με AC τάση δικτύου. Έτσι χρειάζονται έναν driver, με κύρια λειτουργία την παροχή σταθερής DC τάσης. Οι απώλειες ισχύος μπορούν να κυμανθούν μεταξύ 10% και 30% της ονομαστικής ισχύος του φωτιστικού και εξαρτώνται από την ποιότητα του driver. Οι χαμηλής ποιότητας οδηγοί μπορεί να έχουν απώλειες έως και 50% ενώ μπορεί να έχουν επιπτώσεις και στην διάρκεια ζωής του φωτιστικού.

### 2.2.1 Θετικά φωτεινών πηγών LED

Οι φωτεινές πηγές LED υπερτερούν σε πολλούς παράγοντες έναντι των λαμπτήρων παλαιότερης τεχνολογίας γι' αυτό και τα τελευταία χρόνια η αντικατάσταση των τελευταίων είναι μαζική. Πλέον όλο και περισσότεροι δρόμοι φωτίζονται με νέας τεχνολογίας LED.

Πρώτο και βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί η υψηλή αποδοτικότητα των λαμπτήρων LED, καθώς η απόδοσή τους κυμαίνεται στα επίπεδα των 150lm/W-200lm/W, με την απόδοσή αυτή να επιτυγχάνεται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (80° C -700mA). Αυτή η υψηλή απόδοση συμβάλλει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας καθώς πλέον καλύπτονται οι ίδιες ανάγκες φωτισμού με μικρότερη κατανάλωση, ενώ όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα είναι η υψηλότερη από όλους τους τύπους λαμπτήρων [4].



Εικόνα 2.1 Η εξέλιξη της αποδοτικότητας των λαμπτήρων με το πέρασμα των χρόνων.

Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημα είναι η υψηλή ποιότητα χρώματος της πηγής καθώς μπορεί να αποδώσει πιο ρεαλιστικά τα χρώματα ενός αντικειμένου. Η υψηλή ποιότητα χρώματος της πηγής επιτρέπει την αναγνώριση των αντικειμένων από τους οδηγούς από την αντίθεση χρώματος τους.

Πίνακας 2.1 Ποιότητα χρώματος διαφορετικών τύπων λαμπτήρων.

Τύπος Λαμπτήρα	Ποιότητα Χρώματος Φωτεινής Πηγής $R_a$
Ατμών Υδραργύρου Υψηλής Πίεσης	60-70
Φθορισμού	70-80
Μεταλλικών Αλογονιδίων	65-80
Ατμών Νατρίου Υψηλής Πίεσης	20-25
Λεύκα LED	65-80

Η διάρκεια ζωής των συμβατικών πηγών φωτός (λαμπτήρες υδράργυρου και νατρίου υψηλής πίεσης) είναι περίπου 25000 h, ενώ και το κόστος συντήρησης για την αλλαγή των λαμπτήρων είναι αρκετά υψηλό. Αντίθετα η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων LED καθορίζεται πάνω από 50.000 h, μειώνοντας σημαντικά το κόστος συντήρησης.

Σημαντικό προτέρημα αποτελεί και ο χρόνος έναυσης των φωτιστικών LED καθώς υπολογίζεται μικρότερος του 1ms με αποτέλεσμα σχεδόν αμέσως να δουλεύουν στο 100% των δυνατοτήτων τους. Επίσης τα φωτιστικά LED παρέχουν την δυνατότητα dimming καθώς μπορούν να μειώσουν την φωτεινή ροή τους από 0% έως 100%, μειώνοντας ή αυξάνοντάς το ρεύμα των driver. Η δυνατότητα dimming επιτρέπει την περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού. Επιπλέον τα φωτιστικά LED μπορούν να συνδεθούν αρκετά εύκολα με αισθητήρες και συσκευές ελέγχου που διευκολύνουν τον απομακρυσμένο έλεγχο τους [5].

Επίσης, συνήθως οι λαμπτήρες παλαιότερης τεχνολογίας διοχετεύουν την παραγόμενη φωτεινή ροή τους προς όλες τις κατευθύνσεις, οπότε περισσότερο από το ήμισυ της εξόδου συνήθως ανακατευθύνεται προς τον επιθυμητό στόχο μέσω ανακλαστήρων και φακών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική ποσότητα φωτός να καταλήγει σε περιοχές που δεν έπρεπε να φωτιστούν, ενώ παράλληλα εξαπλώνεται ανομοιόμορφα σε όλη την φωτιζόμενη επιφάνεια. Επιπλέον οι λαμπτήρες παλαιότερης τεχνολογίας συνήθως καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, συμβάλλουν στη αύξηση της θάμβωσης της εγκατάστασης, αλλά και στην επιδείνωση του φαινομένου της φωτορύπανσης. Όταν μια φωτεινή πηγή LED αντικαθιστά για παράδειγμα ένα λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης, η φωτεινή πηγή LED μπορεί να καλύψει τις ίδιες απαιτήσεις φωτισμού παράγοντας την μίση φωτεινή ροή από τον λαμπτήρα νατρίου [6].

Τέλος, ακόμα ένα σημαντικό πλεονέκτημα των φωτεινών πηγών LED έναντι των υπολοίπων είναι ότι δεν περιέχουν επικίνδυνες χημικές ουσίες στο εσωτερικό τους όπως για παράδειγμα οι λάμπες φθορισμού ή λαμπτήρες υψηλής εκκένωσης που περιέχουν υδράργυρο [7].

Σίγουρα υπάρχουν επιπλέον θετικά στοιχεία των LED όπως η καλύτερη απόδοση τους σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος ή η απουσία UV ακτινοβολίας αλλά τα στοιχεία που αναλύθηκαν αποτελούν και τους σημαντικότερους λόγους επιλογής των φωτιστικών με φωτεινές πηγές LED.

### **2.2.2 Μειονεκτήματα φωτεινών πηγών LED**

Αρνητικό χαρακτηριστικό αποτελεί σίγουρα η ακριβότερη τιμή αγοράς τους, έναντι ενός τυπικού φωτιστικού, καθώς επιπλέον πρέπει να αγοραστεί και ο κατάλληλος εξοπλισμός όπως driver και συσκευές ελέγχου.

Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια λειτουργίας μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο το σύνολο του εξοπλισμού γι' αυτό είναι απαραίτητη μια σωστή προσεκτική θερμική διαχείριση του φωτιστικού. Αν οι παραπάνω υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια λειτουργίας του συνδυαστούν και με υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα λειτουργίας του φωτιστικού.

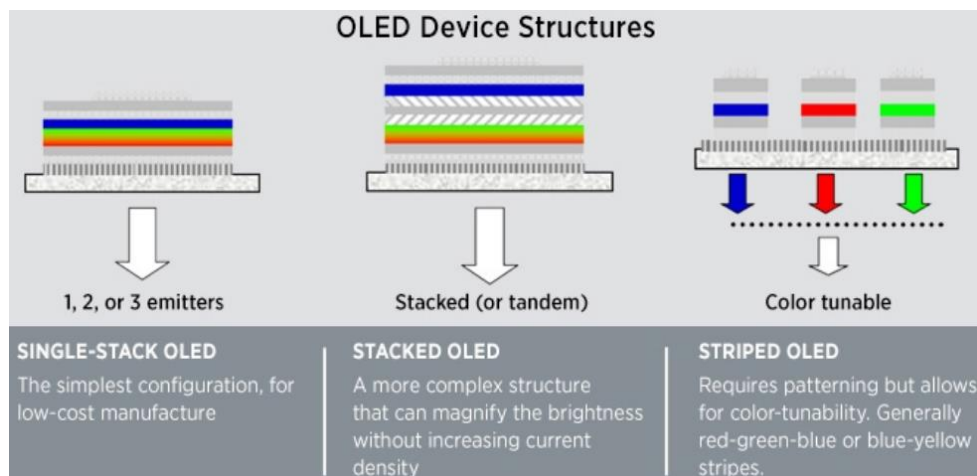
Τέλος, τα φωτιστικά με LED και κυρίως αυτά του ψυχρού λευκού εκπέμπουν περισσότερο μπλε φως απ' ότι οι υπόλοιποι λαμπτήρες με αποτέλεσμα την επιδείνωση του φαινομένου της φωτορύπανσης.



## 2.3 Φωτεινές πηγές OLED

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται μια νέα κατηγορία φωτεινών πηγών τα OLED. Πρόκειται για οργανικά LED πράγμα που σημαίνει ότι τα βασικά δομικά τους στοιχεία είναι οργανικά (με βάση τον άνθρακα) υλικά. Σε αντίθεση με τα LED, τα οποία είναι μικρές πηγές φωτός, τα OLED υλοποιούνται σε φύλλα που είναι πηγές φωτός διάχυτης έκτασης. Η τεχνολογία των OLED αναπτύσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς και υπάρχουν ήδη αρκετά προϊόντα που μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα LED όσον αφορά την αποδοτικότητα τους, τη διάρκεια ζωής τους και την ποιότητας χρώματος. Ωστόσο, τα OLED είναι ακόμα μερικά χρόνια μακριά από την εκτεταμένη χρήση για την κάλυψη αναγκών φωτισμού, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους τους [8].

Η δομή του OLED είναι μια συσκευή στερεάς κατάστασης που αποτελείται από ένα λεπτό, με βάση τον άνθρακα στρώμα ημιαγωγών που εκπέμπει φως όταν εφαρμόζεται τάση από γειτονικά ηλεκτρόδια. Προκειμένου να διαφύγει το φως από τη συσκευή, τουλάχιστον ένα από τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι διαφανές. Η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός καθορίζεται από την ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που εφαρμόζεται, ενώ το χρώμα του φωτός προσδιορίζεται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου υλικού εκπομπής. Για την δημιουργία λευκού φωτός, χρησιμοποιούνται κόκκινοι, πράσινοι και μπλε πομποί που μπορούν να τοποθετούνται σε διάφορες διατάξεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Πιθανές διατάξεις κόκκινων, πράσινων και μπλε πομπών OLED συσκευής

Η αποδοτικότητα και η χαμηλή κατανάλωση των OLED πλησιάζουν αρκετά τις αντίστοιχες τιμές των LED, αλλά οι δύο τεχνολογίες διαφέρουν αρκετά. Έτσι τα OLED είναι συνήθως μεγάλης επιφάνειας, χαμηλότερης φωτεινότητας, ενώ είναι πιο λεπτά από τις λυχνίες LED. Επιπλέον, ενώ τα LED είναι συμπυκνωμένες πηγές φωτεινής έντασης, τα OLED μπορούν να καταναείμουν την φωτεινή ροή τους σε μεγαλύτερες γωνίες, έτσι μπορούν να χαρακτηριστούν ως πιο διάχυτες φωτεινές πηγές, οι οποίες μπορεί να είναι πιο πρακτικές για τον γενικό ατμοσφαιρικό φωτισμό [9]. Το διάχυτο φως από τα OLED τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται πολύ κοντά στην επιφάνεια εργασίας χωρίς να δημιουργούν λάμψη για το χρήστη, πράγμα που σημαίνει ότι λιγότερο συνολικό φως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθούν τα

επιθυμητά επίπεδα φωτισμού. Τα OLED μπορούν να γίνουν πολύ λεπτά, επιτρέποντας την εύκολη προσκόλληση στις επιφάνειες των τοίχων και των οροφών. Επίσης είναι ικανά να πάρουν μορφή οποιουδήποτε σχήματος και να εκπέμπουν φως και από τις δύο πλευρές της συσκευής επιτρέποντας μια εντελώς νέα εμπειρία φωτισμού [10].

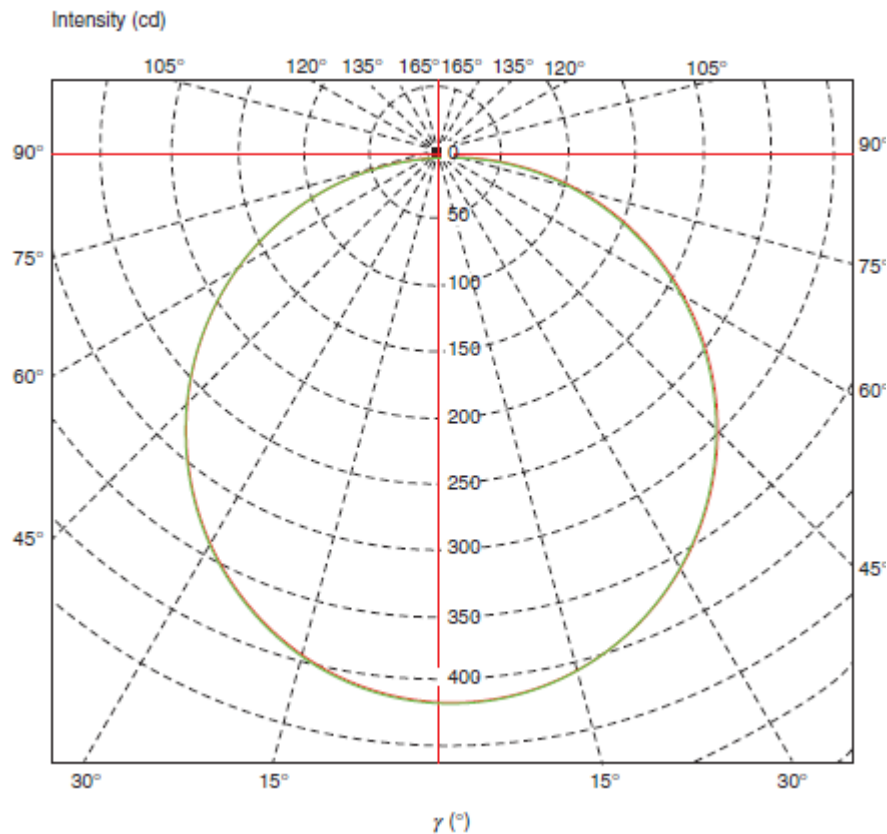
Σε αντίθεση με τα φωτιστικά που χρησιμοποιούν φωτεινές πηγές LED, οι φωτεινές πηγές OLED δεν έχουν μεγάλες απώλειες εξαιτίας της θερμοκρασίας, επειδή συνήθως χρησιμοποιούνται με το πλαίσιο τους εκτεθειμένο στο περιβάλλον επιτυγχάνοντας περιορισμένες απώλειες οπτικής απόδοσης του φωτιστικού. Παρόλα αυτά, η συνολική τους αποδοτικότητα εξαρτάται όπως και στα LED από την επιλογή ενός καλής κατασκευής και απόδοσης driver, καθώς χρειάζονται σταθερή DC τάση για να λειτουργήσουν.

Σήμερα, τα λευκά OLED έχουν καταφέρει τιμές αποδοτικότητας της τάξεως των 128lm/W σε φωτεινή ένταση 1000 cd/m<sup>2</sup> και έως 136lm/W σε φωτεινή ένταση 100 cd/m<sup>2</sup>. Θεωρητικά μπορούν να επιτευχθούν τιμές αποδοτικότητας έως και 350lm/W στο φάσμα λευκού φωτός. Αυτές οι επιδόσεις θα κάνουν ιδιαίτερα ανταγωνιστικά τα φωτιστικά OLED στο μέλλον, καθώς πρώτα θα πρέπει να ξεπεραστούν ορισμένοι αρνητικοί παράγοντες όπως το ακριβό κόστος παραγωγής τους και η υλοποίηση μεγάλων φωτεινών επιφανειών υψηλής αποδοτικότητας με υψηλές τιμές φωτεινής έντασης και ικανοποιητική διάρκεια ζωής. Στην αγορά του οδοφωτισμού ακόμα δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τα φωτιστικά με φωτεινές πηγές LED, γι' αυτό και δεν χρησιμοποιούνται ακόμα [11].

## 2.4 Οπτικά φωτιστικών LED

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που υπάρχει σε όλα τα φωτιστικά LED είναι τα οπτικά που χρησιμοποιούνται προκειμένου να κατευθύνουν την φωτεινή ροή της φωτεινής πηγής στο οδόστρωμα. Η ύπαρξη διαφορετικών τύπων οπτικών επιτρέπει την δημιουργία διαφορετικών κατανομών φωτεινής ροής της φωτεινής πηγής, με αποτέλεσμα να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις εγκαταστάσεων οδοφωτισμού διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Μάλιστα, στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζονται διαφορετικά πολικά διαγράμματα, προκειμένου να βρεθεί το κατάλληλο που εξυπηρετεί τους στόχους του κάθε σεναρίου.

Η κατανομή της φωτεινής έντασης ενός μπλε LED με την υλοποίηση μίγματος φωσφόρου φαίνεται στην εικόνα 2.2. Εξετάζοντας την κατανομή αυτή κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη ενός οπτικού το οποίο να ανακατευθύνει την φωτεινή ροή από το φωτιστικό του ιστού στο οδόστρωμα, περιορίζοντας την φωτεινή ροή στην επιθυμητή φωτιζόμενη επιφάνεια.



Εικόνα 2.3 Κατανομή φωτεινής έντασης φωτεινών πηγών LED

### 2.4.1 Φακοί

Οι φακοί (Lenses) τοποθετούνται πάνω στα LED και συμβάλλουν στην κατανομή της φωτεινής ροής αλλά και στην μείωση της θάμβωσης. Οι φακοί μπορεί να είναι κατασκευασμένοι είτε από πλαστικό είτε από γυαλί.

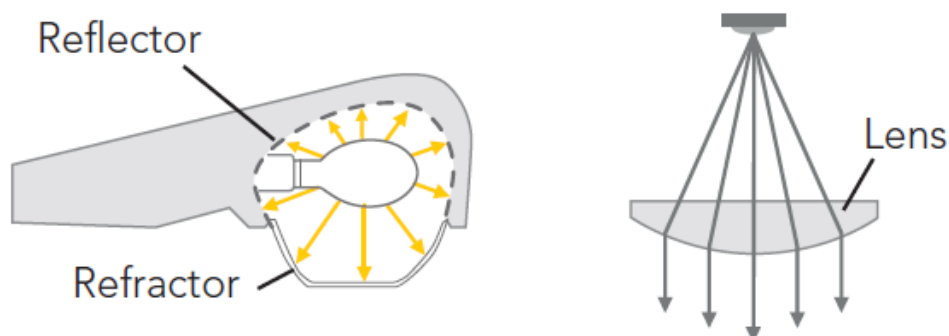
Οι πλαστικοί φακοί μπορούν να αντέξουν τις θερμοκρασίες  $90^{\circ}\text{C}$ – $130^{\circ}\text{C}$  που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια λειτουργίας και τοποθετούνται ακριβώς πάνω στο τσιπ LED. Επίσης, επιτυγχάνεται οπτική απόδοση της τάξεως 85%-90% με την χρησιμοποίηση αυτών των φακών. Τα θετικά των πλαστικών φακών είναι το χαμηλό κόστος τους, και το χαμηλό βάρος τους.

### 2.4.2 Κατοπτρικοί φακοί

Τα κάτοπτρα (Reflector) χρησιμοποιούνται για την ανακατεύθυνση της εξόδου φωτός και επιτρέπουν τον σχεδιασμό οπτικών υψηλής αποδοτικότητας χρησιμοποιώντας είτε στοιχεία LED είτε διατάξεις LED. Τα κάτοπτρα δημιουργούν πολλές εικόνες της φωτεινής πηγής δημιουργώντας έτσι μια ομοιόμορφη ένταση φωτισμού φωτιζόμενη επιφάνεια. Επιπλέον συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της φωτορύπανσης και της θάμβωσης.

### 2.4.3 Φακοί διάθλασης

Οι διαθλαστικοί ή πρισματικοί φακοί (Refractor) ανακατευθύνουν την φωτεινή ροή του λαμπτήρα και παρέχουν πρόσθετη προστασία έναντι βλάβης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι φακοί διάθλασης δεν προτιμώνται στα φωτιστικά τύπου LED. Αυτό συμβαίνει γιατί οι φωτεινές πηγές LED είναι κατευθυντικές πηγές φωτός σε αντίθεση με τα παραδοσιακά φωτιστικά, κάτι που φαίνεται και στο πολικό διάγραμμα καθώς κατανέμουν την φωτεινή ροή τους σε γωνία  $2\pi$ , ενώ τα συμβατικά φωτιστικά την κατανέμουν σε γωνία  $4\pi$ . Έτσι οι λυχνίες LED που είναι εξοπλισμένες με ανακλαστήρες, μεγάλο μέρος του φωτός περνάει έξω από το σύστημα χωρίς καν να προσκρούει στον ανακλαστήρα. Αυτό μειώνει το εύρος της κατανομής της δέσμης φωτός και μπορεί να προκαλέσει λάμψη. Οι φακοί, ωστόσο, βοηθούν στην καθοδήγηση σχεδόν κάθε ακτίνας φωτός που εκπέμπεται από το LED.



Εικόνα 2.4 Φακός διάθλασης, κατοπτρικός φακός, φακός σε LED

## **Βιβλιογραφία**

1. *LED Street Lighting Procurement & Design Guidelines*
2. *Φωτοτεχνία, Εκδόσεις Τζιολα Φ.Β.Τοπαλής, Α.Οικονόμου, Σ.Κουρτέτση*
3. *Thermal Management for LED Applications Michael Pecht, Diganta Das, Moon-Hwan Chang (auth.), Clemens J.M. Lasance, András Poppe (eds.)*
4. *LED Lighting Technology and Perception, T.Q. Khan, P. Bodrogi , Q.T. Vinh, H. Winkler*
5. [www.wigan.gov.uk/Docs/PDF/Resident/Parking-Roads-Travel/LED-street-lights-FAQ.pdf](http://www.wigan.gov.uk/Docs/PDF/Resident/Parking-Roads-Travel/LED-street-lights-FAQ.pdf)
6. [www.energy.gov/sites/prod/files/2019/01/f58/postings\\_06-21-16.pdf](http://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/01/f58/postings_06-21-16.pdf)
7. [www.currentbyge.com/ideas/8-advantages-of-led-lighting](http://www.currentbyge.com/ideas/8-advantages-of-led-lighting)
8. [www.energy.gov](http://www.energy.gov)
9. *SOLAR-POWERED LED-BASED LIGHTING FACILITIES: AN OVERVIEW ON RECENT TECHNOLOGIES AND EMBEDDED IoT DEVICES TO OBTAIN WIRELESS CONTROL, ENERGY SAVINGS AND QUICK MAINTENANCE, Patrizio Primiceri and Paolo Visconti*
10. *Oled lighting Products : capabilities, Challenges, Potential, May 2016 USA Department of energy*
11. *Organic Light-Emitting Materials and Devices, Zhigang Rick Li*

## Κεφάλαιο Τρίτο : Κλάσεις Οδοφωτισμού

### 3.1 Εισαγωγή

Ο βασικός στόχος του οδοφωτισμού είναι η ασφάλεια στους δρόμους κατά την διάρκεια της νύχτας. Ο σωστός οδοφωτισμός βοηθάει τους οδηγούς να αναγνωρίζουν τους ανθρώπους και τα αντικείμενα πάνω στον δρόμο είτε στο περιβάλλοντα χώρο του. Ο κατάλληλος φωτισμός σύμφωνα με μελέτες μπορεί να αποτρέψει τα ατυχήματα κατά την διάρκεια της νύχτας.

Τα απαραίτητα βήματα που απαιτούνται για τον ορθό και ολοκληρωμένο σχεδιασμό έργων οδοφωτισμού, όπως ορίζονται στον τεχνικό οδηγό του τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδος, είναι τα παρακάτω.

- Επιλογή κλάσεων οδοφωτισμού.
- Εκπόνηση μελέτης οδοφωτισμού.
- Υπολογισμός δεικτών ενεργειακής επίδοσης [1] .

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την διαδικασία επιλογής κλάσεων οδοφωτισμού όπως ορίζεται στην τεχνική έκθεση CEN/TR 13201-1, ενώ τα βήματα της εκπόνησης μελέτης οδοφωτισμού και του υπολογισμού δεικτών ενεργειακής απόδοσης περιγράφονται στο έβδομο κεφάλαιο. Επιπλέον, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ακόμα μια μέθοδος επιλογής κλάσεων οδοφωτισμού, η οποία ορίζεται στο παράρτημα της τεχνικής έκθεσης PD CEN/TR 13201-1:2014 του οδηγού επιλογής κλάσεων. Ο σωστός υπολογισμός της κλάσης ενός δρόμου είναι ιδιαίτερα σημαντικός και υπεύθυνη διαδικασία καθώς καθορίζονται οι ελάχιστες (ή μέγιστες) τιμές των παραμέτρων με βάση τις οποίες υλοποιείται μια εγκατάσταση οδοφωτισμού. Οι παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες κρίνεται μια εγκατάσταση οδοφωτισμού είναι η μέση τιμή λαμπρότητας οδοστρώματος, η ολική ομοιομορφία λαμπρότητας, η κατά μήκος ομοιομορφία λαμπρότητας, ο δείκτης θάμβωσης της εγκατάστασης και ο δείκτης υπολογισμού έντασης φωτισμού περιβάλλοντος χώρου του οδοστρώματος. Οι παραπάνω παράμετροι αναλύονται στην συνέχεια του κεφαλαίου. Λανθασμένη εκτίμηση επιλογής κλάσης μπορεί να οδηγήσει είτε στον ελλιπή φωτισμό ενός δρόμου, είτε στον υπερβολικό φωτισμό με συνέπειες στην κατανάλωση ενέργειας αλλά και στην επιδείνωση του φαινομένου της φωτορύπανσης.

## 3.2 Επιλογή κλάσης

### 3.2.1 Επιλογή κλάσης μέσω του πίνακα βαρών

Ο σχεδιασμός οδοφωτισμού αφορά ένα σύνολο βημάτων/δράσεων, που πρέπει να εκτελούνται από τον μελετητή, από την αρχή του έργου μέχρι και πριν την υλοποίηση αυτού. Η κατηγοριοποίηση των οδών με βάση τις απαιτήσεις σε φωτισμό καθορίζονται από την τεχνική έκθεση CEN/TR 13201-1 και αφορά όλες τις περιοχές όπου υπάρχει κυκλοφορία οχημάτων, ποδηλάτων, πεζών και συνδυασμούς αυτών. Αφορά σε κάθε τύπο οδού από έναν απλό δρόμο ήπιας κυκλοφορίας, μία επαρχιακή οδό, ένα πολυσύχναστο δρόμο πόλεως έως έναν κλειστό αυτοκινητόδρομο ταχείας κυκλοφορίας. Αφορά επίσης, σε πεζόδρομους, ποδηλατοδρόμους και στις περιοχές που συναντώνται ή διασταυρώνονται οδοί διαφορετικών ή όμοιων χρηστών, για παράδειγμα διαβάσεις πεζών, διασταυρώσεις, ισόπεδοι ή ανισόπεδοι κόμβοι κ.λπ. Η τεχνική έκθεση CEN/TR 13201-1 χρησιμοποιεί μία διαδικασία επιλογής βάση της οποίας αποφασίζεται η κλάση φωτισμού M1 - M6, C0 - C5 και P1- P6. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι κλάσεις M1 - M6 καθώς αυτές θα χρησιμοποιηθούν και στην συνέχεια στα επόμενα κεφάλαια.

Τα κριτήρια επιλογής για την κάθε κλάση βασίζονται στην γεωμετρία του δρόμου, στα λειτουργικά χαρακτηριστικά και στο περιβάλλον του. Πιο αναλυτικά τα κριτήρια είναι :

- Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας.
- Κυκλοφοριακός φόρτος.
- Σύνθεση χρηστών.
- Διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας.
- Πυκνότητα κόμβων.
- Σταθμευμένα οχήματα.
- Φωτισμός περιβάλλοντος.
- Δυσκολία οδήγησης.

#### **Αυτοκινητόδρομοι / Οδοί μηχανοκίνητων οχημάτων - κλάση M**

Οι αυτοκινητόδρομοι της κλάσης M είναι οδοί μέτριας έως υψηλής ταχύτητας κυκλοφορίας. Παρόλο αυτά τους αυτοκινητόδρομους τους διασχίζουν και οχήματα χαμηλής ταχύτητας ή δημιουργούνται συνθήκες οι οποίες δυσκολεύουν την οδήγηση. Για αυτούς τους λόγους, είναι απαραίτητος ο κατάλληλος φωτισμός ώστε να υπάρξει το ιδανικό περιβάλλον για να αποφευχθούν όσο δυνατόν περισσότερα ατυχήματα. Μεγαλύτερη ασφάλεια επιτυγχάνεται εφόσον τα επίπεδα λαμπρότητας είναι επαρκής, υπάρχει ομοιόμορφη ένταση φωτισμού και χαμηλές τιμές θάμβωσης [2].

Για να ικανοποιηθούν τα κριτήρια του προτύπου θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τα παρακάτω :

- Η τιμή της *λαμπρότητας* του οδοστρώματος να είναι πάνω από το όριο που ορίζεται για κάθε κλάση.

Η πρώτη βασική παρατήρηση ενός φωτιζόμενου δρόμου είναι ένα επαρκές επίπεδο λαμπρότητας. Ένας ακόμα παράγοντας, που θα αναφερθεί παρακάτω, σχετίζεται με την ομοιομορφία της λαμπρότητας. Όταν λοιπόν σχεδιάζεται η εγκατάσταση φωτισμού σε ένα δρόμο, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπ' όψιν η κατανομή της λαμπρότητας της εγκατάστασης. Η λαμπρότητα του οδοστρώματος εξαρτάται τόσο από το επίπεδο της έντασης φωτισμού, όσο και από τις αντανακλαστικές ιδιότητές του.

Επειδή, όπως αναφέρθηκε, η λαμπρότητα σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά αντανάκλασης του δρόμου, η κατανομή λαμπρότητας δεν μπορεί να εκφραστεί με μια απλή μαθηματική έκφραση, αλλά προκύπτει μόνο από ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων.

Υπολογίζεται λοιπόν, η αναλογία της μικρότερης προς την μεγαλύτερη τιμή λαμπρότητας, που μετρήθηκε κατά μήκος μιας νοητής γραμμής που βρίσκεται στο κέντρο της λωρίδας του δρόμου. Η μέση λαμπρότητα είναι ο μικρότερος λόγος από τους παραπάνω που υπολογίστηκαν.

- Η τιμή ολικής ομοιομορφίας του οδοστρώματος να είναι πάνω από το όριο που ορίζεται για κάθε κλάση.

Ο λόγος ελάχιστης προς μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος ( $L_{min}/L_{avg}$ ) ονομάζεται συνολική ομοιομορφία και συμβολίζεται με  $U_0$ .

- Η τιμή της κατά μήκος ομοιομορφίας του οδοστρώματος να είναι πάνω από το όριο που ορίζεται για κάθε κλάση.

Η κατά μήκος ομοιομορφία ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ελάχιστης προς την μέγιστη λαμπρότητα που υπολογίζεται σε μια γραμμή παράλληλη της λωρίδας του δρόμου.

- Η τιμή θάμβωσης (TI) του οδοστρώματος να είναι κάτω από το όριο που ορίζεται για κάθε κλάση.

Χρησιμοποιείται ο δείκτης TI (%), όπου ορίζεται ως η ποσότητα της έξτρα αντίθεσης που απαιτείται για να ξαναγίνει ορατό ένα αντικείμενο υπό συνθήκες θάμβωσης. Ο δείκτης TI είναι ένας τρόπος μέτρησης της απώλειας ορατότητας εξαιτίας της θάμβωσης ανικανότητας που προκαλείται από τα φωτιστικά.

- Η τιμή του δείκτη EIR να είναι μεγαλύτερη από το όριο που ορίζεται για κάθε κλάση.

Ο δείκτης EIR είναι ο λόγος μεταξύ της μέσης οριζόντιας έντασης φωτισμού σε μια λωρίδα, μόλις έξω από τα όρια του οδοστρώματος προς την μέση οριζόντια ένταση φωτισμού σε μια λωρίδα μέσα στα όρια του οδοστρώματος.



Πίνακας 3.1 Επιλογή Κλάσεων

Κριτήριο	Επιλογές - (Βάρος)	Περιγραφή	
<b>Ταχύτητα σχεδιασμού ή ορίου ταχύτητας</b>	Πολύ Υψηλή (2)	$v \geq 100$ km/h	
	Υψηλή (1)	$70 < v < 100$ km/h	
	Μέση (-1)	$70 < v < 40$ km/h	
	Χαμηλή (-2)	$v \leq 40$ km/h	
<b>Κυκλοφοριακός Φόρτος</b>		Αυτοκινητόδρομοι, κατευθύνσεις πολλαπλών λωρίδων	Αυτοκινητόδρομοι, κατευθύνσεις πολλαπλών λωρίδων
	Υψηλός(1)	>65% της μέγιστης χωρητικότητας	>65% της μέγιστης χωρητικότητας
	Μέσος (0)	35% - 65% της μέγιστης χωρητικότητας	35% - 65% της μέγιστης χωρητικότητας
	Χαμηλός (-1)	<35% της μέγιστης χωρητικότητας	<35% της μέγιστης χωρητικότητας
<b>Σύνθεση χρηστών</b>	Μεικτή με μεγάλο ποσοστό μη-μηχανοκίνητων (2)		
	Μεικτή (1)		
	Μόνο μηχανοκίνητα (0)		
<b>Διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας</b>	Όχι (1)		
	Ναι (0)		
<b>Πυκνότητα κόμβων</b>		Διασταυρώσεις / km	Απόσταση μεταξύ ανισόπεδων κόμβων (km)
	Υψηλή (1)	>3	<3
	Μέση (0)	$\leq 3$	$\geq 3$
<b>Σταθμευμένα οχήματα</b>	Παρόντα (1)		
	Απόντα (0)		
<b>Φωτισμός περιβάλλοντος</b>	Υψηλός (1)	Εμπορικοί οδοί, διαφημιστικές πινακίδες, αθλητικές εγκαταστάσεις, σταθμοί κ.λπ.	
	Μέσος (0)	Συνήθεις καταστάσεις	
	Χαμηλός (-1)		
<b>Δυσκολία οδήγησης</b>	Πολύ υψηλή (2)		
	Υψηλή (1)		
	Χαμηλή (0)		

Η τελική επιλογή της κλάσης φωτισμού σε κάθε περίπτωση προκύπτει με το άθροισμα των βαρών κάθε κριτηρίου και με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$M = 6 - VWS$$

όπου M αντίστοιχη κλάση φωτισμού και VWS το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1. Από τη σχέση (1) προκύπτουν οι κλάσεις M1, M2, M3, M4, M5 και M6. Επίσης, αν  $VWS < 0$  τότε  $VWS=0$  και δρόμος προκύπτει κατηγορίας κλάσης M6. Αντίθετα, αν  $M \leq 0$  τότε  $M=1$  ο δρόμος προκύπτει κλάσης M1.

### 3.2.2 Επιλογή κλάσης μέσω εναλλακτικής μεθόδου

Στο παράρτημα της τεχνικής έκθεσης CEN/TR 13201-1:2014 παρουσιάζεται ακόμα μια μέθοδος επιλογής κλάσεων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε λειτουργική ή διοικητική οδική ταξινόμηση, που ορίζεται από τις αρχές των οδικών αρτηριών, και παρέχει μια πιο εξειδικευμένη λύση σε κάθε κατηγορία φωτισμού. Οι κατηγορίες οδών είναι οι κύριες και φαίνονται στην πρώτη στήλη του πίνακα. Στον πίνακα, οι διαδοχικές στήλες επιτρέπουν την προοδευτική επιλογή του βάρους πέντε διαφορετικών συντελεστών που συνδέονται με τις παραμέτρους που αναφέρονται στην κεφαλίδα του πίνακα.

Οι παράμετροι είναι:

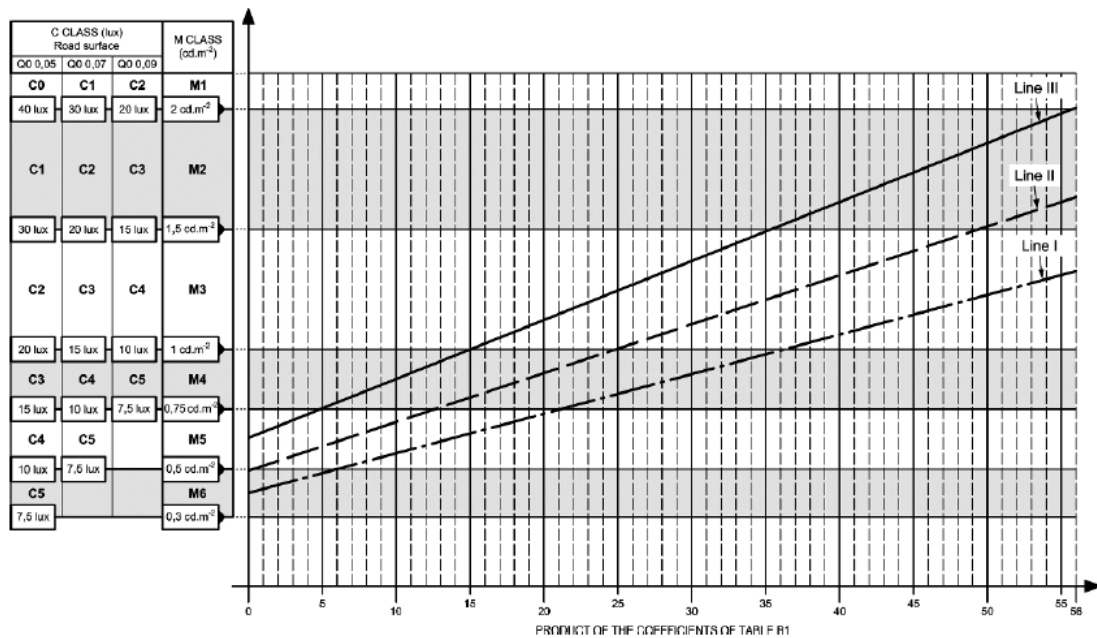
- Οδικός τύπος και όριο ταχύτητας.
- Σύνθεση κυκλοφορίας.
- Κυκλοφοριακός Φόρτος.
- Φως περιβάλλοντα χώρου.
- Φορτίο πνευματικής εργασίας (Δυσκολία Οδήγησης).

Ο συνολικός σταθμισμένος συντελεστής προκύπτει από το γινόμενο των πέντε συντελεστών που συνδέονται με αυτές τις παραμέτρους. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τρεις πρώτες παράμετροι αλληλεξαρτώνται και έχουν πάντοτε επιρροή στον τελικό συντελεστή. Αντίθετα οι υπόλοιπες δυο παράμετροι μπορεί να επηρεάσουν ή και να μην επηρεάσουν τον τελικό συντελεστή. Σε «κανονικές» καταστάσεις οι υπόλοιπες δύο παράμετροι δεν έχουν καμία επίδραση και ο συντελεστής αυτός είναι ίσος με 1, ενώ όταν η επίδραση αυτών είναι υψηλή, ο συντελεστής είναι ίσος με 1,25. Το ποσό πιθανή είναι η ύπαρξη των τελευταίων δυο παραμέτρων, μεταφράζεται στον πίνακα με την χρήση των συμβόλων: αν εμφανίζονται στην εγκατάσταση (●) και (-) σε περίπτωση που δεν εμφανίζονται στην συγκεκριμένη εγκατάσταση.

Ανάλογα με τους συνδυασμούς που προκύπτουν, ο συνολικός συντελεστής μπορεί να προκύψει σε μία από τις τρεις στήλες με τίτλο: Γραμμή I, Γραμμή II και Γραμμή III. Άρα ο συνολικός συντελεστής για την συγκεκριμένη εγκατάσταση οδοφωτισμού, θα αντιστοιχεί σε μια εκ των παραπάνω γραμμών. Το τελευταίο βήμα στη διαδικασία ταξινόμησης είναι η χρησιμοποίηση του συνολικού συντελεστή στο διάγραμμα εικόνας 3.2 . Στο διάγραμμα αυτό, οι τρεις ευθείες γραμμές έχουν σχεδιαστεί σε ένα σύστημα συντεταγμένων και ορίζονται αντίστοιχα ως Γραμμή I, Γραμμή II και Γραμμή III. Στην συνέχεια, ο μελετητής εξετάζοντας σε ποια γραμμή αντιστοιχεί ο ολικός συντελεστής της εγκατάστασης από τον πίνακα, τοποθετεί την τιμή του συντελεστή ως τετμημένη της ευθείας που ανήκει και βρίσκει την αντίστοιχη τεταγμένη, έτσι ώστε να υπολογίσει την ελάχιστη τιμή της λαμπρότητας της εγκατάστασης που απαιτείται [3].

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

Εικόνα 3.1 Πίνακας εναλλακτικής μεθόδου επιλογής κλάσεων



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα επιλογής κλάσεων

## **Βιβλιογραφία**

1. *LED Street Lighting Procurement & Design Guidelines*
2. *Σχεδιασμός και Έλεγχος Εγκαταστάσεων Οδοφωτισμού Τεχνική Οδηγία Επιμελητηρίου Ελλάδας 2018*
3. *PD CEN/TR 13201-1:2014 Road lighting Part 1: Guidelines on selection of lighting classes BSI Standards*

## Κεφάλαιο Τέταρτο : Σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων επιλογής κλάσεων

### 4.1 Εισαγωγή

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το ευρωπαϊκό πρότυπο που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των εγκαταστάσεων οδοφωτισμού. Μάλιστα στον τρόπο επιλογής κλάσεων παρουσιάστηκαν δυο μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η πρώτη είναι η κλασική μέθοδος μέσω των βαρών που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.2.1 , ενώ η δεύτερη που αποτυπώνεται στο παράρτημα του προτύπου CEN/TR 13201-1:2014 περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.2.2. Στο παρόν κεφάλαιο, λοιπόν θα εφαρμοστούν οι δυο αυτές μέθοδοι σε τυχαίους καννάβους με διαφορετικά χαρακτηριστικά προκειμένου να σχολιαστούν τα αποτελέσματά τους.

### 4.2 Πρώτος ενδεικτικός κάνναβος

Εξετάζοντας τώρα τον πρώτο ενδεικτικό κάνναβο υπολογίζεται, σε πρώτο στάδιο, η κλάση του με την χρήση του πίνακα 3.1 του κεφαλαίου 3. Πιο αναλυτικά επιλέχθηκε όριο ταχύτητας μεταξύ των τιμών 40km/h – 70km/h , με αποτέλεσμα να προκύπτει βάρος ίσο με -1, ενώ ο κυκλοφοριακός φόρτος θεωρήθηκε υψηλός σε δρόμο κατευθύνσεων δυο λωρίδων όποτε το βάρος θα είναι ίσο με 1. Επίσης, η σύνθεση χρηστών θεωρείται μεικτή (βάρος ίσο με 1), ενώ ο θεωρήθηκε ότι υπάρχει διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας, άρα προκύπτει βάρος ίσος με 0. Επιπλέον, επιλέχθηκε υψηλή πυκνότητα κόμβων (βάρος ίσο με 1) και παρουσία σταθμευμένων οχημάτων (βάρος ίσο με 1). Τέλος, θεωρήθηκε υψηλός φωτισμός περιβάλλοντος (βάρος ίσο με 1) , ενώ η δυσκολία οδήγησης θεωρήθηκε υψηλή (βάρος ίσο με 1). Το άθροισμα των παραπάνω συντελεστών είναι ίσο με 5, επομένως σύμφωνα με το τρόπο υπολογισμού της κλάσης του καννάβου, προκύπτει ότι είναι κατηγορίας M1. Η κλάση M1 ορίζει την τιμή του κατώτατου ορίου λαμπρότητας ίση με 2 cd / m<sup>2</sup>.

Σε δεύτερο στάδιο όπως περιγράφηκε και στην εισαγωγή θα πρέπει να υπολογιστεί η κλάση του ίδιου καννάβου με τον τρόπο που προτείνεται στο παράρτημα αντιστοιχίζοντας προσεκτικά τα ίδια χαρακτηριστικά που του αποδόθηκαν για το υπολογισμό της κλάσης με την μέθοδο των βαρών. Ξεκινώντας λοιπόν αρχικά επιλέγεται ο κύριος αστικός δρόμος (main urban road), καθώς έχει ως όριο ταχύτητας τα 70km/h (συντελεστής ίσος με 4 ), όριο που θεωρήθηκε και στον πίνακα του πρώτου τρόπου. Στην συνέχεια, η σύνθεση χρηστών θεωρήθηκε μικτή όπως και στην πρώτη περίπτωση με αποτέλεσμα να προκύπτει συντελεστής ίσος με 3, ενώ και ο κυκλοφοριακός φόρτος θεωρήθηκε υψηλός με συντελεστή ίσο με 3. Τέλος, με δεδομένη την υψηλή δυσκολία οδήγησης και τον έντονο φωτισμό του περιβάλλοντος προκύπτει και ο συντελεστής ίσος με 1,25 για κάθε παράμετρο. Το γινόμενο όλων των παραπάνω συντελεστών είναι ίσο με 56. Εφόσον, λοιπόν χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι συντελεστές το γινόμενο αντιστοιχεί στην γραμμή 3 και εξετάζοντας την εικόνα 3.2 το γινόμενο 56 αντιστοιχεί στην γραμμή 3 σε κλάση M1.

Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν οι δύο τρόποι υπολογισμού κλάσης του καννάβου οδήγησαν στο ίδιο αποτέλεσμα καθώς ο κάνναβος ορίστηκε κατηγορίας M1 και με τους δυο τρόπους. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της λαμπρότητας οδοστρώματος που προτείνεται και από τις δυο υλοποιήσεις είναι ίση με 2cd/m<sup>2</sup>, καθώς ενώ στην πρώτο τρόπο ορίζεται αυστηρά η παραπάνω τιμή, με τον τρόπο του

παραρτήματος η τιμή λαμπρότητας του οδοστρώματος μπορεί να αλλάξει για δρόμους ίδιας κλάσης και εξαρτάται κυρίως από το γινόμενο. Για παράδειγμα αν το γινόμενο των συντελεστών ήταν ελαφρώς μικρότερο από 56 ο δρόμος θα ήταν κατηγορίας M2 ενώ το κατώτατο όριο λαμπρότητας θα ήταν περίπου ίσο με  $1,9 \text{ cd/m}^2$ . Αντίθετα μια μεγαλύτερη τιμή γινομένου συντελεστών θα όριζε ελάχιστη τιμή λαμπρότητας πάνω από  $2 \text{ cd/m}^2$  με σταθερή όμως την κλάση του δρόμου και ίση με 1. Όποτε σαν πρώτο και βασικό συμπέρασμα θα μπορούσε να προκύψει η καλύτερη προσέγγιση όσον αφορά τις τιμές της λαμπρότητάς με την χρήση της μεθόδου του παρατήματος, καθώς σε κάθε κλάση προτείνεται ένα μεγάλο εύρος τιμών λαμπρότητας.

### 4.3 Δεύτερος ενδεικτικός κάνναβος

Ο δεύτερος ενδεικτικός κάνναβος έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τον πρώτο προσομοιάζοντας τα χαρακτηριστικά ενός αυτοκινητόδρομου ταχείας κυκλοφορίας. Ξεκινώντας πάλι από το κριτήριο (της μεθόδου επιλογής βαρών) που ορίζει τα όρια ταχύτητας επιλέγεται όριο ταχύτητας τα  $100 \text{ km/h}$  (βάρος ίσο με 2). Στην συνέχεια επιλέγεται μέσος κυκλοφοριακός φόρτος για αυτοκινητόδρομο πολλαπλών λωρίδων (βάρος ίσο με 0), η σύνθεση χρηστών είναι αποκλειστικά με μηχανοκίνητα (βάρος ίσο με 0) και υπάρχει διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας (βάρος ίσο με 0). Επίσης, η πυκνότητα κόμβων χαρακτηρίζεται ως μέση (βάρος ίσο με 0), ενώ προφανώς δεν υπάρχουν σταθμευμένα οχήματα (βάρος ίσο με 0). Τέλος, ο φωτισμός περιβάλλοντος χαρακτηρίζεται ως μέσος (βάρος ίσο με 0), ενώ η δυσκολία οδήγησης σε ένα τέτοιο δρόμο είναι χαμηλή (βάρος ίσο με 0). Το συνολικό άθροισμα των παραπάνω βαρών είναι ίσο με 2, με αποτέλεσμα η κλάση του συγκεκριμένου καννάβου να είναι ίση με M4. Η κλάση M4 ορίζει την τιμή του κατώτατου ορίου λαμπρότητας ίση με  $0,75 \text{ cd/m}^2$ .

Όπως και στον πρώτο κάνναβο έτσι και τώρα πρέπει να αντιστοιχηθούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά του καννάβου στην μέθοδο του παραρτήματος. Αρχικά, λοιπόν θεωρήθηκε αστικός αυτοκινητόδρομος (Urban motorway expressway) με όριο ταχύτητας τα  $110 \text{ km/h}$  (συντελεστής ίσος με 5), ενώ όπως και στην μέθοδο επιλογής βαρών η σύνθεση κίνησης αποτελείται αποκλειστικά από μηχανοκίνητα (συντελεστής ίσος με 2). Επιπλέον, ο κυκλοφοριακός φόρτος θεωρείται μέσος άρα προκύπτει συντελεστής ίσος με 2. Τέλος, επειδή ο φωτισμός περιβάλλοντος θεωρήθηκε μέσος ο συντελεστής σε αυτή την μέθοδο θα είναι ίσος με 0, ενώ το ίδιο ισχύει και με την παράμετρο της δυσκολίας οδήγησης η οποία θεωρήθηκε χαμηλή και έτσι ο συντελεστής της είναι ίσος με 0. Σύμφωνα, λοιπόν, με όλα τα παραπάνω το γινόμενο των συντελεστών είναι ίσο με 20 και αντιστοιχεί στην γραμμή 1 του διαγράμματος της εικόνας 3.2 όπου προκύπτει ότι ο κάνναβος είναι κατηγορίας M5.

Εξετάζοντας τώρα τα αποτελέσματα αυτή τη φορά είναι προφανής η διαφορά κλάσεων που προκύπτει από την υλοποίηση των δυο μεθόδων, καθώς στην πρώτη περίπτωση ο κάνναβος είναι κατηγορίας M4 ενώ με την δεύτερη μέθοδο ο κάνναβος είναι κατηγορίας M5. Παρόλα αυτά η διαφορά στην τιμή της λαμπρότητας του οδοστρώματος δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη όπως θα αναμέναμε εξαιτίας της διαφοράς κλάσεων. Η μέθοδος βαρών ορίζει αυστηρά για τις δρόμους κατηγορίας M4 ελάχιστη τιμή λαμπρότητας ίση με  $0,75 \text{ cd/m}^2$ . Αντίθετα εξετάζοντας την μέθοδο του παραρτήματος το γινόμενο 20 που αποτελεί την τετμημένη του διαγράμματος της εικόνας 3.2 και αντιστοιχεί στην ευθεία 1, προκύπτει ότι η ελάχιστη τιμή

λαμπρότητας που προτείνεται είναι ελαφρώς κάτω από το όριο των  $0,75 \text{ cd/m}^2$  (προσεγγιστικά προτείνονται τιμές μεταξύ  $0,7 \text{ cd/m}^2$  -  $0,74 \text{ cd/m}^2$ ). Θα μπορούσε λοιπόν να προκύψει το συμπέρασμα ότι η μέθοδος του παραρτήματος είναι πιο ακριβής καθώς προτείνει πιο ακριβείς τιμές λαμπρότητας οδοστρώματος που μπορούν να έχουν και ως αποτέλεσμα την υλοποίηση μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού χαμηλότερης κατανάλωσης και συνεπώς μικρότερου κόστους λειτουργίας.

#### 4.4 Τρίτος ενδεικτικός κάνναβος

Ο τελευταίος ενδεικτικός κάνναβος που επιλέχθηκε είναι και αυτός διαφορετικών χαρακτηριστικών σε σχέση με τους υπολοίπους και τα χαρακτηριστικά του προσομοιάζουν τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού δρόμου σε μια πυκνοκατοικημένη αστική περιοχή. Έτσι με βάση τα παραπάνω το όριο ταχύτητας δεν θα μπορούσε να ήταν μεγαλύτερο από  $40 \text{ km/h}$  (βάρος ίσο με -2), ενώ ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι χαμηλός (βάρος ίσο με -1). Επιπλέον, επιλέγεται σύνθεση κίνησης μεικτή (βάρος ίσο με 1), ενώ οι κατευθύνσεις κυκλοφορίας δεν διαχωρίζονται (βάρος ίσο με 0). Επίσης, η πυκνότητα κόμβων θεωρείται υψηλή (βάρος ίσο με 1) και υπάρχουν σταθμευμένα οχήματα (βάρος ίσο με 1). Τέλος, ο φωτισμός περιβάλλοντος θεωρείται μέσος (βάρος ίσο με 0) και η δυσκολία οδήγησης θεωρείται αρκετά υψηλή (βάρος ίσος με 2). Το τελικό άθροισμα των παραπάνω είναι ίσο με 3 και έτσι η κλάση του καννάβου προκύπτει M3. Η κλάση M3 ορίζει την τιμή του κατώτατου ορίου λαμπρότητας ίση με  $1 \text{ cd/m}^2$ .

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία θα πρέπει να αντιστοιχηθούν τα παραπάνω δεδομένα στην μέθοδο του παραρτήματος προκειμένου να υπολογιστεί η κλάση του καννάβου. Ξεκινώντας λοιπόν από την επιλογή του δρόμου επιλέχθηκε ο αστικός δρόμος με επικίνδυνες διασταυρώσεις (Urban Road Dangerous Intersections), καθώς έχει ανώτατο όριο ταχύτητας τα  $50 \text{ km/h}$ , ενώ το στοιχείο των επικίνδυνων διασταυρώσεων θα μπορούσε να αντιστοιχηθεί στην πυκνότητα κόμβων που περιγράφονται στην μέθοδο των βαρών. Η σύνθεση κίνησης χαρακτηρίζεται ως μεικτή με αποτέλεσμα να προκύπτει συντελεστής ίσος με 3 και ο όγκος κυκλοφορίας, αφού έχει ήδη χαρακτηριστεί χαμηλός, αντιστοιχεί σε συντελεστή ίσο με 1. Τέλος, η φωτεινότητα του περιβάλλοντος χαρακτηρίζεται ως μέση (συντελεστής ίσος με 1), ενώ η υψηλή δυσκολία οδήγησης μεταφράζεται με συντελεστή ίσο με 1,25. Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα παραπάνω, το γινόμενο των συντελεστών είναι ίσο με 11,25 και αντιστοιχεί στην γραμμή 2 του διαγράμματος της εικόνας 3.2 όπου προκύπτει ότι ο κάνναβος είναι κατηγορίας M5.

Στην τρίτη και τελευταία σύγκριση προκύπτει μεγάλη διαφορά μεταξύ των κλάσεων που προτείνει η κάθε μέθοδος. Αρχικά, πρέπει να τονιστεί ότι εξετάζοντας πιο προσεκτικά το διάγραμμα της εικόνας 3.2 προκύπτει από την τετμημένη 11,25 που αντιστοιχεί στην γραμμή 2 η προτεινόμενη λαμπρότητα οδοστρώματος περίπου ίση με  $0,75 \text{ cd/m}^2$  που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της λαμπρότητας οδοστρώματος της κατηγορίας M4. Πρακτικά, λοιπόν, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι απλά προκύπτει διαφορά μεταξύ μια κλάσης μεταξύ των δυο υλοποιήσεων. Παρόλα αυτά, ένα συμπέρασμα που θα μπορούσε να προκύψει είναι ότι η μέθοδος του παραρτήματος δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής, όσον αφορά την αξιολόγηση δρόμων πυκνοκατοικημένων περιοχών μικρού σχετικά ορίου ταχύτητας, καθώς δεν λαμβάνει υπ' όψιν αρκετούς παράγοντες, όπως η ύπαρξη των σταθμευμένων οχημάτων ή την

χρήση τριών επίπεδων για φωτισμό περιβαλλόντων, οδηγώντας σε πιο γενικές και ανακριβείς προσεγγίσεις. Μάλιστα αν με την πρώτη μέθοδο αγνοούσαμε τα σταθμευμένα οχήματα (βάρος ίσο με 0) ο δρόμος θα προέκυπτε κατηγορίας M4. Συμπερασματικά λοιπόν η μέθοδος του παραρτήματος μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη όταν εξετάζονται αυτοκινητόδρομοι μεγάλων ταχυτήτων και να οδηγήσει σε ίσως και καλύτερα αποτελέσματα από την κλασσική μέθοδο των βαρών, αλλά στην εξέταση μικρότερων δρόμων που περιλαμβάνουν περισσότερους παραμέτρους δεν μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά και ίσως θα έπρεπε να αποφεύγεται η χρήση της.



## Κεφάλαιο Πέμπτο: Ευρωπαϊκές χώρες και ευρωπαϊκός οδηγός EN13201

Όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες εφαρμόζουν το κοινό ευρωπαϊκό οδηγό EN 13201 όσον αφορά τις εγκαταστάσεις οδοφωτισμού τους, ο οποίος περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Παρόλα αυτά ορισμένες χώρες έχουν επιλέξει να εφαρμόσουν τον παραπάνω οδηγό, συμπεριλαμβάνοντας παράλληλα και επιπλέον στόχους που αυτές θεωρούν ότι είναι απαραίτητοι είτε μέσω νόμων είτε με την προσθήκη τους στον εθνικό οδηγό. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν λοιπόν ορισμένες από αυτές τις χώρες αλλά και οι προσθήκες που έχουν κάνει στον τεχνικό οδηγό τους ή τους νόμους που έχουν θεσπίσει.

### 5.1: Ισπανία και δείκτης αποδοτικότητας

Στην Ισπανία το βασιλικό ισπανικό διάταγμα καθορίζει την ελάχιστη τιμή της αποδοτικότητας μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού. Οι κανονισμοί της ενεργειακής αποδοτικότητας για τις εγκαταστάσεις του οδοφωτισμού που εγκρίθηκαν από το ισπανικό βασιλικό διάταγμα 1980/2008 αποσκοπούν στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της εξοικονόμησης ενέργειας περιορίζοντας έτσι, τις εκπομπές αερίων που επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επίσης, ο νέος κανονισμός εξασφαλίζει την ασφάλεια των οδηγών και των πεζών. Τέλος, εξασφαλίζει στην πόλη μια ευχάριστη ατμόσφαιρα την νύχτα περιορίζοντας την φωτορύπανση, καθώς μειώνεται ο παρεμβατικός φωτισμός [1].

Το ισπανικό διάταγμα παραπέμπει στον τεχνικό οδηγό EA-01 ( Ισπανία, 2013 ) για τον υπολογισμό των ορίων στην κατανάλωση ενέργειας των εγκαταστάσεων εξωτερικού φωτισμού, όπως αυτά αποτυπώνονται στον πίνακα 4.1. Ορίζεται, επίσης, η αποδοτικότητα της εγκατάστασης ( σε  $\text{lx m}^2 / \text{W}$  ή  $\text{lm/W}$  ) η οποία είναι όμοια με την τιμή του δείκτη πυκνότητας ισχύος (PDI) ( $\text{W}/(\text{lx} \cdot \text{m}^2)$ ) που χρησιμοποιείται στο πρότυπο EN1302-5:2015. Ο τεχνικός οδηγός επίσης καθορίζει ετικέτες για κάθε εγκατάσταση οδοφωτισμού. Οι εγκαταστάσεις με αποδοτικότητα πάνω από 10 % από τις τιμές αναφοράς στον πίνακα 4.1 θα έχουν 'Α' ετικέτα .

Πίνακας 5.1 Ελάχιστες τιμές και τιμές αναφοράς αποδοτικότητας εγκατάστασης για φωτισμό εξωτερικών χώρων στην Ισπανία

Ένταση Φωτισμού (lx)	Λειτουργικός Φωτισμός		Ένταση Φωτισμού (lx)	Διακοσμητικός Εξωτερικός Φωτισμός	
	Ελάχιστη αποδοτικότητα εγκατάστασης ( $\text{lx m}^2 / \text{W}$ )	Τιμές Αναφοράς αποδοτικότητας εγκατάστασης ( $\text{lx m}^2 / \text{W}$ )		Ελάχιστη αποδοτικότητα εγκατάστασης ( $\text{lx m}^2 / \text{W}$ )	Τιμές αναφοράς αποδοτικότητας εγκατάστασης ( $\text{lx m}^2 / \text{W}$ )
$\geq 30$	22	32	$\geq 20$	9	13
25	20	29	15	7,5	11
20	17,5	26	10	6	9
15	15	23	7,5	5	7
10	12	18	$\leq 5$	3,5	5
$\leq 7,5$	9,5	14			

### 5.1.1 Καταλανικός νόμος για την μείωση της λάμψης του ουρανού

Ο νόμος της Καταλονίας (LLei/2001) προτείνει περιορισμούς ανάλογα με τον συντελεστή RULO (ο λόγος της φωτεινής ροής που κατευθύνεται προς τα πάνω προς την συνολική φωτεινή ροή του φωτιστικού) σε 4 περιβαλλοντικές ζώνες. Οι εγκατεστημένοι περιορισμοί RULO κυμαίνονται μεταξύ 0% και 25%. Αυτή η προσέγγιση έχει εφαρμοστεί στην Καταλονία, όπου η περιοχή κατατάχθηκε με βάση τον παρακάτω πίνακα και τα όρια της φωτορύπανσης ρυθμίστηκαν με στόχο τον περιορισμό της λάμψης του ουρανού την νύχτα και την φωτεινή ρύπανση.

Πίνακας 5.2 Προτεινόμενα όρια του δείκτη RULO σε κάθε ζώνη

Ζώνες	Περιγραφή Ζώνης	R <sub>Ulo</sub>	Προτεινόμενη Ελάχιστη Απόσταση μεταξύ Ζωνών(km)		
			E1-E2	E2-E3	E3-E4
E1	Εθνικά Πάρκα, Περιοχές μεγάλης φυσικής Ομορφιάς	0	1	10	100
E2	Περιοχές χαμηλής φωτεινότητας : γενικά εξωτερικές αστικές και αγροτικές κατοικημένες περιοχές	0-5		1	10
E3	Περιοχές μέσης φωτεινότητας: γενικά αστικές κατοικησμένες περιοχές	0-15			1
E4	Περιοχές υψηλής φωτεινότητας: αστικές περιοχές με μικτή οικιστική και εμπορική χρήση με υψηλή δραστηριότητα τις νυχτερινές ώρες	0-25			

## 5.2 Ιταλία

### 5.2.1 Δυνατότητα dimming

Στην Ιταλία το Νοέμβριο του 2016 προστέθηκε στον εθνικό οδηγό εγκαταστάσεων οδοφωτισμού UNI 11248, ο οποίος προκύπτει από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13201-1:2015, ένα νέο κεφάλαιο που σχετίζεται με τον προσαρμοστικό φωτισμό. Η προσθήκη αυτή επιτρέπει στους σχεδιαστές εγκαταστάσεων οδοφωτισμού και στους δήμους να ελέγχουν τα φωτιστικά τους σε πραγματικό χρόνο (PLMS Public Lighting Management System) με την βοήθεια ειδικών αισθητήρων που έχουν εγκατασταθεί. Επίσης, η παραπάνω προσθήκη συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην αύξηση της ασφάλειας στον δρόμο. Ο νέος UNI 11248 θέτει έναν αριθμό παραμέτρων (ταχύτητα dimming, μέγιστα επίπεδα dimming, αριθμός δειγμάτων, υπολογισμός παραμέτρων, στρατηγικές ελέγχου κ.α.) με στόχο την μεγιστοποίηση της ασφάλειας του οδηγού με βάση τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.

Ο UNI 11248 ορίζει δυο διαφορετικές μεθόδους λειτουργίας:

- TAI (Traffic Adaptive Installation), όπου λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο ο όγκος κυκλοφορίας. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον έλεγχο της φωτεινής ροής με βάση την μέτρηση του όγκου κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Όταν η κίνηση στον δρόμο είναι λιγότερη από το 50% της ονομαστικής λειτουργίας ο φωτισμός μειώνεται κατά μια κλάση φωτισμού, ενώ αν η κίνηση είναι λιγότερη από 25% της ονομαστικής λειτουργίας τότε η μείωση του φωτισμού γίνεται κατά δυο κλάσεις οδοφωτισμού.

- FAI (Full Adaptive Installation), όπου προσμετρούνται ακόμα και οι μετεωρολογικές συνθήκες και τα επίπεδα λαμπρότητας του οδοστρώματος. Όταν εφαρμόζεται το FAI, ο UNI 11248 επιτρέπει την μείωση (του επιπέδου φωτισμού) έως και 3 κλάσεων οδοφωτισμού εάν η κίνηση είναι λιγότερη από το 12,5% της ονομαστικής, που αντιστοιχεί σε δυνατότητες dimming έως 75%. Η δυνατότητα αυτής της μεθόδου για μεγαλύτερες τιμές dimming έχει ως αποτέλεσμα και τον έλεγχο των καιρικών συνθηκών οι οποίες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στον οδοφωτισμό. Για παράδειγμα, σε βροχερό καιρό μειώνεται η ομοιομορφία της λαμπρότητας οδοστρώματος γι' αυτό και δεν επιτρέπεται το dimming. Επίσης, η ομίχλη μειώνει τις αντιθέσεις με αποτέλεσμα να μειώνεται η ασφάλεια στους δρόμους, ενώ αντίθετα το χιόνι μπορεί να προκαλέσει θάμβωση στους οδηγούς. Τέλος, η μέθοδος FAI επιτρέπει το συνεχόμενο dimming όταν η κίνηση μειώνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει στο κατώτατο όριο που έχει τεθεί. Η δυνατότητα συνεχόμενου dimming της μεθόδου FAI είναι σημαντική καθώς στην μέθοδο TAI το dimming γίνεται αυστηρά κατά βήματα [2].

### 5.2.2 Φωτορύπανση

Η Ιταλία και πιο συγκεκριμένα η πόλη της Λομβαρδίας ήταν από τις πρώτες χώρες που θέσπισαν νόμο το 2000 για τον περιορισμό της φωτορύπανσης. Πιο συγκεκριμένα ο επίσημος οδηγός οδοφωτισμού περιλαμβάνει αναφορά στον προαναφερθέν νόμο κάτι που πρέπει να λάβει υπ'όψιν ο εκάστοτε μελετητής. Μάλιστα προτείνεται η εγκατάσταση full cut off φωτιστικών σε όλες τις νέες εγκαταστάσεις οδοφωτισμού [3].

## 5.3 Φινλανδία

### 5.3.1 Dimming

Στη Φινλανδία ο εθνικός οδηγός για τον οδοφωτισμό που δημοσιεύτηκε συμπεριλαμβάνει την δυνατότητα dimming, δίνοντας σαφείς οδηγίες για το πως πρέπει να εφαρμόζεται. Παράλληλα τονίζεται ότι οι εγκαταστάσεις νέων φωτιστικών πρέπει να εφοδιάζονται με δυνατότητες dimming. Όταν εφαρμόζεται το dimming θα πρέπει να μην προκαλούνται ανομοιομορφίες στη λαμπρότητα του οδοστρώματος, ενώ η μέγιστη διαφορά του επίπεδου φωτισμού δεν θα πρέπει να είναι πάνω από δυο κλάσεις οδοφωτισμού.

Τα φωτιστικά με λαμπτήρες εκκένωσης έχουν μόλις ένα επίπεδο dimming κάτι που οδηγεί σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά 25%-40%, ενώ η λαμπρότητα μειώνεται κατά 35%-50%. Αντίθετα για τα LED προτείνεται δυνατότητα χρησιμοποίησης 2 επιπέδων dimming. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 25% - 40% σε πρώτο επίπεδο, ενώ στο δεύτερο επίπεδο η ενέργεια μειώνεται κατά 50%-60%. Το dimming πρέπει να πραγματοποιείται τις ώρες όπου ο όγκος κυκλοφορίας είναι περιορισμένος.

Πίνακας 5.3 Περιοδική μείωση του φωτισμού βάσει των κλάσεων φωτισμού με τη χρήση δυο βημάτων μεθόδου ελέγχου

Κλάση Φωτισμού	Προσαρμοστικός Φωτισμός	Παραμένουσα μέση Λαμπρότητα %
M1	M1-(M2)-M3-(M2)-M1	100-(75)-50-(75)-100
M2	M2-(M3)-M4-(M3)-M2	100-(70)-50-(70)-100
M3	M3-(M4)-M5-(M4)-M3	100-(75)-50-(75)-100
M4	M4-(M5)-M6-(M5)-M4	100-(70)-40-(70)-100
M5	M5-(M6)-P5-(M6)-M5	100-(60)-40-(60)-100
M6	M6-P6- M6	100-50-100

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα σχόλια που διατυπώνονται, όσον αφορά την σχέση μεταξύ dimming και χιονιού. Σύμφωνα με τον οδηγό λοιπόν, δυνατότητες dimming μπορούν να εφαρμοστούν για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, όταν ένας δρόμος καλύπτεται από χιόνι, ενώ η μείωση της φωτεινής ροής μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο μέρος του δρόμου. Όταν το οδόστρωμα καλύπτεται από χιόνι, η λαμπρότητα της επιφάνειας του αυξάνεται κατά 200-500% σε σύγκριση με μια στεγνή επιφάνεια του οδοστρώματος. Ακόμη και αν το οδόστρωμα δεν καλύπτεται από χιόνι, αλλά το περιβάλλον γύρω από το δρόμο καλύπτεται από αυτό, η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος αυξάνεται κατά 30-100%. Η συνολική και η κατά μήκος ομοιομορφία συνήθως ελαφρώς μειώνονται. Επειδή οι απαιτήσεις που ορίζονται για μέση λαμπρότητα επιτυγχάνονται ανεξάρτητα από τη μείωση της φωτεινής έντασης των φωτιστικών και οι αντιθέσεις λαμπρότητας παραμένουν σε ένα αποδεκτό επίπεδο όσον αφορά την ασφάλεια της κυκλοφορίας, μπορεί να θεωρηθεί ότι το dimming δεν αυξάνει τον αριθμό των ατυχημάτων σε σημαντικό βαθμό.

### 5.3.2 Σβήσιμο φωτιστικών το βράδυ

Στον τεχνικό οδηγό της Φινλανδίας προτείνεται η δυνατότητα για κλείσιμο των φώτων δρόμου μερικές ώρες κατά την διάρκεια της νύχτας. Παρόλα αυτά τονίζεται ότι μια τέτοια ενέργεια θα επέφερε σίγουρη αύξηση των ατυχημάτων, ενώ σε αυτή την περίπτωση οι συνθήκες ασφάλειας είναι ίδιες με αυτές ενός αφώτιστου δρόμου όπου τα ατυχήματα είναι αρκετά. Επιπλέον σχολιάζονται και επιπτώσεις όπως βανδαλισμοί, ανασφάλεια των κατοίκων κ.α. που θα επέφερε μια τέτοια ενέργεια.

Ο τεχνικός οδηγός καθορίζει δυο περιόδους όπου τα φώτα του δρόμου μπορούν να μην λειτουργούν: η πρώτη περίοδος είναι από τη μία το βράδυ μέχρι τις τέσσερις το πρωί και η δεύτερη από τις δώδεκα τα μεσάνυχτα μέχρι τις πέντε το πρωί. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να παρακολουθούνται οι συγκεκριμένοι δρόμοι, ενώ θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν και οι παρατηρήσεις των κατοίκων έτσι ώστε αν κριθεί απαραίτητο τα παραπάνω ωράρια να μεταβληθούν.

Τέλος, τονίζεται ότι τα φώτα θα σβήνονται σε δρόμους κυρίως αραιοκατοικημένων περιοχών αφού εξεταστούν ορισμένοι παράμετροι που αναλύονται με λεπτομέρεια και αφορούν κυρίως τον όγκο της κίνησης και την κατηγορία του εκάστοτε δρόμου. Επιπλέον, θα πρέπει να ελέγχονται τα σημεία που μπορεί να διασταυρωθεί ένας φωτιζόμενος δρόμος με ένα αφώτιστο, καθώς αυτή η αλλαγή δεν θα πρέπει να είναι απότομη δίνοντας την ευκαιρία στο μάτι να προσαρμοστεί στις αντίθετες συνθήκες [4].

### 5.4 Γερμανία

Στην Γερμανία δίνεται η δυνατότητα στους δήμους να αποκτήσουν πράσινα δάνεια για ανακαίνιση των εγκαταστάσεων οδοφωτισμού τους από την τράπεζα. Για να έχουν πρόσβαση σε αυτά τα δάνεια ορίστηκαν ελάχιστα κριτήρια αποδοτικότητας της εγκατάστασης του οδοφωτισμού τα οποία βασίστηκαν στη μέγιστη ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο ανά τύπο δρόμου και επίπεδα φωτισμού.

Πίνακας 5.4 Μέγιστη ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο ανά τύπο δρόμου και επίπεδα φωτισμού (kWh/(y·km)) που χρησιμοποιούνται για την παροχή δανείων

Τύπος Δρόμου	Επίπεδο Φωτισμού					
	1,5 cd/m <sup>2</sup> ή 20lx	1 cd/m <sup>2</sup> ή 15lx	0,75 cd/m <sup>2</sup> ή 10lx	0,5 cd/m <sup>2</sup> ή 7,5lx	0,3 cd/m <sup>2</sup> ή 5lx	3lx
Κύριοι Δρόμοι Κυκλοφορίας	21500	17500	15500	12500		
Δευτερεύοντες δρόμοι κυκλοφορίας με λειτουργικά φωτιστικά		16500	14000	11500	8000	
Δευτερεύοντες δρόμοι κυκλοφορίας με διακοσμητικά φωτιστικά					13500	
Δρόμοι σε αστικές περιοχές με λειτουργικά φωτιστικά			15000	1150	8500	7000
Δρόμοι σε αστικές περιοχές με διακοσμητικά φωτιστικά					13500	11000

## 5.5 Βέλγιο

Ο τεχνικός οδηγός του Βελγίου Synegrid C4/11-1 περιγράφει τις τεχνικές προδιαγραφές για την κατασκευή και την διατήρηση φωτιστικών δημόσιου φωτισμού. Παρέχει στις βελγικές επιχειρήσεις συγκεκριμένες προδιαγραφές για τις ελάχιστες απαιτήσεις απόδοσης φωτιστικών οδικού φωτισμού.

Ο Synegrid C4/9 περιγράφει τις προδιαγραφές των αντίστοιχων λαμπτήρων. Παρέχει στις βελγικές επιχειρήσεις συγκεκριμένες προδιαγραφές για τις ελάχιστες απαιτήσεις απόδοσης λαμπτήρων οδικού φωτισμού.

Κάθε δήμος είναι υπεύθυνος για τον φωτισμό των δρόμων του, ενώ τους παρέχονται και οικονομικά κίνητρα στο ετήσιο κόστος συντήρησης προκειμένου να επιλέξουν δοκιμασμένα και συμβατά φωτιστικά. Η επιλογή της σωστής φωτομετρίας και του σχεδίου οδοφωτισμού σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 13201-2: 2016, γίνεται από τον διαχειριστή του συστήματος διανομής (DSO), ο οποίος είναι επίσης υπεύθυνος για τη συντήρηση του οδικού φωτισμού εκ μέρους των δήμων του Βελγίου. Παρέχεται ένας πλήρης κατάλογος δοκιμασμένων και συμβατών φωτιστικών LED ο οποίος περιέχει 79 φωτιστικά δρόμου από 9 διαφορετικούς κατασκευαστές.

## **Βιβλιογραφία**

1. *Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Street Lighting and Traffic Signals June 2017*
2. *Outdoor Adaptive Lighting in the new UNI 11248 Italian Standard and Result of Experience, Paolo Di Lecce Andrea Mancinelli Reverberi Enetec srl Castelnovo nè Monti RE – Italy*
3. [www.lightpollution.it/cinzano/en/page95en.html](http://www.lightpollution.it/cinzano/en/page95en.html)
4. *Extract Finnish National Code of Practice for Lighting of Road and Railway Areas*

## Κεφάλαιο Έκτο : Θεωρητική προσέγγιση εναλλακτικών σεναρίων

### 6.1 Εισαγωγή

Η μελέτη και σχεδίαση ενός συστήματος οδοφωτισμού είναι μια πολύ σημαντική και υπεύθυνη εργασία, καθώς πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν αρκετοί παράγοντες, για ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Επίσης, μία μελέτη οδοφωτισμού έχει μεγάλο προσδόκιμο ζωής και τα αποτελέσματά της παραμένουν ορατά για πολλά χρόνια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η φωτογραφία (Εικόνα 6.1) της πόλης του Βερολίνου, από δορυφόρο το 2013.



*Εικόνα 6.1 Δορυφορική εικόνα Βερολίνου 2013.*

Παρόλο που η πτώση του τείχους συνέβη το 1989, μια νυχτερινή λήψη από δορυφόρο κάνει ορατή την ανατολική και δυτική πλευρά του Βερολίνου. Ανατολικά το χρώμα των λαμπτήρων των φωτιστικών είναι κίτρινο καθώς χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες ατμών νατρίου. Αντίθετα, στο δυτικό τμήμα της πόλης χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες υδραργύρου, αερίου και συμπαγείς φθορισμού οι οποίοι παράγουν λευκό χρώμα [1].

Με το παραπάνω παράδειγμα γίνεται αντιληπτό πόσο καθοριστική είναι μια μελέτη φωτισμού, καθώς είναι μια ιδιαίτερα δαπανηρή επένδυση η οποία δεν αντικαθίσταται εύκολα.

Κατά την διάρκεια της εκτέλεσης μια μελέτης οδοφωτισμού είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 13201. Στο παρόν όμως κεφάλαιο θα αναλυθούν, θεωρητικά σε πρώτο στάδιο, ορισμένες εναλλακτικές υλοποιήσεις που μπορεί να υιοθετήσει ο εκάστοτε μελετητής, σεβόμενος πάντα το πρότυπο, προκειμένου να πετύχει και δευτερεύοντες στόχους για να πετύχει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.



## 6.2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για οδοφωτισμό

Τα δημόσια συστήματα οδοφωτισμού καταναλώνουν ένα μεγάλο μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, περίπου το 3,19% της παγκόσμιας παραγωγής. Η ποσότητα αυτή είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή όλων των πυρηνικών ή υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων και μπορεί να συγκριθεί μόνο με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο [2].

Οι Ευρωπαϊκές χώρες περιέχουν συνολικά 5,5 εκατομμύρια χιλιόμετρα οδικού δικτύου εκ των οποίων τα 2,35 από αυτά περιλαμβάνουν εγκατάσταση οδοφωτισμού. Το 2005 η κατανάλωση ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση που υπολογίστηκε, μόνο για τις ανάγκες οδοφωτισμού, ήταν ίση με 35 TWh αντιπροσωπεύοντας το 1,3% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της Ευρώπης. Με την τωρινή τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, οι ανάγκες οδοφωτισμού έχουν ετήσιο κόστος περίπου 3,850 εκατομμύρια ευρώ. Νεότερη εκτίμηση δεν είναι διαθέσιμη, αλλά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τιμή αυτή δεν έχει αλλάξει αρκετά [3].

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από την παραγωγή της παραπάνω ενέργειας, αντιπροσωπεύουν το 70% από τις παγκόσμιες εκπομπές των αυτοκινήτων και μάλιστα είναι τρεις φορές περισσότερες από τις συνολικές εκπομπές των αεροπλάνων. Αυτός είναι και ο λόγος, που η μείωση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε πόλη ξεχωριστά, έχει αντίκτυπο σε παγκόσμιο επίπεδο. Η πλειοψηφία από τα υπάρχοντα συστήματα οδοφωτισμού μέχρι σήμερα χρησιμοποιεί παρωχημένη τεχνολογία, που χρονολογείται από την δεκαετία του 60, καθώς στηρίζονται σε λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης. Τα τελευταία χρόνια όμως, πραγματοποιείται μια προσπάθεια αντικατάστασης των λαμπτήρων: ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης (HPM), ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (HPS) και άλλων παλιάς τεχνολογίας με νέας τεχνολογίας πηγών LED. Η αντικατάσταση των προαναφερθέντων είναι σημαντική, καθώς έχουν αρκετά αρνητικά στοιχεία με βασικότερο την χαμηλή τους απόδοση (lm/W) αλλά και την περιορισμένη δυνατότητα dimming. Αντικαθιστώντας, τις λάμπες νατρίου με ενεργειακά αποδοτικότερες πηγές LED το κόστος λειτουργίας μπορεί να μειωθεί στο μισό παρέχοντας παράλληλα φωτεινότερο περιβάλλον. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερα οι πηγές LED θεωρούνται ιδανικές για dimming, ενώ αντίθετα οι υπόλοιποι λαμπτήρες σε περίπτωση dimming έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση χρωμάτων αλλά και στην διάρκεια ζωής τους.

Η αλήθεια είναι ότι, τα προηγούμενα χρόνια η απλή αντικατάσταση των παλιών λαμπτήρων με νέους τύπου LED ήταν η μοναδική ενέργεια που πραγματοποιούνταν με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Σήμερα, όμως, αυτή η αντικατάσταση δεν είναι πλέον αρκετή, καθώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας μας δίνονται πλέον νέες δυνατότητες για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω προσαρμοστικού φωτισμού.

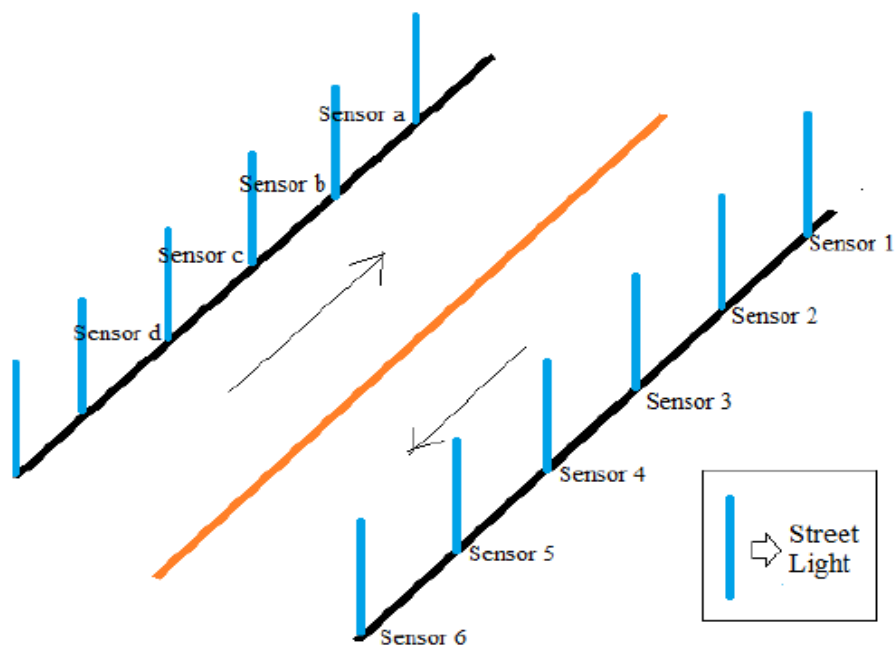
Με την εναλλαγή σε μοντέρνα και πιο αποδοτικά συστήματα, όπως αυτά που παρέχουν δυνατότητες dimming, θα μειωθούν αισθητά οι δαπάνες ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και οι εκπομπές CO<sub>2</sub>. Τέλος, θα πρέπει να ορίσουμε τον οδοφωτισμό ως ο τεχνικός φωτισμός των δρόμων όταν το φυσικό φως του δρόμου πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Ακολουθεί η παρουσίαση μερικών συστημάτων νέας τεχνολογίας που εξυπηρετούν την περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης.

### 6.2.1.1 Ενσύρματη υλοποίηση προσαρμοστικού φωτισμού

Μία υλοποίηση ενός μοντέρνου συστήματος οδοφωτισμού που στοχεύει στην μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και των εκπομπών ρύπων δεν χρειάζεται να είναι ιδιαίτερα σύνθετη και δαπανηρή [4].

Ένα τέτοιο σύστημα θα προσαρμόζει εύκολα τα επίπεδα φωτισμού του με βάση την πυκνότητα της κίνησης. Τα επίπεδα φωτισμού θα προσαρμόζονται δυναμικά μέσω αισθητήρων και μικροελεγκτών σύμφωνα με την πυκνότητα κίνησης της λωρίδας.

Η υλοποίηση ενός τέτοιου εγχειρήματος περιλαμβάνει την τοποθέτηση ειδικών IR και PIR αισθητήρων που βρίσκονται τοποθετημένοι στα άκρα του οδοστρώματος και κατά μήκος του δρόμου. (Εικόνα 6.2)

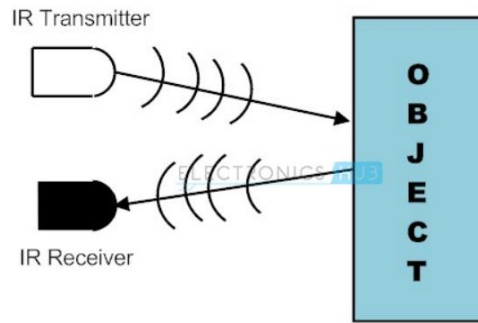


Εικόνα 6.2 Τοποθέτηση αισθητήρων IR και PIR.

Οι αισθητήρες υπέρυθρων είναι μια ηλεκτρονική συσκευή, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ενός αντικείμενου μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Τα υπέρυθρα κύματα δεν είναι ορατά.

Οι IR ενεργητικοί αισθητήρες υπέρυθρων αποτελούνται από δύο στοιχεία: την πηγή υπέρυθρων και τον ανιχνευτή υπέρυθρων. Η πηγή υπέρυθρων περιέχει ένα LED ή μια δίοδο υπέρυθρων, ενώ ο ανιχνευτής περιέχει φωτοδιόδους ή φωτοτρανζιστόρ. Η ενέργεια που εκπέμπεται από την πηγή υπέρυθρων αντανακλάται σε ένα αντικείμενο και καταλήγει στον ανιχνευτή υπέρυθρων [5]. (Εικόνα 6.3)

Οι PIR παθητικοί αισθητήρες εντοπίζουν την υπέρυθρη ενέργεια που ακτινοβολείται από το αντικείμενο που ανιχνεύτηκε. Το πιο συνηθισμένο αντικείμενο του οποίου ανιχνεύει την ακτινοβολία που εκπέμπεται ένα PIR είναι το ανθρώπινο σώμα, καθώς κάθε αντικείμενο με θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει υπέρυθρη ενέργεια με μορφή ακτινοβολίας. Αυτή η ενέργεια είναι αόρατη στο ανθρώπινο μάτι, αλλά όχι στο υλικό που βρίσκεται στον πυρήνα του αισθητήρα PIR.

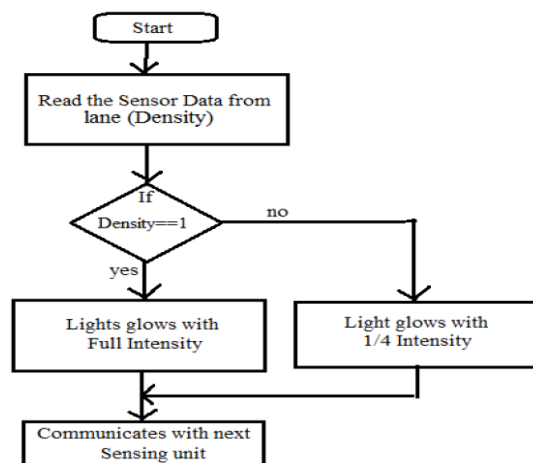


Εικόνα 6.3 Αισθητήρας IR

Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε προκαθορισμένες αποστάσεις και μεταφέρουν μεταξύ τους την πληροφορία όταν εντοπιστεί αυτοκίνητο. Στην συγκεκριμένη διάταξη προτιμήθηκε η ενσύρματη σύνδεση μεταξύ των αισθητήρων προκειμένου να μειωθεί το κόστος. Το παραπάνω σύστημα έχει την ικανότητα να ελέγχει την κίνηση σε πραγματικό χρόνο, ενώ η χρησιμοποίηση τόσο IR όσο και PIR αισθητήρων εξασφαλίζει ακριβέστερες μετρήσεις. Οι αισθητήρες είναι επίσης συνδεδεμένοι σε ένα μικροελεγκτή, όπου επεξεργάζεται τα δεδομένα και προσαρμόζει τα κατάλληλα επίπεδα φωτισμού. Ο μικροελεγκτής καταναλώνει ελάχιστη ενέργεια και έτσι η τροφοδότηση του γίνεται από μπαταρίες.

Όταν εντοπιστεί από τους αισθητήρες ότι κάποιος διέρχεται από τον δρόμο, θα υπάρξει επικοινωνία με τα γειτονικούς αισθητήρες προκειμένου να ενεργοποιηθούν και αυτοί. Έτσι φωτίζεται όλη η περιοχή περιμετρικά του αντικειμένου που ανιχνεύτηκε, μέσω της ενσύρματης επικοινωνίας των αισθητήρων. Όταν δεν ανιχνεύεται κινητικότητα τα φωτιστικά, δουλεύουν με το 1/4 της ονομαστικής τους ισχύς.

Από τους αισθητήρες τα δεδομένα μεταφέρονται στον μικροελεγκτή, όπου πραγματοποιείται δυναμικός έλεγχος του οδοφωτισμού, σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα ροής (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4 Διάγραμμα ροής εγκατάστασης προσαρμοστικού οδοφωτισμού

Το παραπάνω διάγραμμα ροής περιγράφει τον τρόπο ελέγχου της έντασης φωτισμού των φωτιστικών. Αν τα δεδομένα που φτάνουν στον επεξεργαστή

υποδηλώνουν κίνηση στον δρόμο τότε η φωτεινή ένταση είναι μέγιστη στο σημείο αυτό αλλά και στα γειτονικά του. Αντίθετα, αν δεν υπάρχει κίνηση η εντολή που δίνεται σε όλα τα φωτιστικά είναι να περιορίσουν την λειτουργία τους στο  $\frac{1}{4}$  της ονομαστικής. Έτσι το σύστημα προσαρμόζεται δυναμικά στην κίνηση που υπάρχει στον δρόμο κάθε στιγμή.

Πρόκειται για μια απλή, εύχρηστη και αρκετά οικονομική υλοποίηση προσαρμοστικού οδοφωτισμού που όμως έχει σημαντικά αποτελέσματα. Είναι ένα έξυπνο σύστημα που συμβάλλει αρκετά στην μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται για τις ανάγκες του οδοφωτισμού. Επίσης, παρόλο που αυτή η υλοποίηση απαιτεί την εγκατάσταση εξοπλισμού αυτός δεν είναι ιδιαίτερα δαπανηρός, ενώ και το λειτουργικό σύστημα είναι απλό. Επιπλέον, το σύστημα είναι αυτόνομο καθώς μπορεί να λειτουργήσει χωρίς την ανθρώπινη επίβλεψη και να λάβει τις κατάλληλες αποφάσεις. Παρόλα αυτά η χρήση του ίσως θα πρέπει να περιοριστεί σε μικρότερους δρόμους με χαμηλά όρια ταχυτήτων και μικρό όγκο κυκλοφορίας, καθώς εκεί είναι σημαντικό να μην γίνεται κατασπατάληση ηλεκτρικής ενέργειας όταν οι δρόμοι είναι άδειοι. Αντίθετα, η εγκατάστασή του δεν θα ήταν ιδανική σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους με αυξημένα όρια ταχύτητας καθώς η απότομη αλλαγή φωτεινής έντασης μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα θάμβωσης στον οδηγό. Σε μια τέτοια περίπτωση θα έπρεπε να εξεταστεί η σταδιακή αύξηση της φωτεινότητας κατά μήκος του δρόμου, καθώς ο οδηγός διασχίζει τον δρόμο με υψηλή ταχύτητα.

#### **6.2.1.2 Ασύρματη υλοποίηση προσαρμοστικού φωτισμού**

Παρόλα αυτά, πρόκειται για μια υλοποίηση κυρίως ενσύρματη με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται η εγκατάσταση με επιπλέον κόστος εγκατάστασης, αγοράς και συντήρησης καλωδίου. Αυτός είναι και ο λόγος που προτιμώνται εγκαταστάσεις όπου τα φωτιστικά συνήθως επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους. Η ασύρματη επικοινωνία έχει τα θετικά του χαμηλότερου κόστους, της ευκολίας εγκατάστασης και επέκτασης του δικτύου [6].

Σε αυτή την υλοποίηση πλέον τα φωτιστικά οργανώνονται σε κυψέλες (με την μορφή που ήδη χρησιμοποιούνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα) και οι αισθητήρες τους επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους. Για μια γεωγραφική περιοχή μπορεί να χρειαστούν να δημιουργηθούν αρκετές κυψέλες για την πλήρη κάλυψη της. Ένας ελεγκτής επικοινωνίας αναλαμβάνει να συντονίζει την επικοινωνία τόσο των αισθητήρων κυψέλης μεταξύ τους, όσο και την επικοινωνία με έναν server που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της εγκατάστασης. Η επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή επικοινωνίας και του server μπορεί να γίνει είτε μέσω Ethernet είτε μέσω διαδικτύου. Έτσι κάθε κυψέλη παρέχει πρόσβαση στον έλεγχο καθορισμένου αριθμού αισθητήρων και συνεπώς φωτιστικών. Η απομακρυσμένη πρόσβαση επιτυγχάνεται μέσω διαδικτύου από φυλλομετρητή ιστού. Άρα, συνολικά μια κυψέλη αποτελείται από μια καμπίνα, μια κεραία GPS, έναν ελεγκτή επικοινωνίας και αρκετούς αισθητήρες [7].

Η παραπάνω εγκατάσταση επιτρέπει τον έλεγχο των φωτιστικών κάθε περιοχής, όπου στην αυτόματη λειτουργία τους μέσω φωτοκύτταρων προσαρμόζουν την φωτεινή ροή τους, ενώ όταν χειρίζονται χειροκίνητα μπορεί να ορισθεί ένα χρονοδιάγραμμα όπου ανάβουν ή σβήνουν. Επίσης, λαμβάνονται μετρήσεις για την κατανάλωση τους αλλά και την πιθανότητα σφάλματος τους ενώ τα δεδομένα αυτά μεταφέρονται από κάθε φωτιστικό στον ελεγκτή επικοινωνίας και αυτός με την σειρά του τα μεταβιβάζει στον server από όπου τελικά είναι προσβάσιμα από τον άνθρωπο.

### 6.2.1.3 Αποτελέσματα προσαρμοστικού φωτισμού

Το Cambridge ήταν μια από τις πρώτες πόλεις της Αμερικής όπου χρησιμοποίησε φωτιστικά τεχνολογίας LED παράλληλα με προσαρμοστικό φωτισμό. Πιο συγκεκριμένα, το 2014 αντικαταστάθηκαν 7000 λάμπες υψηλής πίεσης νατρίου από φωτεινές πηγές LED, ενώ παράλληλα εγκαταστάθηκαν ασύρματοι κόμβοι σε μια προσπάθεια της πόλης για καλύτερη εποπτεία του συστήματος της και μεγαλύτερης εξοικονόμησης ενέργειας. Έτσι το σύστημα που δημιουργήθηκε διευκόλυνε την προσαρμογή του επίπεδου φωτισμού σε πραγματικό χρόνο και τον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας της εγκατάστασης. Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η μείωση της κατανάλωσης κατά 80% και απόσβεσης της επένδυσης σε λιγότερο από 5 χρόνια [8].

### 6.2.2 Έξυπνες πόλεις και προσαρμοστικός φωτισμός

Μία ακόμα υλοποίηση, περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την προηγούμενη, προϋποθέτει την εφαρμογή τους σε μια «έξυπνη» πόλη. Άλλωστε με τον ρυθμό που αναπτύσσεται η τεχνολογία οι έξυπνες πόλεις δεν απέχουν πολύ από την υλοποίηση τους. Μπορεί κάθε πόλη να έχει διαφορετικούς στόχους όμως όλες έχουν ως βασικό στόχο την χρήση της τεχνολογίας προκειμένου να γίνουν πιο αποδοτικές, λιγότερο ρυπογόνες εξασφαλίζοντας παράλληλα μια ποιοτική ζωή για τους πολίτες τους. Για να μετατραπεί μια πόλη σε «έξυπνη» θα πρέπει πολλές από τις λειτουργίες της (πχ φώτα δρόμου) να είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο [9],[10].

Αντικαθιστώντας τις λάμπες οδοφωτισμού με νέες λάμπες οι οποίες συνδέονται στο διαδίκτυο, μπορούν να χαρακτηριστούν ως IoT (Internet of Things) συσκευές δίνοντας την δυνατότητα dimming σε ώρες περιορισμένης κίνησης, αλλά και άμεσο εντοπισμό σφαλμάτων. Αυτές οι αποφάσεις μπορούν να παρθούν σε πραγματικό χρόνο είτε από ένα κέντρο ελέγχου είτε από την ίδια την συσκευή. Τα παραπάνω μπορούν να μειώσουν έως και 20% την κατανάλωση σύμφωνα με έρευνα της Machina.

Το πρόβλημα της επικοινωνίας μεταξύ των φωτιστικών δρόμου πρέπει να λυθεί όσο το δυνατόν περισσότερο οικονομικά προκειμένου μία τέτοια επένδυση να είναι ακόμα πιο αποδοτική. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι μπορούν να καλύψουν μια τέτοια ανάγκη καθώς ήδη έχουν ανεπτυγμένο ένα μεγάλο δίκτυο επικοινωνιών που καλύπτει πλήρως τις πόλεις. Με αυτόν τον τρόπο δεν θα χρειαστεί η εγκατάσταση επιπλέον εξοπλισμού, (αποφεύγονται έτσι άσκοπες δαπάνες), ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται ότι οι υπηρεσίες που προφέρονται είναι ποιοτικές. Επιπλέον, παρέχεται ένα ασφαλές εύρος ζώνης εξασφαλίζοντας την απουσία παρεμβολών, άρα και ομαλού ελέγχου των φωτιστικών. Τέλος, για την ασύρματη επικοινωνία των φωτιστικών τα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν είναι χαμηλού κόστους αλλά και κατανάλωσης και μπορούν να τοποθετηθούν εσωτερικά στο φωτιστικό.

Παρόμοιες συσκευές IoT χρησιμοποιούνται ήδη για τον φωτισμό μνημείων όπως ο πύργος του Αϊφελ ή το Empire State Building με στόχο κυρίως την αλλαγή χρωμάτων των φωτιστικών.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γερμανική πόλη Μονχαιμ (Monheim am Rhein ) όπου έχει εφαρμόσει με επιτυχία τα παραπάνω. Μάλιστα σε συνεργασία με τον τοπικό πάροχο τηλεπικοινωνιών έχουν καταφέρει τον απομακρυσμένο έλεγχο των φωτιστικών, ενώ παράλληλα εφαρμόζονται και δυνατότητες dimming σε όλα τα

φωτιστικά του κέντρου της πόλης. Επιπλέον λαμβάνουν αυτόματα μηνύματα αποτυχίας λειτουργίας ενός φωτιστικού σε πραγματικό χρόνο, βοηθώντας έτσι στην καλύτερη συντήρησή τους. Μάλιστα η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε ακόμα και για τον χριστουγεννιάτικο φωτισμό της πόλης. Σε αυτό το πιλοτικό πρόγραμμα εγκαταστάθηκαν νέες λάμπες τεχνολογίας LED στην ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση μειώνοντας την κατανάλωση ανά φωτιστικό από 70Watt σε 22 Watt, καταναλώνοντας σχεδόν 70% λιγότερη ενέργεια. Επίσης, αφού οι λάμπες έχουν την δυνατότητα dimming η πόλη εξοικονομεί ακόμα περισσότερη ενέργεια τις βραδινές ώρες όπου η κίνηση είναι περιορισμένη [11].

Ξεφεύγοντας τώρα από τον προσαρμοστικό φωτισμό και εστιάζοντας περισσότερο στην εγκατάσταση του φωτιστικού με σκοπό την εκμετάλλευση του στα πλαίσια της έξυπνης πόλης μπορούν να τοποθετηθούν και διάφοροι αισθητήρες σε κάθε στύλο φωτιστικού. Πιο συγκεκριμένα αισθητήρες παρατήρησης της ποιότητας του αέρα, κίνησης, θέσεων parking μπορούν να εγκατασταθούν σε κάθε στύλο φωτιστικού δρόμου και μέσω του τηλεπικοινωνιακού παρόχου οι πληροφορίες αυτές να μεταφερθούν σε ένα κέντρο ελέγχου. Έτσι οι αρχές της πόλης μπορούν να παρακολουθούν τι συμβαίνει στην πόλη μέσω της χρήσης ενός ευέλικτου και φιλικού προς τον χρήστη σύστημα. Επιπλέον, οι μηχανικοί μπορούν να ελέγχουν τη απόδοση, να αναγνωρίσουν σφάλματα και να ελέγχουν τα φωτιστικά από απόσταση.

### 6.2.3 Προσαρμοστικός φωτισμός μέσω πρόβλεψης

Οι παραπάνω υλοποιήσεις αφορούσαν κυρίως προσαρμογή του φωτισμού ανάλογα με την συνθήκες του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο. Παρόλα αυτά, μερικές φορές αυτό μπορεί να μην είναι αναγκαίο, αλλά αντίθετα η μελέτη του περιβάλλοντος των φωτιστικών για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να δώσει αρκετά καλά αποτελέσματα [12].

Πιο συγκεκριμένα μελετώντας την κίνηση ενός δρόμου για χρονικό διάστημα τουλάχιστον ενός έτους με την βοήθεια ειδικών καμερών ή οπτικών σενσόρων ειδικών στην ανάλυση αστικών περιβαλλόντων μπορεί να γίνει μια αρκετά καλή προσέγγιση του αριθμού των οχημάτων που χρησιμοποιήσαν τον εξεταζόμενο δρόμο. Τα παραπάνω δεδομένα πρέπει να είναι ιδιαίτερα αναλυτικά προκειμένου να οδηγήσουν σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Στην συνέχεια, με την βοήθεια υπολογιστικών μοντέλων πρόβλεψης, μπορεί να προκύψει προσεγγιστικά ο αριθμός των οχημάτων που αναμένεται να χρησιμοποιήσουν τον δρόμο κάθε στιγμή της μέρας. Μερικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της κίνησης του δρόμου είναι: Στατιστικό μοντέλο, ARMAX model, NAÏVE model, Bem Neural Model.

Τα δεδομένα που προκύπτουν από την μαθηματική επεξεργασία επιτρέπουν την προσαρμογή του επίπεδου φωτισμού για κάθε σημείο της μέρας με βάση την κίνηση. Για παράδειγμα όταν δεν υπάρχει αρκετή κίνηση τότε η κλάση φωτισμού του οδοστρώματος θα πρέπει να πέσει τουλάχιστον μια κατηγορία, ενώ και όταν δεν έχει νυχτώσει πλήρως θα πρέπει να μειωθεί η φωτεινή ένταση των φωτιστικών. Τα παραπάνω μπορούν να καθοριστούν μέσω χρονοδιαγράμματος μια φορά από τον χειριστή, εάν δεν υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής του φωτισμού ανάλογα με τις συνθήκες.

Μάλιστα μια ανάλογη μελέτη πραγματοποιήθηκε στην Ιταλία, όπου μέσω στατιστικών μεθόδων μείωσαν τα επίπεδα φωτισμού όταν υπήρχε χαμηλή κίνηση

στους δρόμους οδήγησε στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως του 30%.

## 6.3 Φωτορύπανση

### 6.3.1 Εισαγωγή

Ένα από τα σενάρια που εξετάζονται στο έβδομο κεφάλαιο σχετίζεται με τον περιορισμό της φωτορύπανσης. Ο περιορισμός αυτού του φαινομένου είναι ιδιαίτερα σημαντικός για λόγους που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Φωτορύπανση ορίζεται ως το φαινόμενο το οποίο σημειώνεται στον ουρανό, κυρίως πάνω από τα αστικά κέντρα και γενικότερα πάνω από τοποθεσίες με πολλά φώτα, κατά το οποίο ο ουρανός είναι πιο φωτεινός από το κανονικό με αποτέλεσμα να υπάρχει μειωμένη αντίθεση μεταξύ των αστερών και του φόντου του ουρανού. Παρόλα αυτά, μελέτες έχουν αποδείξει ότι η φωτορύπανση έχει σημαντικό αντίκτυπο και σε άλλους τομείς εκτός από την αστρονομία όπως στην οικολογία και στην ανθρώπινη υγεία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν εισαχθεί επιπλέον όροι για να περιγράψουν το φαινόμενο όπως αστρονομική φωτεινή ρύπανση ή οικολογική φωτεινή ρύπανση [13].

Από την ανακάλυψη της πρώτης λάμπας στο τέλος της δεκαετίας του 1870, μέχρι σήμερα η φωτεινή ρύπανση εντοπίζεται σχεδόν παντού σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες. Η έκταση της φωτεινής ρύπανσης συνεχίζει να επεκτείνεται γρήγορα με ρυθμό 6% κάθε χρόνο κυρίως σε νεότερες βιομηχανικές οικονομίες. Η φωτεινή ρύπανση συνεχίζει να αυξάνεται εξαιτίας της ανάπτυξης των αστικών περιβαλλόντων καθώς ο πολλαπλασιασμός της χρήσης τεχνητού φωτισμού, συμβάλλει στην ταχύτερη ανάπτυξη του πολεοδομικού σχεδιασμού και των δημόσιων συγκοινωνιών. Στις πόλεις η ανάγκη για ύπαρξη φωτισμού είναι μεγάλη, καθώς βελτιώνει την ορατότητα την νύχτα και αυξάνει τις ώρες χρήσης για υπαίθριες δραστηριότητες [14].



Εικόνα 6.5 Φωτεινή ρύπανση το 1993



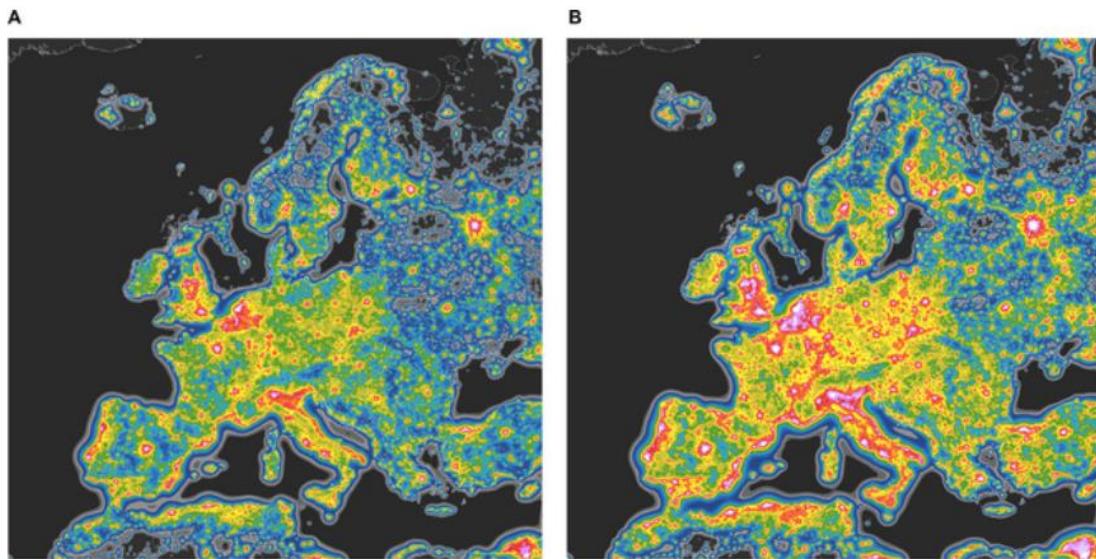
Εικόνα 6.6 Φωτεινή ρύπανση το 2010

Οι δορυφορικές εικόνες της κεντρικής Ευρώπης που τραβήχτηκαν με διαφορά 18 χρόνων μεταξύ τους επιβεβαιώνουν όσα περιεγράφηκαν παραπάνω καθώς το φαινόμενο της φωτορύπανσης αυξάνεται συνεχώς. Οι εικόνες αποτυπώνουν την φωτεινή ροή των φωτιστικών που κατευθύνεται προς τον ουρανό.

Επιπλέον με την ολοένα και αυξανόμενη χρησιμοποίηση των LED εξαιτίας της πολύ καλής απόδοσης τους αλλά και της χαμηλής τιμής τους το φαινόμενο της φωτορύπανσης είναι πιθανόν να επιδεινωθεί τα επόμενα χρόνια. Παρόλα αυτά αν



χρησιμοποιηθούν φωτιστικά LED χαμηλής θερμοκρασίας χρώματος (3000K και κάτω) μπορεί να περιοριστεί το φαινόμενο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα LED χαμηλότερης θερμοκρασίας χρώματος περιέχουν λιγότερη ποσότητα μπλε φωτός, το οποίο είναι αυτό που διασκορπίζεται πολύ αποδοτικά στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, αν περιοριστεί η ποσότητα του μπλε φωτός που εκλύουν τα LED μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αυτά χωρίς κίνδυνο επιδείνωσης του φαινομένου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των παραπάνω είναι η ακόλουθη φωτογραφία που δείχνει την φωτορύπανση της Ευρώπης τώρα και σε ένα υποθετικό σενάριο όπου τοποθετούνται LED θερμοκρασίας χρώματος 4000K, που εκλύουν μεγάλη ποσότητα μπλε φωτός. Είναι προφανής η αύξηση της φωτορύπανσης στην δεξιά πλευρά της φωτογραφίας μετά την εγκατάσταση LED 4000K [15].



*Εικόνα 6.7 Φωτεινή ρύπανση της Ευρώπης τώρα (αριστερά) και σε υποθετικό σενάριο αντικατάστασης λαμπτήρων με LED 4000K (δεξιά)*



### 6.3.2 Αιτίες φωτεινής ρύπανσης

Οι αιτίες της φωτεινής ρύπανσης δεν είναι πολλές, παρόλα αυτά πρέπει να σχολιαστούν για τον καλύτερο προσδιορισμό του φαινομένου. Αρχικά, μια κακή σχεδίαση της φωτεινής εγκατάστασης, που θα έχει ως αποτέλεσμα την μη αποδοτική εγκατάσταση των φωτιστικών θα επιδεινώνει το φαινόμενο της φωτορύπανσης. Επιπλέον, η χρήση εξωτερικών φωτιστικών για τον φωτισμό περιοχών που δεν είναι αναγκαίο να φωτιστούν αλλά και η χρησιμοποίηση φωτιστικών χωρίς περιορισμό της φωτεινής εκπομπής έχουν αρνητικές επιπτώσεις. Τέτοιου είδους φωτιστικά κατευθύνουν μεγάλο μέρος της φωτεινής ροής τους προς τα πλάγια ή προς τον ουρανό, με αποτέλεσμα να επιδεινώνουν το φαινόμενο. Εκτιμάται ότι 30% του συνολικού εξωτερικού φωτισμού σπαταλάται εξαιτίας κακού σχεδιασμού της εγκατάστασης.

Επίσης, η ανεύθυνη χρήση των φωτιστικών από τους χρήστες οι οποίοι αφήνουν φώτα αναμμένα όλο το βράδυ είναι ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ'όψιν. Τέλος, η συγκέντρωση μεγάλου πληθυσμού στις πόλεις, καθώς εντοπίζονται πολλές επιχειρήσεις ή και σπίτια σε μικρό χώρο οδηγούν στην επιδείνωση του φαινομένου [16].



*Εικόνα 6.8 Φωτιστικό εξωτερικού χώρου χωρίς περιορισμό της φωτεινής εκπομπής*

### 6.3.3 Επιπτώσεις της φωτεινής ρύπανσης

Το φαινόμενο της φωτορύπανσης, όπως έχει αναφερθεί, έχει σοβαρές επιπτώσεις τόσο στον άνθρωπο όσο και στην φύση. Τα χαρακτηριστικότερα προβλήματα που προκύπτουν εξαιτίας της επιδείνωσης του φαινομένου παρουσιάζονται στην συνέχεια της ενότητας

#### 6.3.3.1 Αστρονομία

Τα σκοτεινά τοπία αποτελούν βασική προϋπόθεση για να προκύψουν αστρονομικές παρατηρήσεις είτε από κάποιον επαγγελματία είτε ερασιτέχνη αστρονόμο. Συνεπώς οι σκοτεινές και χαμηλής φωτεινότητας τοποθεσίες δίνουν την δυνατότητα να παρατηρηθούν τα άστρα και οι πλανήτες, κάτι που άλλωστε συμβαίνει από την αρχαιότητα. Δυστυχώς όμως το φαινόμενο της φωτορύπανσης απειλεί

πολλές εγκαταστάσεις αστρονομίας, καθώς τα φωτιστικά εξωτερικού χώρου διοχετεύουν ένα μέρος της φωτεινής ροής τους στον τον ουρανό αυξάνοντας έτσι την φωτεινότητα του με αποτέλεσμα να δυσκολεύεται η εξερεύνηση του νυχτερινού ουρανού. Οι αστρονόμοι, οι οποίοι προσπαθούν να εντοπίσουν πολύ αχνά ίχνη φωτός από το μακρινό διάστημα, συναντάνε σημαντικές δυσκολίες από το νέφος που δημιουργείται πάνω από τις αστικές περιοχές (εξαιτίας του φωτισμού εξωτερικών χώρων), καθώς κατευθύνεται προς την ατμόσφαιρα κάνοντας τον ουρανό να φαίνεται φωτεινότερος με αποτέλεσμα πολλά άστρα να μην είναι πλέον ορατά. Έτσι το έργο τους γίνεται δυσκολότερο, καθώς δεν μπορούν να μελετήσουν λιγότερο φωτεινά άστρα [17].

### 6.3.3.2 Οικολογία

Δυστυχώς οι επιπτώσεις της φωτεινής ρύπανσης έχουν αντίκτυπο και στην πανίδα με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η καθημερινότητα πολλών ζώων εξαιτίας του φαινομένου της φωτορύπανσης. Πιο συγκεκριμένα τα νυκτόβια ζώα πλέον βιώνουν αλλαγές στο βιολογικό τους ρολόι καθώς, ενώ κανονικά κοιμούνται την μέρα και είναι ενεργά τις βραδινές ώρες, πλέον εξαιτίας της φωτορύπανσης αντιμετωπίζουν την νύχτα ως μέρα. Επίσης, πολλά ζώα χρησιμοποιούσαν στο παρελθόν το σκοτάδι ως μέσο επιβίωσης καθώς κρύβονταν από τους θηρευτές τους, πλέον δεν μπορούν να συνεχίσουν να το χρησιμοποιούν. Επιπλέον έχουν αλλάξει και οι τοποθεσίες όπου κυνηγούσαν την τροφή τους, καθώς τα θηράματα (έντομα) τους προσελκύονται από τα φωτιστικά με αποτελέσματα να συσσωρεύονται γύρω από αυτά [18],[19].

Ενώ πρόβλημα αντιμετωπίζουν και τα πτηνά καθώς χρησιμοποιούνε το φως του φεγγαριού και των αστεριών προκειμένου να μεταναστεύσουν ή να κυνηγήσουν για την τροφή τους, με αποτέλεσμα η φωτορύπανση να τους αποπροσανατολίζει οδηγώντας τα εκτός πορείας. Μάλιστα αρκετά εκατομμύρια περιστέρια πεθαίνουν κάθε χρόνο εξαιτίας της σύγκρουσης τους με κτίρια που είναι φωτισμένα.

Ακόμα και τα ψάρια βιώνουν τις επιπτώσεις του φαινομένου καθώς δεν είναι συνηθισμένα στην έκθεση σε τεχνητό φως με αποτέλεσμα πολλές φορές να μένουν παροδικά τυφλά και ευάλωτα εξαιτίας αυτού. Τέλος, ακόμα και οι θαλάσσιες χελώνες επηρεάζονται από το φαινόμενο καθώς είναι γνωστό ότι επιλέγουν να γεννήσουν τα αυγά τους σε σκοτεινές και απόμακρες παραλίες προκειμένου τα νεογέννητα να βρουν τον δρόμο προς την θάλασσα εντοπίζοντας τον φωτεινό ορίζοντα πάνω από τον ωκεανό. Όμως εξαιτίας του φαινομένου της φωτορύπανσης πολλά από αυτά χάνουν τον δρόμο τους με αποτέλεσμα να πεθαίνουν [20].

### 6.3.3.3 Ανθρώπινη υγεία

Ο υπερβολικός ή παρεμβατικός φωτισμός μέσα σε ένα αστικό περιβάλλον μπορεί να διαταράξει την ανθρώπινη υγεία. Αρχικά, επηρεάζεται ο κιρκάδιος ρυθμός του ανθρώπου με αποτέλεσμα ο ανθρώπινος οργανισμός να μην παράγει τα αναμενόμενα επίπεδα μελατονίνης κατά την διάρκεια της νύχτας κάτι που συνεπάγεται με δυσκολία ύπνου. Μάλιστα, όπως αποδείχθηκε και σε έρευνα, η παραγωγή μελατονίνης επηρεάζεται σημαντικά και μειώνεται από τις εκπομπές μπλε φωτός και όχι από την ποσότητα της φωτεινής ροής που κατευθύνεται στον άνθρωπο. Συνέπεια των παραπάνω είναι και η διαταραχή του βιολογικού ρολογιού του

ανθρώπου, ενώ μπορεί να συνοδευτεί και με απότομες αλλαγές διάθεσης εξαιτίας των παραπάνω [21].

#### 6.3.4 Τρόποι περιορισμού φωτορύπανσης

Για να περιοριστεί η φωτορύπανση θα πρέπει πρωταρχικά να χρησιμοποιούνται φωτιστικά εξωτερικού χώρου με περιορισμό της φωτεινής εκπομπής έτσι ώστε να μην υπάρχουν τμήματα της φωτεινής ροής που διοχετεύονται προς τα πλάγια ή προς τα πάνω αλλά μόνο στη φωτιζόμενη επιφάνεια. Επιπλέον, θα πρέπει ο φωτισμός να είναι αρκετά εστιασμένος έτσι ώστε να μην φωτίζονται σημεία που δεν χρειάζονται να φωτιστούν [22].

Επίσης πρέπει να γίνεται μια προσεκτική μελέτη εγκατάστασης οδοφωτισμού έτσι ώστε να μην χρησιμοποιείται παραπάνω φως απ' όσο χρειάζεται, καθώς παραπάνω φωτισμός μόνο αρνητικές επιπτώσεις μπορεί να έχει [23].

Επίσης, καλό θα ήταν να χρησιμοποιούνται μέθοδοι dimming στον φωτισμό δρόμων έτσι ώστε να περιορίζεται ο φωτισμός όταν δεν είναι απαραίτητος. Αυτό πέρα από μικρότερη κατανάλωση θα βοηθήσει και στον περιορισμό του φαινομένου. Παράλληλα και τα σπίτια και οι επιχειρήσεις θα μπορούσαν να σβήνουν τα φώτα όταν δεν τα χρειάζονται.

Τέλος, αρκετά σημαντική είναι και η επιλογή θερμοκρασίας χρώματος μιας εγκατάστασης. Παρόλο, λοιπόν, που τα LED θερμοκρασίας χρώματος 4000K είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τα 3000K όλες οι μελέτες συγκλίνουν ότι οι υλοποιήσεις με θερμότερα χρώματα είναι πιο φιλικές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα LED θερμοκρασίας χρώματος 4000K περιέχουν μεγάλη ποσότητα μπλε φωτός το οποίο όπως σχολιάστηκε ήδη έχει αρνητικές επιπτώσεις για τον άνθρωπο, ενώ επιδεινώνει και το φαινόμενο της φωτορύπανσης όπως δείχνουν μελέτες. Καλό θα ήταν λοιπόν όλες οι υλοποιήσεις που γίνονται με βασικό στόχο των περιορισμό της φωτορύπανσης να γίνονται με θερμοκρασίες χρώματος το πολύ 3000K. Μάλιστα χαρακτηριστικό παράδειγμα των παραπάνω αποτελούν δυο υλοποιήσεις οι οποίες έγιναν με θερμοκρασία χρώματος ίση με 1800K. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν νέας τεχνολογίας LED τα οποία ονομάζονται PC Amber LED. Η πρώτη υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στον περιβάλλοντα χώρο του αστεροσκοπείου των Κανάριων νήσων προκειμένου να προστατευθεί το οικοσύστημα αλλά και να μην εμποδίζεται η παρατήρηση των άστρων. Η δεύτερη υλοποίηση έγινε στην ολλανδική πόλη Maastricht με στόχο να προστατευτεί η πανίδα της περιοχής και πιο συγκεκριμένα οι νυχτερίδες της περιοχής, έτσι ώστε να μην διαταράσσεται η καθημερινότητα τους εξαιτίας των φωτιστικών με θερμοκρασία 4000K [24], [25].

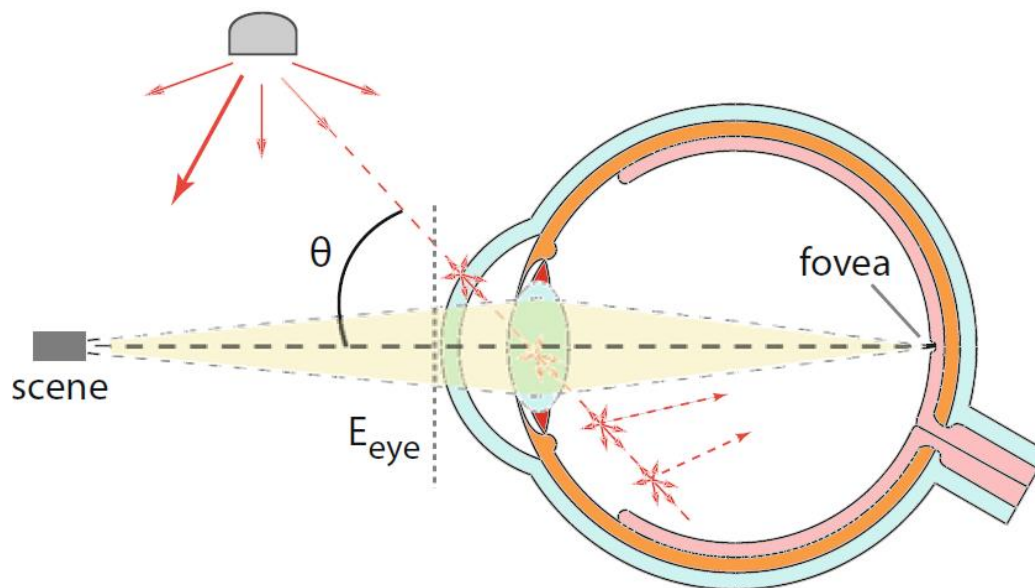
Με βάση τα παραπάνω στο επόμενο κεφάλαιο η υλοποίηση που έγινε είχε θερμοκρασία χρώματος 3000K, ενώ παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκε το κατάλληλο φωτιστικό, όπου διανέμει το μεγαλύτερο μέρος της φωτεινής του ροής εντός οδοστρώματος.

## 6.4 Θάμβωση

### 6.4.1 Εισαγωγή

Η θάμβωση είναι μία έννοια που θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ'όψιν, κατά την εκτέλεση μια μελέτης οδοφωτισμού. Υπάρχουν δυο είδη θάμβωσης, η ανικανότητας και η δυσφορίας [26].

Η θάμβωση ανικανότητας είναι υπεύθυνη για την αρνητική επίδραση της θάμβωσης στην οπτική απόδοση. Ο μηχανισμός με βάση τον οποίο χάνεται η οπτική απόδοση εξαιτίας της παρουσίας της θάμβωσης γίνεται καλύτερα αντιληπτός εξετάζοντας την εικόνα 6.6.



Εικόνα 6.9 Θάμβωση

Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας εστιάζει σε μία εικόνα του περιβάλλοντος και έτσι το τελικό οπτικό αποτέλεσμα καθορίζεται από την λαμπρότητα της εικόνας. Ταυτόχρονα όμως η φωτεινή ροή, που προέρχεται από μία πηγή θάμβωσης που βρίσκεται πολύ κοντά στο πεδίο όρασης, διασκορπίζεται στο φακό και στον βολβό του ματιού. Μέρος αυτής της φωτεινής ροής, ανακατευθύνεται προς το κεντρικό βοθρίο (Το κεντρικό βοθρίο, μια μικρή περιοχή που περιέχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση κωνίων στο μάτι και είναι υπεύθυνη για την κεντρική όραση), όπου επιδρά αρνητικά στην εικόνα (που κοιτάμε), μειώνοντας έτσι την αντίθεση. Συμπεριφέρεται, λοιπόν σαν ένα φωτεινό πέπλο λαμπρότητας, καλύπτοντας το πεδίο όρασης.

Το αποτέλεσμα λοιπόν της θάμβωσης, είναι αντικείμενα τα οποία θα ήταν ορατά, υπό συνθήκες μηδενικής θάμβωσης, να μην διακρίνονται πλέον εύκολα και θα πρέπει να αυξηθεί η αντίθεση για να ξαναγίνουν αντιληπτά. Αυτό το φαινόμενο, λοιπόν, αποτελεί τρόπο μέτρησης της απώλειας της οπτικής απόδοσης εξαιτίας της θάμβωσης, γνωστό και ως TI. Το TI ορίζεται ως την ποσότητα της έξτρα αντίθεσης που απαιτείται για να ξαναγίνει ορατό ένα αντικείμενο υπό συνθήκες θάμβωσης.

Στην πράξη, προφανώς, οι αντιθέσεις δεν πρόκειται να αυξηθούν και έτσι η τιμή του TI απλά περιγράφει την μείωση της οπτικής απόδοσης εξαιτίας της θάμβωσης. Κάθε κομμάτι του οδοστρώματος, έχει διαφορετικά επίπεδα θάμβωσης και έτσι η επίδραση της θάμβωσης σε ένα παρατηρητή θα είναι διαφορετική σε κάθε σημείο.

Η θάμβωση δυσφορίας μπορεί να αποσπάσει την προσοχή του οδηγού από το σημείο που κοιτάει εξαιτίας της φωτεινής πηγής, μειώνοντας έτσι την ασφάλεια οδήγησης. Πρακτικά η θάμβωση δυσφορίας είναι η αίσθηση οπτικής ενόχλησης που προκαλείται εξαιτίας υπερβολικών ή ακατάλληλων φωτεινών πηγών. Η θάμβωση δυσφορίας για αρκετά χρόνια ήταν δύσκολο να εξηγηθεί που οφείλεται και από τι εξαρτάται. Σύμφωνα όμως με νέες έρευνες η αύξηση της θάμβωσης δυσφορίας εξαρτάται κυρίως από την αύξηση της φωτεινής έντασης του ματιού, την μειωμένη λαμπρότητα του βάθους (background) και την γωνία θέασης του παρατηρητή. Ο παράγοντας όμως με την μεγαλύτερη επιρροή είναι η φωτεινή ένταση στο μάτι του παρατηρητή. Αυτό συνήθως αποτελεί πρόβλημα των νεότερων οδηγών [27].

#### **6.4.2 Αιτίες θάμβωσης**

Η θάμβωση προκαλείται κυρίως από την κατασκευή του φωτιστικού ή από τον τρόπο τοποθέτησης του. Αρχικά, λοιπόν, αν ένα φωτιστικό έχει μια κακή σχεδίαση με αποτέλεσμα μεγάλες τιμές της φωτεινής του έντασης να κατανέμονται σε υψηλές γωνίες πάνω από  $75^{\circ}$ - $80^{\circ}$  αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να θαμπώνονται οι διερχόμενοι οδηγοί. Επίσης, τα φωτιστικά τεχνολογίας LED συνεισφέρουν στην αύξηση της θάμβωσης καθώς η υψηλής έντασης φωτεινή ροή που παράγεται από μικρές φωτεινές πηγές LED κατευθύνεται από εσωτερικούς φακούς αντανάκλασης οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο φωτιστικό LED. Αυτή η ύπαρξη πολλών μικρών φωτεινών πηγών έχει ως αποτέλεσμα την πιο ανομοιόμορφη κατανομή της φωτεινής ροής του φωτιστικού σε σχέση με τα παλαιότερης τεχνολογίας φωτιστικά [28].

Επίσης, ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν αρκετά φωτιστικά που είχαν εγκατασταθεί τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, είναι η κακή τοποθέτηση τους κάτι που έχει ως αποτέλεσμα μια σημαντική ποσότητα της φωτεινής ροής να κατανέμεται σε γωνίες οριακά κάτω από τον ορίζοντα. Αυτή η εγκατάσταση επιτρέπει την αύξηση της απόστασης μεταξύ των ιστών, κάτι που μείωνε το κόστος της εγκατάστασης, αλλά παράλληλα είχε και μεγάλες τιμές θάμβωσης [29].

#### **6.4.3 Αποτελέσματα θάμβωσης**

Υπερβολικός και λανθασμένα κατανεμημένος φωτισμός μπορεί να οδηγήσει στην δυσκολία εντοπισμού αντικειμένων του δρόμου αυξάνοντας έτσι το κίνδυνο ατυχήματος. Μάλιστα υπάρχουν αρκετές αναφορές που συνδέουν την θάμβωση με την πιθανότητα ύπαρξης σοβαρών ατυχημάτων. Βέβαια εδώ πρέπει να σχολιαστεί ότι αρκετές έρευνες συμπεριλαμβάνουν και την πιθανότητα θάμβωσης του οδηγού από τους προβολείς του οχήματος που κινείται στο αντίθετο ρεύμα, κάτι που δεν μπορεί να προβλεφθεί κατά την διάρκεια σχεδίασης ενός συστήματος οδοφωτισμού [30].

Επιπλέον σύμφωνα με έρευνες οι άνθρωποι μεγαλύτερης ηλικίας είναι πιο επιρρεπείς σε ατυχήματα που οφείλονται στην θάμβωση. Αυτό οφείλεται κυρίως σε οπτικούς και νευρολογικούς παράγοντες οι οποίοι όσο μεγαλώνει ο άνθρωπος περιορίζουν την απόδοσή τους με αποτέλεσμα να υπολειτουργούν [31], [32].

Επίσης, όσον αφορά τα φωτιστικά τεχνολογίας LED, σύμφωνα με Αμερικανικούς οργανισμούς [33], η θάμβωση ανικανότητας και δυσφορίας αυξάνεται εξαιτίας της εκπομπής μπλε φωτός κυρίως των φωτιστικών με θερμοκρασία 4000K, κάτι που οδηγεί στην εμφάνιση επικίνδυνων καταστάσεων κατά την διάρκεια της οδήγησης.

Τέλος, χαρακτηριστικό παράδειγμα της ύπαρξης του προβλήματος της θάμβωσης αποτελεί η πόλη Pittsburgh, καθώς ενώ έχει επενδύσει ένα σημαντικό κεφάλαιο για την εγκατάσταση νέων φωτιστικών τεχνολογίας LED, αποδείχθηκε σύμφωνα με έρευνες, ότι η ποιότητα φωτισμού από την πλευρά των οδηγών είναι κακή εξαιτίας της θάμβωσης. Παρόλο, μάλιστα που έχουν επενδυθεί εκ νέου αρκετά χρήματα για την αγορά καλυμμάτων των φωτιστικών προκειμένου να μειωθεί το φαινόμενο, δεν είναι αρκετά και θα πρέπει να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η εγκατάσταση [34].



*Εικόνα 6.10 Εγκατάσταση με υψηλό δείκτη θάμβωσης*

#### **6.4.4 Τρόποι περιορισμού θάμβωσης**

Προκειμένου να περιοριστεί το φαινόμενο θα πρέπει αρχικά να γίνεται μια προσεκτική μελέτη της εγκατάστασης προκειμένου τα φωτιστικά να τοποθετηθούν σωστά και να μην δυσκολεύουν τον οδηγό. Με βάση τα παραπάνω οι εκπομπές φωτεινής ροής θα πρέπει να περιορίζονται αυστηρά κάτω από το σημείο του ορίζοντα και το φωτιστικό θα πρέπει να φωτίζει όσο πιο εστιασμένα προς το οδόστρωμα γίνεται. Σαν συμπέρασμα των παραπάνω τοποθέτηση φωτιστικών σε πάνω από 5 ή 10 μούρες δεν συνίσταται.

Επιπλέον τα φωτιστικά θα πρέπει να έχουν μια ικανοποιητική κατανομή φωτεινής ροής που εστιάζεται κυρίως στο φωτισμό του οδοστρώματος, χωρίς παράλληλα να φωτίζει υπερβολικά δημιουργώντας μεγάλες αντιθέσεις κάνοντας τα αντικείμενα αόρατα. Μάλιστα για τον λόγο αυτό πολλές εταιρείες παρασκευής φωτιστικών LED εξετάζουν ήδη τρόπους περιορισμού της θάμβωσης αναπτύσσοντας

πιο αποδοτικά φωτιστικά. Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα αναπτύχθηκε η υλοποίηση περιορισμού θάμβωσης στο κεφάλαιο 7.

## 6.5 Ομοιόμορφος φωτισμός

### 6.5.1 Ολική ομοιομορφία λαμπρότητας

Η ομοιομορφία φωτισμού μίας εγκατάστασης οδοφωτισμού είναι αρκετά σημαντική παρόλο που μερικές φορές αμελείται και θεωρείται ως δευτερεύων στόχος. Στον οδοφωτισμό η ομοιομορφία μιας εγκατάστασης μετράται με δυο δείκτες τον δείκτη συνολικής ομοιομορφίας και τον δείκτη κατά μήκους ομοιομορφίας. [25]

Ξεκινώντας η έννοια της ομοιομορφίας μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή με βάση το παρακάτω παράδειγμα. Ο φωτισμός δρόμου στοχεύει στο να κάνει ορατά τα αντικείμενα, ως σκοτεινές φιγούρες κόντρα στην φωτεινή επιφάνεια του δρόμου. Όσο υψηλότερη είναι η λαμπρότητα του δρόμου, τόσο περισσότερα αντικείμενα θα είναι ορατά. Η αρχή της διάκρισης των αντικειμένων (silhouette principle) του οδοφωτισμού για συγκεκριμένο αριθμό αντικειμένων με τυπικούς συντελεστές αντανάκλασης των ρούχων των πεζών αποτυπώνεται στην παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 6.11 Αντικείμενα με αντανακλαστικές ιδιότητες ανάλογες με αυτές των ρούχων των πεζών*

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.8 μόνο στην τελευταία περίπτωση όπου υπάρχουν μεγάλες τιμές λαμπρότητας στο φόντο, όλα τα αντικείμενα είναι ορατά εξαιτίας της αντίθεσης που δημιουργείται. Αντίθετα, ειδικότερα στην πρώτη περίπτωση όπου η λαμπρότητα είναι περιορισμένη τα τελευταία αντικείμενα είναι σχεδόν αόρατα. Αντίθεση ορίζεται ως η διαφορά λαμπρότητας μεταξύ ενός αντικειμένου και του περιβάλλοντα χώρου του. Για να είναι ένα αντικείμενο ορατό θα πρέπει το επίπεδο λαμπρότητας τους να είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του οδοστρώματος και τότε η αντίθεση είναι θετική. Αντίθετα, αν το επίπεδο λαμπρότητας τους να είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του οδοστρώματος τότε η αντίθεση είναι αρνητική. Για να είναι ορατό ένα αντικείμενο στο οδόστρωμα πρέπει να έχει είτε θετική είτε αρνητική αντίθεση. Αυτή η παρατήρηση διατυπώθηκε από τον βρετανό ερευνητή Waldram.



Σε περίπτωση αυξημένης κίνησης του δρόμου, η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι οριακά ορατή. Σε μια τέτοια περίπτωση, όπου οι ταχύτητες των οχημάτων είναι χαμηλές και οι αποστάσεις είναι μικρές, η κακή ορατότητα δεν είναι πολύ μεγάλο πρόβλημα. Αντίθετα, σε δρόμους που αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες όπου απαιτείται και ορατότητα σε μεγάλες αποστάσεις η επιφάνεια του οδοστρώματος αποτελεί και πάλι το «φόντο» για τα περισσότερα αντικείμενα του δρόμου.

Για να εξασφαλίσουμε υψηλές αντιθέσεις και επομένως επαρκή ορατότητα σε όλα τα σημεία του δρόμου, η διαφορά μεταξύ της μέσης και της ελάχιστης λαμπρότητας οδοστρώματος πρέπει να είναι μικρή. Αυτό μπορεί να συμβεί, εξασφαλίζοντας υψηλή αναλογία ελάχιστης προς μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος. Ο λόγος αυτός ( $L_{\min}/L_{\text{avg}}$ ) ονομάζεται συνολική ομοιομορφία και συμβολίζεται με  $U_0$ . Όσο μικρότερος είναι ο παραπάνω λόγος τόσο πιο δύσκολο θα είναι για τα αντικείμενα να είναι ορατά σε κομμάτια χαμηλής λαμπρότητας του οδοστρώματος. Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί ότι, αν ο περιφερειακός φωτισμός είναι υψηλός (από καταστήματα διαφημιστικές πινακίδες κ.α.) θα πρέπει η λαμπρότητα οδοστρώματος να ρυθμιστεί κατάλληλα έτσι ώστε πεζοί, οχήματα και αντικείμενα να αναγνωρίζονται έγκαιρα.

### 6.5.2 Κατά μήκος ομοιομορφία

Ένας σημαντικός παράγοντας στον οδοφωτισμό είναι η κατά μήκος ομοιομορφία της λαμπρότητας του δρόμου. Μια συνεχόμενη εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών λωρίδων του δρόμου, που εξαφανίζονται κάτω από το όχημα καθώς αυτό κινείται, μπορεί να έχουν ή και να μην έχουν αρνητική επίπτωση στην οπτική απόδοση. Αδιαμφισβήτητα όμως το φαινόμενο αυτό είναι ενοχλητικό για τον οδηγό αν η διαφορά της φωτεινότητας μεταξύ φωτεινών και σκοτεινών περιοχών είναι μεγάλη.

Η κατά μήκος ομοιομορφία ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ελάχιστης προς την μέγιστη λαμπρότητα που μετράται σε μια γραμμή παράλληλη της λωρίδας του δρόμου. Οι δρόμοι πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε η τιμή τόσο της ολικής όσο και της κατά μήκος ομοιομορφίας να είναι ικανοποιητική. Η κατά μήκος ομοιομορφία θα γίνει καλύτερα κατανοητή με την ακόλουθη εικόνα.



*Εικόνα 6.12 Χαμηλή τιμή ολικής ομοιομορφίας (αριστερά) – Χαμηλή τιμή κατά μήκος ομοιομορφίας (δεξιά)*



Η αριστερή φωτογραφία παρουσιάζει μια εγκατάσταση με πολύ χαμηλή τιμή ολικής ομοιομορφίας  $U_o$  (αναλογία ελάχιστης  $L_{min}$  προς μέσης λαμπρότητας  $L_{avg}$ ). Από άποψη οπτικής απόδοσης πρόκειται για μια κακή εγκατάσταση φωτισμού, καθώς τα αντικείμενα στην αριστερή πλευρά του δρόμου είναι σχεδόν αόρατα, αφού το κομμάτι του δρόμου δεν φωτίζεται καθόλου. Παρόλα αυτά, από άποψη οπτικής άνεσης είναι μια πολύ καλή εγκατάσταση, καθώς η τιμή της κατά μήκους ομοιομορφίας είναι υψηλή.

Η δεξιά φωτογραφία, τώρα, παρουσιάζει μια εγκατάσταση φωτισμού ελαφρώς καλύτερη, εξετάζοντας την οπτική απόδοση της καθώς ο λόγος ελάχιστης προς μέσης λαμπρότητας έχει υψηλότερη τιμή σε σχέση με πριν. Παρόλα αυτά, η εγκατάσταση από άποψη οπτικής άνεσης υστερεί αρκετά σε σχέση με την προηγούμενη, καθώς ο χρήστης έρχεται αντιμέτωπος με συνεχόμενες αλλαγές λαμπρότητας καθώς διασχίζει το οδόστρωμα. Το φαινόμενο της συνεχής αλλαγής φωτεινών και σκοτεινών λωρίδων του δρόμου, ονομάζεται zebra effect.

### 6.5.3 Αποτελέσματα μιας ομοιόμορφης εγκατάστασης

Με βάση τα παραπάνω κρίνεται αναγκαία η εξασφάλιση ενός ικανοποιητικού επιπέδου ομοιομορφίας, καθώς διευκολύνει τον οδηγό κατά την διάρκεια οδήγησης.

Μάλιστα σύμφωνα με μελέτες έχει αποδειχθεί ότι ο τύπος του φωτιστικού και η ομοιομορφία λαμπρότητας της εγκατάστασης επηρεάζει τα επίπεδα ορατότητας του οδηγού. Αυτό συνεπάγεται λοιπόν ότι για την ασφάλεια και την οπτική άνεση του οδηγού πρέπει το επίπεδο ομοιομορφίας να είναι αυστηρά πάνω από καθορισμένα όρια [35].

Είναι γνωστό ότι χρειάζεται χρόνος για να προσαρμοστεί το μάτι σε διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας. Ο χρόνος προσαρμογής εξαρτάται από τη φωτεινότητα στην αρχή και στο τέλος μίας αλλαγής φωτεινότητας, καθώς η προσαρμογή από σκοτεινό σε φωτεινό φόντο διαρκεί δευτερόλεπτα, ενώ αντίθετα η προσαρμογή από το φωτεινό στο σκοτάδι μπορεί να διαρκέσει αρκετά λεπτά. Όταν ο φωτισμός του δρόμου τελειώνει ή μειώνεται, η μείωση της φωτεινότητας πρέπει να είναι βαθμιαία. Η ζώνη μετάβασης διευκολύνει την προσαρμογή του ματιού σε πιο σκοτεινό περιβάλλον [36].

Επίσης, η ασφάλεια του οδηγού καθορίζεται από την ικανότητα του να εντοπίζει εγκαίρως αντικείμενα στον δρόμο προκειμένου να υπολογίσει την πορεία του. Έτσι λοιπόν ικανοποιητικά επίπεδα ομοιομορφίας είναι απαραίτητα για να είναι φωτισμένο όλο το οδόστρωμα κάνοντας έτσι όλα τα αντικείμενα ορατά.

Η ομοιομορφία μιας εγκατάστασης καθορίζεται κυρίως από τον τρόπο τοποθέτησης φωτιστικών αλλά και από την επιλογή τους. Τα φωτιστικά δεν θα πρέπει να τοποθετούνται σε υπερβολικά μεγάλες αποστάσεις, καθώς με αυτόν τον τρόπο δεν θα φωτίζονται όλα τα σημεία του οδοστρώματος με την ίδια ποσότητα φωτεινής ροής. Επιπλέον, η επιλογή ενός φωτιστικού που κατανέμει ομοιόμορφα το σύνολο της φωτεινής ροής του προς το οδόστρωμα είναι σημαντική. Στο έβδομο κεφάλαιο υλοποιήθηκε μια εγκατάσταση οδοφωτισμού όπου επιτυγχάνει υψηλές τιμές ολικής ομοιομορφίας λαμπρότητας.

## Βιβλιογραφία

1. [www.theguardian.com/travel/2014/nov/03/-sp-berlin-city-guide-bars-restaurants-hotels](http://www.theguardian.com/travel/2014/nov/03/-sp-berlin-city-guide-bars-restaurants-hotels)
2. *ENERGY CONSUMPTION SAVING SOLUTIONS BASED ON INTELLIGENT STREET LIGHTING CONTROL SYSTEM*, Mircea Popa<sup>1</sup>, Costin Cepișcă<sup>2</sup>
3. *Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Street Lighting and Traffic Signals* June 2017
4. *SMART GRID Technologies*, August 6-8, 2015 *Intelligent Street Lights* Y M Jagadeesha, S Akilesha, S Karthika, Prasantha)
5. [www.electronicshub.org/ir-sensor/](http://www.electronicshub.org/ir-sensor/)
6. *Energy-Efficient Intelligent Street Lighting System Using Traffic-Adaptive Control* Gul Shahzad, Heekwon Yang, Arbab Waheed Ahmad and Chankil Lee
7. *Public street lighting remote operation and supervision system*, Cleber Costa da Fonseca a, Rodrigo Palucci Pantoni, Dennis Brandão
8. *Smart Street Lighting as a Smart City Platform Applications and Connectivity Best Practices Published 2Q 2017 Commissioned by Echelon*
9. *Maximizing Effectiveness of Smart City Policies February 2017*
10. *GSMA Smart Cities Guide Street Lighting*
11. [www.telekom.com/en/media/media-information/archive/deutsche-telekom-connects-street-lighting-479470](http://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/deutsche-telekom-connects-street-lighting-479470)
12. *Adaptive street lighting predictive control* Francesco Marinao\*, Fabio Leccesea, Stefano Pizzutib
13. [Wikipedia / light pollution eu/avoiding bright future](https://en.wikipedia.org/wiki/Light_pollution#/media/File:Avoiding_bright_future)
14. [www.lichtverschmutzung.de/seiten/karten\\_en.php](http://www.lichtverschmutzung.de/seiten/karten_en.php)
15. [www.theweathernetwork.com/news/articles/what-is-light-pollution-and-how-does-it-impact-canadians/104268](http://www.theweathernetwork.com/news/articles/what-is-light-pollution-and-how-does-it-impact-canadians/104268)
16. [www.conserve-energy-future.com/types-causes-and-effects-of-light-pollution.php](http://www.conserve-energy-future.com/types-causes-and-effects-of-light-pollution.php)
17. *LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature* S. M. PAWSON AND M. K.-F. BADER
18. *The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport*
19. [www.darksky.org/light-pollution/wildlife/](http://www.darksky.org/light-pollution/wildlife/)
20. *IDA Practical Guide PG2: Effects of Artificial Light at Night on Wildlife*
21. *Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue*, Stephen M. Pauley
22. *Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera*, Fabio Falchi
23. *Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility* Fabio Falchi, Pierantonio Cinzano, Christopher D. Elvidge b, David M. Keith c, Abraham Haim d
24. [www.energynews.es/en/the-municipality-of-artenara-achieves-energy-saving-by-67-with-the-pc-amber-led-technology/](http://www.energynews.es/en/the-municipality-of-artenara-achieves-energy-saving-by-67-with-the-pc-amber-led-technology/)
25. [www.signify.com/global/our-company/news/press\\_releases/2018/20180605-going-bats-dutch-town-is-first-in-world-to-install-bat-friendly-led-street-lights](http://www.signify.com/global/our-company/news/press_releases/2018/20180605-going-bats-dutch-town-is-first-in-world-to-install-bat-friendly-led-street-lights)
26. *Road Lighting*, Wout Van Bommel
27. *Model predicting discomfort glare caused by LED road lights*, Yandan Lin,<sup>1</sup> \* Yihong Liu,<sup>1</sup> Yaojie Sun,<sup>1</sup> Xiaoyan Zhu,<sup>2</sup> Jushui Lai,<sup>2</sup> and Ingrid Heynderickx<sup>3</sup>
28. [www.ledsmagazine.com/articles/2014/08/outdoor-lighting-glare-mitigation-new-fixtures-and-ssl-projects.html](http://www.ledsmagazine.com/articles/2014/08/outdoor-lighting-glare-mitigation-new-fixtures-and-ssl-projects.html)
29. *Redefining efficiency for outdoor lighting* C. C. M. Kyba, a, b A. Hänelc and F. Hölkera
30. *Comparative Environmental and Planning Law Relating to Light Pollution Control in England and Other Jurisdictions*, Pedithep Youyuenyong
31. *Nighttime Glare and Driving Performance*, REPORT TO CONGRESS

32. *Drivers' judgments of the effect of headlight glare on their ability to see pedestrians at night*, Stephanie A. Whetsel Borzendowsk
33. [www.ama-assn.org/press-center/press-releases/ama-adopts-guidance-reduce-harm-high-intensity-street-lights](http://www.ama-assn.org/press-center/press-releases/ama-adopts-guidance-reduce-harm-high-intensity-street-lights)
34. [www.edgarsnyder.com/blog/2016/10/17-pittsburgh-led-problems.html](http://www.edgarsnyder.com/blog/2016/10/17-pittsburgh-led-problems.html)
35. *The effect of luminance uniformity on visibility level in road lighting*, O'Gu'ler PhD and S Onaygil Assoc. Prof. Dr.
36. [www.ee.co.za/article/good-lighting-values-provide-visual-comfort-performance-motorists.html](http://www.ee.co.za/article/good-lighting-values-provide-visual-comfort-performance-motorists.html)

## Κεφάλαιο Έβδομο : Διατύπωση εναλλακτικών σεναρίων αξιολόγησης ενδεικτικών καννάβων

### 7.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού πραγματοποιείται με βάση τις οδηγίες που παρέχονται στον ευρωπαϊκό οδηγό EN 13201 εγκαταστάσεων οδοφωτισμού. Ο τεχνικός οδηγός για εγκαταστάσεις οδοφωτισμού που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα και προκύπτει άμεσα από τον αντίστοιχο ευρωπαϊκό, χωρίζει την διαδικασία σε τρία βασικά βήματα, όπως έχουν ήδη αναφερθεί στο τρίτο κεφάλαιο. Το πρώτο βήμα που είναι η επιλογή της κλάσης του δρόμου παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο, ενώ τα βήματα της εκπόνησης μελέτης οδοφωτισμού και του υπολογισμού ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης περιγράφονται στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Η επιλογή κλάσεων οδοφωτισμού οδηγεί στον καθορισμό τιμών κατωφλίων για βασικές παραμέτρους με βάση τις οποίες κρίνεται μια εγκατάσταση φωτισμού. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο και είναι οι παρακάτω: μέση τιμή λαμπρότητας οδοστρώματος  $L_{avg}$ , ολική ομοιομορφία λαμπρότητας  $U_0$ , κατά μήκος ομοιομορφία λαμπρότητας  $U_1$ , δείκτης θάμβωσης TI, δείκτης φωτισμού περιβάλλοντος χώρου EIR.

Στόχος του εβδόμου κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη και η υλοποίηση σεναρίων, όπου εκτός από την ικανοποίηση των παραπάνω παραμέτρων θα επιτυγχάνονται και δευτερεύοντες στόχοι οι οποίοι μπορούν να καθοριστούν από τον εκάστοτε μελετητή. Παράλληλα μελετάται και η επίπτωση που μπορούν να έχουν τα παρακάτω σενάρια σε τομείς όπως η συνολική αποδοτικότητα αλλά και η ενεργειακή κατανάλωση της εγκατάστασης. Οι στόχοι των εναλλακτικών σεναρίων είναι οι ακόλουθοι:

- Οικονομικότερη υλοποίηση με βάση τους Δείκτες Dr,De.
- Περιορισμός φωτορύπανσης.
- Ελάχιστη τιμή θάμβωσης.
- Μεγιστοποίηση της ομοιομορφίας της λαμπρότητας.

Η υλοποίηση των παραπάνω σεναρίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορθή επιλογή του φωτιστικού. Το κατάλληλο φωτιστικό επιλέγεται κυρίως με βάση την κατανομή της φωτεινής ροής του, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στον στόχο κάθε σεναρίου. Συνολικά ήταν διαθέσιμα και χρησιμοποιήθηκαν 84 διαφορετικά πολικά διαγράμματα προκειμένου να βρεθεί το κατάλληλο φωτιστικό σε κάθε σενάριο. Για παράδειγμα, όπως θα αποδειχθεί και στην συνέχεια του κεφαλαίου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος τύπος φωτιστικού για το σενάριο του περιορισμού της φωτορύπανσης και για σενάριο της μέγιστης ομοιομορφίας, καθώς απαιτείται τελείως διαφορετική κατανομή της φωτεινής ροής των φωτιστικών στις δυο περιπτώσεις.

Τέλος, οι περισσότερες σύγχρονες εγκαταστάσεις οδοφωτισμού υλοποιούνται με φωτιστικά τύπου LED θερμοκρασίας χρώματος 3000K ή 4000K. Γι' αυτό τον λόγο κρίθηκε απαραίτητη η εξέταση των σεναρίων σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού θερμοκρασίας χρώματος τόσο 3000K όσο και 4000K.

## 7.2 Τυπικοί κάρναβοι

Η ανάπτυξη των παραπάνω σεναρίων προϋποθέτει και την υλοποίησή τους σε ρεαλιστικές συνθήκες, έτσι ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα. Γι' αυτό τον λόγο, επιλέχθηκαν ενδεικτικές γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται, από μια αναθέτουσα αρχή, για την υποβολή προτάσεων οδικού φωτισμού σε αστικές λεωφόρους. Οι προδιαγραφές, λοιπόν, των ενδεικτικών κάρναβων που χρησιμοποιήθηκαν είναι ρεαλιστικές και ανταποκρίνονται σε τυπικές γεωμετρίες αστικών λεωφόρων.

Υπήρχαν αρκετοί διαθέσιμοι κάρναβοι που θα μπορούσαν να επιλεγθούν και έτσι ενδεικτικά επιλέχθηκαν δυο κάρναβοι με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο πρώτος κάρναβος που επιλέχθηκε περιλαμβάνει δυο λωρίδες κυκλοφορίας και συνολικό πλάτος οδοστρώματος ίσο με 7,5m. Επίσης οι ιστοί τοποθετήθηκαν σε απόσταση 35m μεταξύ τους, σε μονόπλευρη διάταξη και σε απόσταση από το οδόστρωμα ίση με 1m. Ο παραπάνω κάρναβος ορίζεται από την διακήρυξη ως κάρναβος τύπου B5. Αντίθετα, ο δεύτερος κάρναβος που επιλέχθηκε έχει διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με στόχο την συλλογή περισσότερων αποτελεσμάτων που θα οδηγήσουν σε ασφαλέστερα συμπεράσματα. Ο δεύτερος ενδεικτικός κάρναβος περιλαμβάνει τρεις λωρίδες κυκλοφορίας για κάθε ρεύμα κυκλοφορίας με συνολικό πλάτος οδοστρώματος ίσο με 10,5m. Επιπλέον, τα δυο ρεύματα κυκλοφορίας χωρίζονται μεταξύ τους με νησίδα πλάτους 2m. Τέλος, οι ιστοί της εγκατάστασης τοποθετήθηκαν σε απόσταση μήκους 40m μεταξύ τους, ενώ η απόσταση τους από το οδόστρωμα είναι ίση με 0,5m. Ο δεύτερος κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε ορίζεται από την διακήρυξη ως κάρναβος τύπου E1. Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των δυο κάρναβων παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά κάρναβων

Κάρναβος	<b>B5</b>	<b>E1</b>
Πλάτος Οδοστρώματος (m)	7,5	10,5
Λωρίδες	2	3
Απόσταση Ιστών (m)	35	40
Απόσταση Ιστού –Οδοστρώματος (m)	1	0,5
Μήκος Βραχίονα	max 2m	max 2m
Προεξοχή Φωτιστικού	max + 0,5m	max + 0,5m
Κλίση Βραχίονα	0° - 10°	0° - 10°
Υψος Φ/Σ (m)	12,5	12
Διάταξη Φ/Σ	Μονόπλευρη	Αμφίπλευρα Αντικριστά
Κλάση	M3	M2
Πλάτος νησίδας (m)	-	2

### 7.3 Δείκτες αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων

#### 7.3.1 Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού

Ο προσδιορισμός των κλάσεων των ενδεικτικών καννάβων είναι σημαντικός, για τον καθορισμό των ποιοτικών και ποσοτικών απαιτήσεων κάθε κλάσης φωτισμού. Ο τρόπος υπολογισμού των κλάσεων οδοφωτισμού παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο, όμως στο παρόν κεφάλαιο δεν έγιναν ανάλογοι υπολογισμοί, καθώς οι κλάσεις των τυπικών καννάβων που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ήδη οριστεί από την αναθέτουσα αρχή. Οι δύο κάνναβοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατηγορίας M2 και M3 όπως φαίνεται και στον πίνακα 7.2, ενώ οι απαιτήσεις των κλάσεων όπως ορίζονται στο EN 13201 φαίνονται στον πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2 Τιμές ορίων αξιολόγησης EN 13201

	<i>Χρησιμοποιούμενες Κλάσεις</i>	
	<i>M2</i>	<i>M3</i>
<i>Lm (cd/m<sup>2</sup>) min maintained</i>	1,5	1
<i>Uo min</i>	0,4	0,4
<i>Ul min</i>	0,7	0,6
<i>TI max</i>	10	15
<i>EIR min</i>	0,35	0,3

#### 7.3.2 Δείκτες αξιολόγησης σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών εγκαταστάσεων οδοφωτισμού δεν θα μπορούσε να περιοριστεί σε απλή ικανοποίηση των απαιτήσεων των κλάσεων οδοφωτισμού που αναγράφονται παραπάνω, αλλά αντίθετα θα πρέπει να υπολογιστούν επιπλέον δείκτες όπως αυτοί ορίζονται στο ΕΛΟΤ EN 13201-5 [1]. Η χρήση επιπλέον δεικτών που περιγράφονται στην συνέχεια, παίζει καθοριστικό ρόλο στην καλύτερη αξιολόγηση των προτεινόμενων εγκαταστάσεων οδοφωτισμού.

- **Power Density Indicator (Dp):** Ο δείκτης πυκνότητας ισχύος ορίζει τον τρόπο υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης μιας συγκεκριμένης εγκατάστασης οδοφωτισμού κάνοντας εφικτή έτσι την σύγκριση διαφορετικών διατάξεων και τεχνολογιών για την ίδια εγκατάσταση οδοφωτισμού. Διαφορετικές τοποθεσίες θα έχουν διαφορετική γεωμετρία και περιβαλλοντικές συνθήκες οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης Dp για την σύγκριση τους. Ο δείκτης Dp μετράται σε μονάδες [W/(lx\*m<sup>2</sup>)].

Για τον υπολογισμό του δείκτη Dp χρειάζεται να είναι γνωστές οι τιμές των παρακάτω:

- Η **Συνολική Ισχύς P** του συστήματος (είτε ολόκληρης της εγκατάστασης είτε ένα ενδεικτικό κομμάτι της) η οποία περιλαμβάνει την κατανάλωση όλων των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τον φωτισμό (φωτεινές πηγές & εξοπλισμός που σχετίζεται με αυτές) αλλά

και την κατανάλωση συσκευών χρήσιμες για την λειτουργία του συστήματος όπως το κέντρο ελέγχου του συστήματος.

- Η Μέση Οριζόντια Ένταση Φωτισμού  $\bar{E}$  (μετράται σε lux) σε κάθε υποπεριοχή (μαζί με τις διαστάσεις της υποπεριοχής). Για τις κλάσεις οδοφωτισμού M ο υπολογισμός της τιμής της μέσης οριζόντιας έντασης φωτισμού πρέπει να προκύψει από τον μέσο όρο των τιμών της έντασης φωτισμού των ίδιων σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της λαμπρότητας σύμφωνα με το EN 13201.

Τελικά ο δείκτης  $D_p$  προκύπτει από τον τύπο :

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i * A_i)}$$

Όπου το  $\bar{E}_i$  είναι η Μέση Οριζόντια Ένταση Φωτισμού της υποπεριοχής  $i$ ,  $A_i$  το εμβαδόν της περιοχής  $i$  που φωτίζεται από την εγκατάσταση, ενώ το  $n$  είναι ίσο με τον αριθμό των υποπεριοχών που φωτίζονται. Αν η απαιτούμενη κλάση φωτισμού αλλάζει κατά την διάρκεια της νύχτας ή κατά την διάρκεια των εποχών τότε η πυκνότητα ισχύος θα πρέπει να υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε κλάση.

- **Annual Energy Consumption Indicator (AECI):** Προκειμένου να μπορεί να γίνει η σύγκριση της καταναλισκόμενης ενέργειας μεταξύ δυο διαφορετικών διατάξεων (και όχι μόνο για μια συγκεκριμένη κλάση οδοφωτισμού) για ένα χρόνο λειτουργίας είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του δείκτη  $D_e$  (Δείκτης Ετήσιας Κατανάλωσης). Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να χωριστεί το έτος σε ξεχωριστές λειτουργικές περιόδους, όπου η τιμή της συνολικής ισχύος  $P$  είναι διαφορετική. Ο δείκτης  $D_e$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και μετράται σε  $Wh/m^2$ .

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

Όπου,  $P_j$  είναι η συνολική ισχύς του συστήματος την περίοδο  $j$  λειτουργίας (σε W),  $t_j$  η διάρκεια της περιόδου  $j$  όπου καταναλώνεται ισχύς  $P_j$  (σε ώρες),  $A$  το εμβαδόν φωτιζόμενης επιφάνειας ( $m^2$ ) και  $m$  ο αριθμός των συνολικών χρονικών περιόδων. Το συνολικό άθροισμα των ωρών του  $t_j$  θα πρέπει να ισούται με το άθροισμα των ωρών ενός χρόνου. Τέλος, οι χρονικές περίοδοι όπου τα φωτιστικά είναι ανενεργά θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν (κατά την διάρκεια της μέρας), διότι το σύστημα καταναλώνει ενέργεια και σε κατάσταση αναμονής.

- **Installation luminous efficacy:** Η αποδοτικότητα φωτεινής εγκατάστασης εκφράζει την ελάχιστη φωτεινή ροή που απαιτείται για το ελάχιστο επίπεδο φωτεινότητας προς την συνολική μέση ισχύ κατανάλωσης της εγκατάστασης φωτισμού. Υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\eta_{ist} = C_L \cdot f_m \cdot U \cdot R_{LO} \cdot \eta_{LS} \cdot \eta_P$$

Όπου:

- $\eta_{ist}$ , είναι η αποδοτικότητα φωτεινής εγκατάστασης και μετράται σε lm/W.
  - $C_L$ , είναι ο συντελεστής διόρθωσης (Correction Factor) για την λαμπρότητα ή ημισφαιρική ένταση φωτισμού βάση των σχεδίων φωτισμού.
  - $f_m$ , συντελεστής συντήρησης.
  - $U$ , ο λόγος της φωτεινής ροής που φτάνει στην φωτιζόμενη επιφάνεια προς την συνολική φωτεινή ροή των φωτιστικών.
  - $R_{LO}$ , η οπτική απόδοση των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση.
  - $\eta_{LS}$ , η οπτική απόδοση των φωτεινών πηγών που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση.
  - $\eta_P$ , η ενεργειακή απόδοση των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται στην φωτεινή εγκατάσταση.
  - Στα φωτιστικά LED πολλές φορές δεν είναι διαθέσιμες οι τιμές των  $R_{LO}$ ,  $\eta_{LS}$ ,  $\eta_P$  οπότε αντικαθίσταται από την συνολική απόδοση του φωτιστικού.
- **Correction Factor:** Σε περίπτωση που η ελάχιστη απαίτηση για φωτισμό ενός δρόμου εκφράζεται σε τιμή λαμπρότητας, η ικανότητα της εγκατάστασης οδοφωτισμού να παράξει λαμπρότητα μπορεί να είναι σχετικά χαμηλή ή υψηλή ανάλογα με τον συντελεστή λαμπρότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος  $Q_0$ , όταν η τιμή του παρεκκλίνει από την υποθετική τιμή των  $0,07 \frac{cd}{lx \cdot m^2}$  ή εξαιτίας συγκεκριμένης κατεύθυνσης της έντασης φωτισμού. Ο συντελεστής διόρθωσης που αντιστοιχεί στους δύο παράγοντες υπολογίζεται από τον τύπο :

$$C_L = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{E}_{i,min} \cdot A_i}{\Phi_A}$$

όπου:

$\bar{E}_{i,min}$ , είναι η μέση ελάχιστη απαιτούμενη ένταση φωτισμού της περιοχής

i.

$A_i$ , το εμβαδόν της υποπεριοχής όπου φωτίζεται.

$\Phi_A$ , η φωτεινή ροή που φτάνει στην φωτιζόμενη επιφάνεια.

$n$ , ο αριθμός των φωτιζόμενων υποπεριοχών.

Σε μία περιοχή όπου το κριτήριο σχεδίασης της εγκατάστασης είναι η ελάχιστη φωτεινή λαμπρότητα  $\bar{L}_{i,min}$ , η τιμή της μέσης ελάχιστης προκύπτουσας έντασης φωτισμού (που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης) υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\bar{E}_{i,min} = \bar{L}_{i,min} / 0,07$$



- **Utilance:** Ορίζεται ως ο λόγος της φωτεινής ροής που φτάνει στην φωτιζόμενη επιφάνεια προς την συνολική φωτεινή ροή των φωτιστικών και προκύπτει από την εξίσωση:

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

όπου,

$\Phi_A$ , η φωτεινή ροή που φτάνει στην φωτιζόμενη επιφάνεια.

$\Phi_{ls}$ , η φωτεινή ροή που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή.

$R_{LO}$ , η οπτική απόδοση των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση.

$n$ , ο αριθμός των φωτιστικών της εγκατάστασης.

Στους παρακάτω υπολογισμούς επειδή ο υπολογισμός γίνεται για ένα φωτιστικό κάθε φορά ο λόγος του Utilance είναι ίσος με τον *Utilization Factor* του φωτιστικού. Ως *Utilization Factor* ορίζεται ο λόγος της φωτεινής ροής που φτάνει στην φωτιζόμενη επιφάνεια προς την συνολική φωτεινή ροή του φωτιστικού και ορίζεται από την σχέση :

$$UF = \frac{\Phi_A}{\Phi_{ls}}$$

- **Power efficiency:** Η απόδοση του φωτιστικού ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της καταναλισκόμενης ισχύς των λαμπτήρων και της ισχύς του φωτιστικού.

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

όπου,

$P_{ls}$ , η καταναλισκόμενη ισχύς των λαμπτήρων σε W.

$P$ , η καταναλισκόμενη ισχύς του φωτιστικού σε W.

Στα φωτιστικά LED πολλές φορές δεν είναι διαθέσιμες οι τιμή του  $P_{ls}$  και έτσι αντικαθίσταται από την συνολική απόδοση του φωτιστικού.

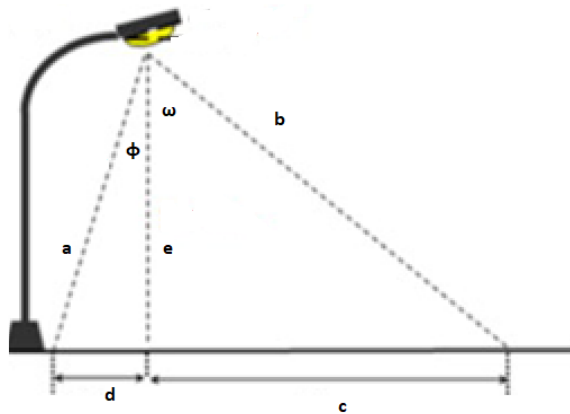
- **Παρουσίαση κατηγοριών φωτεινής έντασης**

Σε μερικές περιπτώσεις είναι απαραίτητο να μειωθεί η θάμβωση ανικανότητας σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού, όπου ο δείκτης TI δεν μπορεί να υπολογιστεί, όποτε παρέχεται η δυνατότητα στον μελετητή να στραφεί στις κατηγορίες φωτεινής έντασης προκειμένου να ελέγξει τις τιμές της θάμβωσης. Οι κατηγορίες φωτεινής έντασης G\* ορίζονται ως ο λόγος της φωτεινής έντασης προς όλες τις κατευθύνσεις ενός φωτιστικού (cd), προς την συνολική φωτεινή ροή του φωτιστικού. Επίσης σύμφωνα με το ΕΛΟΤ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον περιορισμό του ενοχλητικού φωτισμού.

Πίνακας 7.3 Πίνακας κατηγοριών φωτεινής έντασης

Class	Μέγιστη ένταση φωτισμού σε κατευθύνσεις κάτω από τον ορίζοντα σε cd/klm της συνολικής φωτεινής ροής του φωτιστικού			Επιπλέον Προϋποθέσεις
	70° και άνω	80° και άνω	90° και άνω	
G*1		200	50	
G*2		150	30	
G*3		100	20	
G*4	500	100	10	φωτεινή ένταση πάνω από 95° ίση με 0
G*5	350	100	10	φωτεινή ένταση πάνω από 95° ίση με 0
G*6	350	100	0	φωτεινή ένταση πάνω από 90° ίση με 0

- Υπολογισμός της φωτεινής ροής  $\Phi_A$ :** Η φωτεινή ροή που προσπίπτει στο οδόστρωμα  $\Phi_A$  είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για τον υπολογισμό των δεικτών, αλλά ταυτόχρονα αποτελεί και ένα κριτήριο σύγκρισης των σεναρίων. Γι' αυτό το λόγο υπολογίστηκε με την βοήθεια του λογισμικού Oxytech για κάθε σενάριο η φωτεινή ροή  $\Phi_A$ . Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι στο σενάριο της φωτορύπανσης κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός της φωτεινής ροής που προσπίπτει στο οδόστρωμα για κάθε τύπο φωτιστικού. Το Oxytech, λοιπόν παρείχε δυο πίνακες για κάθε φωτιστικό, οι οποίοι παρουσιάζονται στο παράρτημα Α. Οι δυο πίνακες αντιστοιχούν τιμές γωνιών με ποσοστό φωτεινής έντασης που προσπίπτει στο οδόστρωμα.



Εικόνα 7.1 Γωνίες υπολογισμού φωτεινής ροής  $\Phi_A$

Για κάθε φωτιστικό, τώρα υπολογίστηκε μέσω της σχέσης της αντίστροφης της εφαπτομένης ( $\arctan(c/e) = \omega$ ) η γωνία  $\omega$  που φαίνεται στην εικόνα 7.1 και στην συνέχεια αναζητώντας την τιμή της γωνίας στον πίνακα του λογισμικού Oxytech υπολογίστηκε το ποσοστό της φωτεινής ροής που προσπίπτει στο οδόστρωμα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον υπολογισμό της γωνίας  $\phi$  ( $\arctan(d/e) = \phi$ ) και επομένως και της φωτεινής ροής που προσπίπτει στο μικρότερο τμήμα του οδοστρώματος. Τελικά, η συνολική φωτεινή ροή που προσπίπτει στο οδόστρωμα είναι το άθροισμα των δυο παραπάνω φωτεινών ροών. Στην εικόνα 7.1 το άθροισμα των  $c$  και  $d$  είναι ίσο με το πλάτος του οδοστρώματος, ενώ το  $e$  ίσο με το ύψος τοποθέτησης του φωτεινού σημείου.

### 7.3.3 Υπολογισμός συντελεστή συντήρησης.

Σε κάθε μελέτη φωτισμού θα πρέπει να συνοπολογίζεται ο εκάστοτε συντελεστής συντήρησης (Maintenance Factor – MF) της εγκατάστασης. Η τιμή του συντελεστή συντήρησης επηρεάζει άμεσα τα υπολογιζόμενα μεγέθη, την εγκατεστημένη ισχύ και κατ' επέκταση την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ως συντελεστής συντήρησης ορίζεται ο λόγος της λαμπρότητας ή της έντασης φωτισμού που επιτυγχάνεται από ένα σύστημα φωτισμού μετά από ένα σαφώς ορισμένο διάστημα λειτουργίας, προς την λαμπρότητα ή την ένταση φωτισμού αντίστοιχα που επιτυγχάνεται από το σύστημα κατά την πρώτη ημέρα λειτουργίας.

Ο συντελεστής συντήρησης ορίζεται ως εξής:

$$MF = \frac{E_m}{E_{in}}$$

$E_m$ : Λαμπρότητα ή ένταση φωτισμού μετά από σαφώς ορισμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας.

$E_{in}$ : Λαμπρότητα ή ένταση φωτισμού την πρώτη ημέρα λειτουργίας.

Ο υπολογισμός του συντελεστή συντήρησης, όπως ορίστηκε ανωτέρω, αφορά σε δεδομένο και σαφώς ορισμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια ακριβώς εγκατάσταση υπολογίζεται διαφορετικός συντελεστής συντήρησης για χρονικό διάστημα π.χ. ενός έτους ή τριών ετών λειτουργίας.

Ο συντελεστής συντήρησης υπολογίζεται ως γινόμενο τεσσάρων επιμέρους συντελεστών σύμφωνα με την οδηγία CIE 154:2003 ή με την εκάστοτε νεότερη έκδοση σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF \times SMF$$

**LLMF – Lamp Lumen Maintenance Factor:** Συντελεστής συντήρησης φωτεινής ροής φωτεινών πηγών: Αφορά στην απομείωση φωτεινής ροής των πηγών φωτισμού με την πάροδο των ωρών λειτουργίας. Υπολογίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε πηγής φωτισμού. Ιδιαίτερα για τις πηγές LED ο συντελεστής υπολογίζεται από τα παρεχόμενα στοιχεία του κατασκευαστή της φωτεινής πηγής LED σύμφωνα με τα πρότυπα IES-LM-80 και IES-TM-21 .

**LSF – Lamp Survival Factor:** Συντελεστής επιβίωσης φωτεινών πηγών: Αφορά το δείκτη αστοχίας των φωτεινών πηγών. Τα στοιχεία παρέχονται από τον κατασκευαστή των πηγών φωτισμού.

**LMF – Luminaire Maintenance Factor:** Συντελεστής συντήρησης φωτιστικού σώματος: Αφορά στην απομείωση της απόδοσης του φωτιστικού σώματος, όσον αφορά τα οπτικά μέρη (ανακλαστήρας, φακοί, διαφανή καλύμματα κ.λπ.). Ο δείκτης απομείωσης υπολογίζεται σε συνδυασμό με τον δείκτη προστασίας IP του φωτιστικού σώματος και δίνεται από τους αντίστοιχους πίνακες της Τεχνικής Έκθεσης CIE 154:2003.

**SMF – Surface Maintenance Factor:** Συντελεστής συντήρησης επιφανειών: Αφορά στην απομείωση των ανακλαστικών ιδιοτήτων των επιφανειών της εγκατάστασης με την πάροδο του χρόνου. Αφορά σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους που περιλαμβάνουν επιφάνειες όπως σήραγγες, υπόγειες διαβάσεις κ.λπ. Στις μελέτες οδοφωτισμού, ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ίσος με 1.

## 7.4 Οικονομικότερη υλοποίηση με βάση τους δείκτες Dp,De.

### 7.4.1 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο E1

Στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε η οικονομικότερη εγκατάσταση φωτισμού για τους τυπικούς καννάβους E1 και B5. Πρακτικά ο στόχος αυτού του σεναρίου είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου φωτιστικού που ικανοποιεί τις απαιτήσεις των κλάσεων του προτύπου EN13201 (κεφάλαιο 7.3.1), με την μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Οι δείκτες Dp και De, όπως παρουσιάστηκαν, είναι ανάλογοι της συνολικής ισχύς της εγκατάστασης, επομένως χαμηλές τιμές των παραπάνω δεικτών οδηγούν στην υλοποίηση μιας εγκατάστασης χαμηλής κατανάλωσης. Με αυτό τον στόχο επιτυγχάνεται σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας της εγκατάστασης, άρα και του κόστους κατανάλωσης, χωρίς όμως να μειώνονται οι τιμές των ποιοτικών και ποσοτικών δεικτών αξιολόγησης μιας εγκατάστασης κάτω από τα όρια που ορίστηκαν στο κεφάλαιο 7.3.1. για κάθε κλάση. Με βάση τα παραπάνω λοιπόν, θα πρέπει να επιλεγεί ένα ενεργειακά αποδοτικό φωτιστικό, που παράλληλα κατανέμει μεγάλο μέρος της φωτεινής ροής του στο οδόστρωμα. Η επιλογή ενός φωτιστικού που φωτίζει κυρίως στο οδόστρωμα είναι σημαντική, καθώς αν χάνεται μέρος της φωτεινής ροής και καταλήγει στον περιβάλλοντα χώρο ο μελετητής θα αναγκαστεί να χρησιμοποιήσει φωτιστικά μεγαλύτερης κατανάλωσης και άρα περισσότερων διαθέσιμων lumen.

Στο παρόν κεφάλαιο θα αξιολογηθεί μια εγκατάσταση οδοφωτισμού, η οποία χαρακτηρίζεται για την πολύ χαμηλή της κατανάλωση και για την υψηλή αποδοτικότητα της. Η προτεινόμενη εγκατάσταση σε πρώτο στάδιο θα εφαρμοστεί σε κάρναβο κατηγορίας E1 και θα υλοποιηθεί για δυο θερμοκρασίες χρώματος 3000K και 4000K. Έτσι επιλέχθηκαν φωτιστικά με την μικρότερη δυνατή κατανάλωση που όμως ικανοποιούν και τα κριτήρια του EN 13201.

Πιο συγκεκριμένα για τον τυπικό κάρναβο E1 ο τρόπος τοποθέτησης των φωτιστικών φαίνεται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

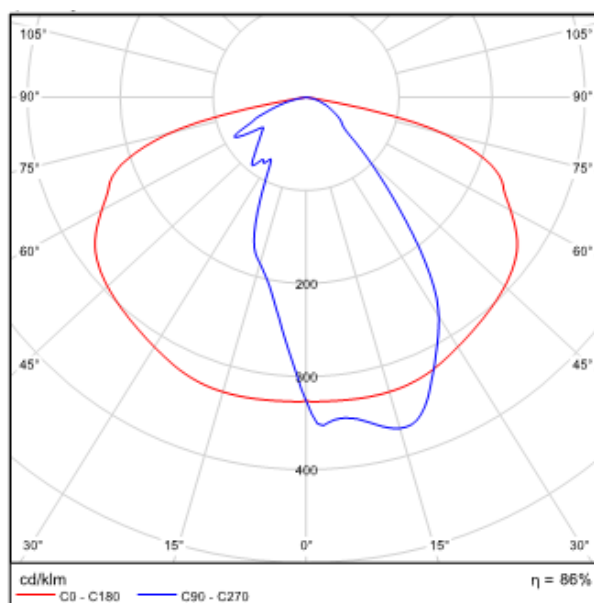
<i>Απόσταση Ιστών (m) :</i>	40
<i>Ύψος Σημείου Φωτός (m) :</i>	12
<i>Κλίση :</i>	0°
<i>Προεξοχή Φωτεινού Σημείου (m) :</i>	1,5
<i>Απόσταση Ιστός - Οδόστρωμα (m):</i>	0,5
<i>Κλάση :</i>	M2

Στην συγκεκριμένη εγκατάσταση, όπως και σε όλες τις επόμενες, το φωτιστικό που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση των 3000K και των 4000K θα έχει το ίδιο πολικό διάγραμμα αλλά θα είναι διαφορετικής κατανάλωσης. Η διαπίστωση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι πρώτα εξετάζεται το πολικό διάγραμμα όλων των διαθέσιμων φωτιστικών, με στόχο την επιλογή του καταλληλότερου για κάθε σενάριο και στην συνέχεια επιλέγεται η αναγκαία κατανάλωση για την εκάστοτε γεωμετρία του οδοστρώματος. Προφανώς, η υλοποίηση των 3000K απαιτεί φωτιστικά μεγαλύτερης κατανάλωσης από τα αντίστοιχα των 4000K, καθώς τα φωτιστικά LED έχουν υψηλότερη απόδοση σε θερμοκρασία χρώματος 4000K.

Στον πίνακα 7.5 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των φωτιστικών που χρησιμοποιήθηκαν για την εγκατάσταση οδοφωτισμού σε κάρναβο E1. Στην πρώτη στήλη απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του φωτιστικού τύπου I που χρησιμοποιήθηκε για την εγκατάσταση των 4000K και στην δεύτερη στήλη τα χαρακτηριστικά του φωτιστικού για την αντίστοιχη των 3000K. Επιπλέον στην εικόνα 7.2 απεικονίζεται το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού.

Πίνακας 7.5 Χαρακτηριστικά φωτιστικού Τύπου I και Τύπου II

Φωτιστικό	Τύπου I	Τύπου II
Φωτεινή ροή πηγής LED (lm):	25018	25050
Φωτεινή ροή φωτιστικού (lm):	21540	21567
Βαθμός απόδοσης Λειτουργίας ( $R_{LO}$ ):	86,2%	86,1%
Ισχύς (W):	152	185
Απόδοση φωτεινής πηγής (lm/W) :	141,7	116,6
Θερμοκρασία :	4000K	3000K



Εικόνα 7.2 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου I/II

### 7.4.1.1 Επεξεργασία και αποτελέσματα δεδομένων στον τυπικό κάρναβο E1

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση των παραπάνω φωτιστικών, μετά από προσομοίωση στο πρόγραμμα Dialux φαίνονται στον πίνακα 7.6. Ο δείκτης De προέκυψε για 4000 ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης [2],[3],[4] .

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Φωτιστικό :	Τύπου I	Τύπου II
Θερμοκρασία (K):	4000	3000
Lm (cd/m <sup>2</sup> )	1,53	1,53
Uo	0,47	0,47
Ul	0,74	0,74
TI	10	10
EIR	0,51	0,51
Κατανάλωση :		
Ισχύς / χλμ (W/km) :	7600	9250
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	1216	1480
De (kWh/m <sup>2</sup> έτος):	1,45	1,76
Dp (W/lx m <sup>2</sup> ) :	0,015	0,018
Κατηγορία φωτεινής έντασης:	G2	G2

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του εβδόμου κεφαλαίου όπως έχει ήδη αναλυθεί.:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot LSF = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,81$$

LLMF (Lamp Lumen Maintenance Factor) = 0,9. Και οι δύο φωτεινές πηγές LED έχουν τον ίδιο συντελεστή συντήρησης σύμφωνα με τον κατασκευαστή καθώς χρησιμοποιούν και οι δυο drivers των 500mA. (0,9 @ 100.000 h @ Tq = 25°C).

LMF (Luminaire Maintenance Factor) = 0,9. Κοινός και αυτός ο συντελεστής για τα δύο φωτιστικά, καθώς από τον κατασκευαστή χαρακτηρίζονται ως IP 66, ενώ από την έκθεση της CIE για τους συντελεστές συντήρησης των φωτιστικών θεωρούμε και για τα δύο κανονική ρύπανση και κύκλο καθαρισμού 3 χρόνων.

LSF (Lamp Survival Factor) = 1. Ο αριθμός των σφαλμάτων των LED θεωρείται ίσος με 0 – 0,005 κατά την διάρκεια λειτουργίας τους γι' αυτό και επιλέχθηκε να είναι ίσος με την μονάδα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε ο συντελεστής συντήρησης και για τα δύο φωτιστικά είναι κοινός και ίσος με 0,9, γεγονός που διευκολύνει την σύγκριση των δυο υλοποιήσεων, καθώς ο τελικός συντελεστής συντήρησης και για τα δυο φωτιστικά είναι ίσος με 0,81.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι υπόλοιποι δείκτες (Φ<sub>A</sub>, CL, U, Np) όπως περιγράφονται στην ενότητα 7.3 όπου για την εύρεση της συνολικής φωτεινής ροής του φωτιστικού που προσπίπτει στην φωτιζόμενη επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Oxytech. Πρώτα, λοιπόν, υπολογίστηκε ο δείκτης Φ<sub>A</sub> με την διαδικασία που περιεγράφηκε στην ενότητα 7.3, στην συνέχεια υπολογίστηκε ο δείκτης Correction Factor και ο δείκτης Utilance (=UF δείκτης χρησιμοποίησης),

προκείμενου στο τέλος να προκύψει ο τελικός συντελεστής αποδοτικότητας της εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.7.

Πίνακας 7.7 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Φωτιστικό :	Τύπου I	Τύπου II
Θερμοκρασία (K):	4000	3000
$\Phi_a (Lm) =$	11612	11626
$CL =$	0,775	0,775
$U =$	0,539	0,539
$Np =$	0,926	0,630
$Ninst (Lm/W) =$	40,999	21,3868

#### 7.4.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Δεδομένου πως ο στόχος σε αυτό το σενάριο ήταν η ελαχιστοποίηση της εγκατεστημένης ισχύος και κατά συνέπεια της καταναλισκόμενης ενέργειας, αυτό επετεύχθη, αφού από τις 84 περιπτώσεις που εξετάστηκαν, παρουσιάζονται οι πιο αποδοτικές ως προς τον παραπάνω στόχο, δηλαδή αυτές με ελάχιστους δείκτες  $D_p$ ,  $D_e$ . Έτσι η εγκατάσταση οδοφωτισμού που παρουσιάζεται, χαρακτηρίζεται από την χαμηλή της κατανάλωση, αλλά και για την υψηλή τιμή του δείκτη αποδοτικότητας της. Μια τέτοια εγκατάσταση είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα από οικονομικής άποψης, καθώς το ετήσιο κόστος κατανάλωσης είναι χαμηλό όπως θα αποδειχθεί και στην συνέχεια του κεφαλαίου. Επίσης, με μια πρώτη διαπίστωση μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι η υλοποίηση με θερμοκρασία χρώματος 3000K καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, εξαιτίας της χαμηλότερης ενεργειακής αποδοτικότητας του φωτιστικού από το αντίστοιχο που χρησιμοποιήθηκε για 4000K.

Πριν όμως σχολιαστεί η διαφορά κατανάλωσης των δυο υλοποιήσεων μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα εξετάζοντας το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού που χρησιμοποιήθηκε. Πιο συγκεκριμένα το φωτιστικό Τύπου I κατανέμει μεγάλες τιμές φωτεινής έντασης στο επίπεδο C0-C180 φωτίζοντας κατά μήκος του οδοστρώματος σε ένα μικρό εύρος γωνιών από -45 έως 45 μοίρες. Επίσης, εξετάζοντας και το επίπεδο C90-C270 το σύνολο της φωτεινής ροής προσπίπτει στο οδόστρωμα με τιμές φωτεινής έντασης πάνω από 300cd/klm.

Εξετάζοντας τώρα τους δείκτες  $D_p$  και  $D_e$  των δυο εγκαταστάσεων μπορεί να επιβεβαιωθεί η αύξηση της κατανάλωσης στην υλοποίηση των 3000K. Η υλοποίηση με θερμοκρασία χρώματος 4000K παρουσιάζεται αρκετά πιο αποδοτική σε σχέση με την αντίστοιχη των 3000K, διαφορά που εντοπίζεται και στους δείκτες  $D_p$  και  $D_e$ . Μάλιστα ο δείκτης  $D_p$  αυξήθηκε κατά σχεδόν 21,3% ενώ και ο  $D_e$  κατά 20%. Συνεπώς μεγαλύτερη κατανάλωση συνεπάγεται και με μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας κάτι που κάνει την εγκατάσταση των 3000K ακόμα πιο ασύμφορη. Σίγουρα, όπως έχει ήδη αναφερθεί μια εγκατάσταση οδοφωτισμού στα 3000K είναι καλύτερη για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, αλλά όπως φαίνεται δεν είναι το ίδιο αποδοτική από οικονομικής άποψης με την αντίστοιχη στα 4000K.



Επίσης, αυτή η διαφορά αποδοτικότητας μεταξύ των δυο υλοποιήσεων φαίνεται και στον δείκτη *Ninst*, όπου η υλοποίηση των 3000K επέφερε μείωση του κατά 47,99%. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στην χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητά του φωτιστικού *Τύπου II* που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση των 3000K. Πιο συγκεκριμένα ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης στην εγκατάσταση των 4000K ήταν ίσος με 0,926, ενώ στην αντίστοιχη των 3000K ήταν ίσος με 0,630.

Τέλος, θα μπορούσαν να σχολιαστούν και οι επιδόσεις των δυο προτεινόμενων εγκαταστάσεων στους τομείς της ολικής ομοιομορφίας και θάμβωσης. Η εγκατάσταση έχει ιδιαίτερα μικρές τιμές ολικής ομοιομορφίας, κάτι που οφείλεται κυρίως στην κατανομή της φωτεινής ροής των φωτιστικών, καθώς τα σημεία που βρίσκονται κάτω από το φωτιστικό φωτίζονται και από τα δυο επίπεδα του φωτιστικού με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλες τιμές λαμπρότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του οδοστρώματος. Αντίθετα, η κατά μήκος ομοιομορφία κρίνεται ικανοποιητική κυρίως εξαιτίας της κατανομής της φωτεινής ροής στο επίπεδο C0-C180.

#### 7.4.1.3 Τεχνοοικονομική μελέτη στον τυπικό κάρναβο E1

Για τον κάρναβο E1 πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική προσέγγιση τεχνοοικονομικής μελέτης όπου ενδεικτικά *επιλέχθηκαν μήκος οδοστρώματος 1 km και 4000 ώρες λειτουργίας*. Ο στόχος της παρακάτω μελέτης είναι η αξιολόγηση και η σύγκριση των δυο υλοποιήσεων και σε οικονομικό επίπεδο. Η τεχνοοικονομική μελέτη περιλαμβάνει το άθροισμα του κόστους εγκατάστασης και του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης.

Αρχικά για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης θεωρείται ότι η εγκατάσταση υπάρχει ήδη γι' αυτό και σε πρώτο στάδιο υπολογίζεται το κόστος τοποθέτησης των φωτιστικών και η αγορά τους. Το κόστος τοποθέτησης θεωρείται σε όλες τις περιπτώσεις ίσο με 30.

Πίνακας 7.8 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

<i>Φωτιστικό</i>	<i>Πλήθος</i>	<i>Τιμή/μονάδα</i>	<i>Τελικό κόστος</i>
<i>Τύπου I</i>	50	615	30750
<i>Τύπου II</i>	50	615	30750
<i>Κόστος Εγκατάστασης</i>	50	30	1500

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας αρχικά υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε ένα χρόνο και στην συνέχεια το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των *drivers*.

Πίνακας 7.9 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

	Τύπου I	Τύπου II
<i>Χρέωση Ενέργειας (€/kWh):</i>	0,14466	0,14466
<i>Πάγιο (€/year):</i>	6,36	6,36
<i>Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):</i>	30400	37000
<i>Κ Ενέργειας Ετήσιο (€) :</i>	4404,024	5358,78

Για το κόστος λειτουργίας θεωρείται ότι η βλάβη των drivers των 500mA, (που είναι κοινοί και για τις δύο υλοποιήσεις) στα πρώτα 5 χρόνια καλύπτεται από την εγγύηση και υπάρχει επιβάρυνση μόνο με έξοδα αντικατάστασης (30 €), ενώ μετά το πέρας της πενταετίας θα πρέπει να αγοραστούν καινούριοι όπου η αγορά τους κοστίζει 100€. Σε όλες τις περιπτώσεις που θα χρησιμοποιηθεί ίδιος driver των 500mA και χρησιμοποιείται ο κάναβος E1 το κόστος συντήρησης θα είναι κοινό. Έτσι και σε αυτήν την περίπτωση το κόστος των driver των δυο υλοποιήσεων θα είναι το ίδιο σε βάθος 10ετίας. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας των πολλών LED σε κάθε φωτιστικό θα χρησιμοποιηθούν δυο drivers για λόγους αξιοπιστίας.

Πίνακας 7.10 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

	Βλάβες στα 5 χρόνια		Βλάβες από 5 έως 10 χρόνια	
	Πλήθος	Κόστος (€)	Πλήθος	Κόστος (€)
Drivers	5	150	5	650

Τέλος, ο καθαρισμός κάθε φωτιστικού που βρίσκεται σε ύψος πάνω από 8m θα στοιχίσει 25€ και θα πρέπει να προστεθεί και αυτός στα λειτουργικά έξοδα.

Πίνακας 7.11 Ετήσιο κόστος καθαρισμού φωτιστικών στον κάναβο E1 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Καθαρισμός φωτιστικού άνω των 8m	25 €
Πλήθος Φωτιστικών	50
Τελικό Ετήσιο Κόστος	1.250 €

Όπως αναμενόταν η υλοποίηση των 3000K είναι αρκετά πιο δαπανηρή από την αντίστοιχη των 4000K, καθώς σε ετήσια βάση επιβαρύνεται ο χρήστης με 954,755Ευρώ. Η παραπάνω διαφορά προέκυψε από την αυξημένη ετήσια κατανάλωση από 30400kWh τον χρόνο στην υλοποίηση θερμοκρασίας 4000K σε 37000kWh στην αντίστοιχη θερμοκρασίας 3000K.

#### 7.4.2 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο B5

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και τώρα για τον κάρναβο B5 επιλέχθηκαν τα κατάλληλα φωτιστικά με στόχο την υλοποίηση μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού με ελάχιστη δυνατή κατανάλωση, που παράλληλα ικανοποιεί τα κριτήρια της κλάσης του ενδεικτικού κάρναβου B5. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε το κατάλληλο φωτιστικό και εξετάστηκαν δυο υλοποιήσεις μία για θερμοκρασία χρώματος 4000K και μία για 3000K.

Πιο συγκεκριμένα για τον τυπικό κάρναβο B5 ο τρόπος τοποθέτησης των φωτιστικών φαίνεται στον Πίνακα 7.12.

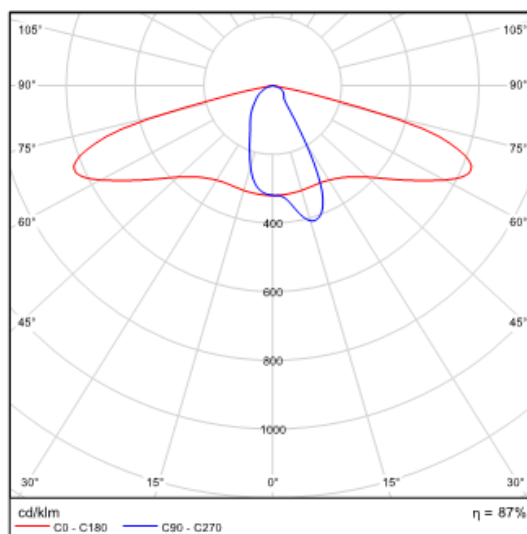
Πίνακας 7.12 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο B5

<i>Απόσταση Ιστών (m) :</i>	35
<i>Ύψος Σημείου Φωτός (m) :</i>	12,5
<i>Κλίση :</i>	0°
<i>Προεξοχή Φωτεινού Σημείου (m) :</i>	1,5
<i>Απόσταση Ιστός - Οδόστρωμα (m):</i>	1
<i>Κλάση :</i>	M3

Στο κάρναβο B5 χρησιμοποιήθηκε για τις δυο υλοποιήσεις των 3000K και 4000K το ίδιο φωτιστικό και το πολικό του διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 7.3. Παρόλα αυτά, η ενεργειακή απόδοση του φωτιστικού κάθε εγκατάστασης είναι διαφορετική και παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 7.13. Η διαφορετική θερμοκρασία χρώματος κάθε φωτιστικού είχε ως αποτέλεσμα επιπτώσεις στην ενεργειακή απόδοση των φωτιστικών όπως αναμενόταν.

Πίνακας 7.13 Χαρακτηριστικά φωτιστικού Τύπου III και Τύπου IV

Φωτιστικό	Τύπου III	Τύπου IV
<i>Φωτεινή ροή πηγής LED (lm):</i>	11000	10795
<i>Φωτεινή ροή φωτιστικού (lm):</i>	9252	9080
<i>Βαθμός Απόδοσης Λειτουργίας (R<sub>LO</sub>):</i>	86,73%	84,11%
<i>Ισχύς (W):</i>	64	76
<i>Απόδοση φωτεινής πηγής (lm/W) :</i>	144,6	119,5
<i>Θερμοκρασία :</i>	4000K	3000K



Εικόνα 7.3 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου III/IV

#### 7.4.2.1 Επεξεργασία και αποτελέσματα δεδομένων στον τυπικό κάρναβο B5

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση των παραπάνω φωτιστικών, μετά από προσομοίωση στο πρόγραμμα Dialux φαίνονται στον πίνακα 7.14. Ο δείκτης De προέκυψε για 4000 ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πίνακας 7.14 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Φωτιστικό :	Τύπου III	Τύπου IV
Θερμοκρασία (K):	4000	3000
Lm (cd/m <sup>2</sup> )	1,01	1
U <sub>o</sub>	0,57	0,57
U <sub>l</sub>	0,79	0,79
TI	7	7
EIR	0,33	0,33
Κατανάλωση :		
Ισχύς / χλμ (W/km) :	1856	2204
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	256	304
De (kWh/m <sup>2</sup> έτος):	0,975	1,16
Dp (W/lx m <sup>2</sup> ) :	0,019	0,023
Κατηγορία φωτεινής έντασης:	G*3	G*3

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του εβδομού κεφαλαίου όπως έχει ήδη αναλυθεί.:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot LSF = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,81$$

LLMF (Lamp Lumen Maintenance Factor) = 0,9. Και οι δύο φωτεινές πηγές LED έχουν τον ίδιο συντελεστή συντήρησης σύμφωνα με τον κατασκευαστή, καθώς χρησιμοποιούν drivers των 350mA. (0,9 @ 100.000 h @ Tq = 25°C).

LMF (Luminaire Maintenance Factor) = 0,9. Κοινός και αυτός ο συντελεστής για τα δύο φωτιστικά, καθώς από τον κατασκευαστή χαρακτηρίζονται ως IP 66, ενώ από την έκθεση της CIE για τους συντελεστές συντήρησης των φωτιστικών θεωρούμε και για τα δύο κανονική ρύπανση και κύκλο καθαρισμού 3 χρόνων.

LSF (Lamp Survival Factor) = 1. Ο αριθμός των σφαλμάτων των LED θεωρείται ίσος με 0 – 0,005 κατά την διάρκεια λειτουργίας τους γι' αυτό και επιλέχθηκε να είναι ίσος με την μονάδα.

Ο συντελεστής συντήρησης για τα δύο φωτιστικά είναι κοινός, όπως προέκυψε από τους παραπάνω υπολογισμούς.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι υπόλοιποι δείκτες (CL,U,Np,Ninst) όπως περιγράφονται στην ενότητα 7.3 όπου για την εύρεση της συνολικής φωτεινής ροής του φωτιστικού που προσπίπτει στην φωτιζόμενη επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Oxytech. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.15.

Πίνακας 7.15 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο Β5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Φωτιστικό :	Τύπου III	Τύπου IV
Θερμοκρασία (K):	4000	3000
$\Phi_A$ (Lm) =	4452	4369
CL =	0,842	0,858
U =	0,481	0,481
Np =	2,254	1,572
Ninst (Lm/W) =	83,851	51,485

#### 7.4.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Αρχικά, πρέπει να τονισθεί ότι ύστερα από την εξέταση των 84 διαφορετικών περιπτώσεων παρουσιάζονται οι δυο υλοποιήσεις που ελαχιστοποιούν την εγκατεστημένη ισχύ και συνεπώς τους δείκτες  $D_p$ ,  $D_e$ . Έτσι η εγκατάσταση που υλοποιήθηκε χαρακτηρίζεται από την χαμηλή ενεργειακή της κατανάλωση, αλλά και από την υψηλή αποδοτικότητά της, κάτι που φαίνεται εξετάζοντας αρχικά τον δείκτη ισχύς/km και στην συνέχεια τον δείκτη αποδοτικότητας της εγκατάστασης. Η υλοποίηση μιας αποδοτικής εγκατάστασης επιτρέπει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και συνεπώς έχει ένα μειωμένο κόστος κατανάλωσης όπως θα αποδειχθεί και στο κεφάλαιο 7.4.2.3.

Παρόλα αυτά, όπως και στην περίπτωση του τυπικού καννάβου E1 έτσι και τώρα η προτεινόμενη εγκατάσταση με θερμοκρασία χρώματος 4000K είναι πιο αποδοτική σε σχέση με την αντίστοιχη των 3000K. Αυτό αποτυπώνεται ξεκάθαρα στον δείκτη  $N_{inst} (lm/W)$ , καθώς στην περίπτωση των 4000K είναι ίσος με 83,851lm/W, ενώ στα 3000K είναι ίσος με 51,485lm/W. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον δείκτη  $N_{inst}$  μπορούν να συγκριθούν και να αξιολογηθούν καθώς χρησιμοποιείται το ίδιο φωτιστικό απλά με διαφορετική θερμοκρασία χρώματος. Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος, που οι δείκτες Utilance και Correction Factor έχουν ίδιες τιμές σε κάθε περίπτωση καθώς εξαρτώνται από την φωτεινή ροή κάθε φωτιστικού που προσπίπτει στην φωτιζόμενη επιφάνεια ( $\Phi_A$ ), η οποία με την σειρά της καθορίζεται από το πολικό διάγραμμα και την τοποθέτηση του φωτιστικού.

Στο ίδιο συμπέρασμα μπορούμε να καταλήξουμε εξετάζοντας και τα αποτελέσματα των δεικτών  $D_p$  και  $D_e$ , όπου είναι εμφανώς αυξημένοι στην περίπτωση των 3000K. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης  $D_p$  αυξήθηκε κατά 21,05% ,ενώ ο δείκτης  $D_e$  κατά 20% με αποτέλεσμα η εγκατάσταση των 3000K να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, κάτι που συνεπάγεται και μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας. Όπως τονίστηκε και στον καννάβο E1 από οικονομικής άποψης η εγκατάσταση των 4000K είναι προτιμότερη, ενώ η αντίστοιχη με θερμοκρασία χρώματος εξυπηρετεί κυρίως οικολογικούς στόχους.

Τέλος, η μεγάλη διαφορά στην αποδοτικότητα των προτεινόμενων εγκαταστάσεων μεταξύ των δύο τύπων καννάβων (E1 και B5) που παρατηρείται, οφείλεται κυρίως στον δείκτη ενεργειακής απόδοσης  $N_p$ , ο οποίος επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη  $N_{inst}$ . Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί, ότι όσο μεγαλύτερης κατανάλωσης είναι το φωτιστικό τόσο μικρότερος είναι ο δείκτης ενεργειακής του απόδοσης. Έτσι στην περίπτωση του καννάβου B5 που χρησιμοποιούνται φωτιστικά μικρότερης κατανάλωσης σε σχέση με τους E1, ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης είναι υψηλότερος επηρεάζοντας προς τα πάνω και τον δείκτη  $N_{inst}$  της εγκατάστασης. Θα πρέπει όμως να τονιστεί, ότι οι εγκαταστάσεις οδοφωτισμού στους δυο διαφορετικούς καννάβους δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους καθώς έχουν τελείως διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

### 7.4.2.3 Τεχνοοικονομική μελέτη στον τυπικό κάρναβο Β5

Για τον κάρναβο Β5 πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική τεχνοοικονομική μελέτη, όπου ενδεικτικά επιλέχθηκαν μήκος οδοστρώματος 1 km και 4000 ώρες λειτουργίας. Ο στόχος της παρακάτω μελέτης είναι η αξιολόγηση και η σύγκριση των δυο υλοποιήσεων και σε οικονομικό επίπεδο. Η τεχνοοικονομική μελέτη περιλαμβάνει το άθροισμα του κόστους εγκατάστασης και του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης.

Αρχικά για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης θεωρείται ότι η εγκατάσταση υπάρχει ήδη γι' αυτό και σε πρώτο στάδιο υπολογίζεται το κόστος τοποθέτησης των φωτιστικών και η αγορά τους. Το κόστος τοποθέτησης θεωρείται σε όλες τις περιπτώσεις ίσο με 30€.

Πίνακας 7.16 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Φωτιστικό	Πλήθος	Τιμή(€) / μονάδα	Τελικό κόστος
Τύπου III	29	530	15370
Τύπου IV	29	530	15370
Κόστος Εγκατάστασης (€)	29	30	857

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας αρχικά υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε ένα χρόνο και στην συνέχεια το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των drivers.

Πίνακας 7.17 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

	Τύπου III	Τύπου IV
Χρέωση Ενέργειας (€/kWh):	0,14466	0,14466
Πάγιο (€/year):	6,36	6,36
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	7424	8932
Κ Ενέργειας Ετήσιο (€) :	1080,31	1298,46

Για το κόστος λειτουργίας θεωρείται ότι η βλάβη των drivers των 350mA, στα πρώτα 5 χρόνια καλύπτεται από την εγγύηση και υπάρχει επιβάρυνση μόνο με έξοδα αντικατάστασης (30 Ευρώ), ενώ μετά το πέρας της πενταετίας θα πρέπει να αγοραστούν καινούριοι όπου η αγορά τους κοστίζει 75Ευρώ. Σε όλες τις περιπτώσεις που θα χρησιμοποιηθεί ίδιος driver των 350mA και χρησιμοποιείται ο κάρναβος Β5 το κόστος συντήρησης θα είναι κοινό. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας των πολλών LED σε κάθε φωτιστικό θα χρησιμοποιηθούν δυο drivers για λόγους αξιοπιστίας.

Πίνακας 7.18 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

	Βλάβες στα 5 χρόνια		Βλάβες από 5 έως 10 χρόνια	
	Πλήθος	Κόστος (€)	Πλήθος	Κόστος (€)
Drivers 350mA	3	90	3	315

Τέλος, ο καθαρισμός κάθε φωτιστικού που βρίσκεται σε ύψος πάνω από 8m θα στοιχίσει 25€ και θα πρέπει να προστεθεί και αυτός στα λειτουργικά έξοδα.

Πίνακας 7.19 Ετήσιο κόστος καθαρισμού φωτιστικών στον κάναβο B5 σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης

Καθαρισμός φωτιστικού άνω των 8m	25 €
Πλήθος Φωτιστικών	29
Τελικό Ετήσιο Κόστος	714 €

Και σε αυτή την περίπτωση η υλοποίηση των 3000K είναι αρκετά πιο δαπανηρή από την αντίστοιχη των 4000K, καθώς σε ετήσια βάση η επιβάρυνση ανέρχεται σε 218Ευρω. Η παραπάνω διαφορά προέκυψε από την αυξημένη ετήσια κατανάλωση από 7424kWh τον χρόνο στην υλοποίηση θερμοκρασίας 4000K σε 8932kWh στην αντίστοιχη θερμοκρασίας 3000K. Τέλος, η διαφορά μπορεί να μην φαίνεται σημαντική αλλά θα πρέπει να τονιστεί ότι προκύπτει για ένα χιλιόμετρο εγκατάστασης, όποτε σε πραγματικές συνθήκες με δρόμους πολλών χιλιομέτρων η διαφορά αυξάνεται σημαντικά για κάθε χρόνο λειτουργίας.



## 7.5 Περιορισμός φωτορύπανσης

Βασικός στόχος του παρόντος σεναρίου ήταν ο περιορισμός της φωτορύπανσης, ενός φαινομένου που όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο έξι έχει σημαντικές επιπτώσεις τόσο στον άνθρωπο όσο και στην φύση. Στο σενάριο αυτό λοιπόν, επιλέχθηκαν τα κατάλληλα φωτιστικά με στόχο τον περιορισμό του φαινομένου. Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος θα πρέπει να περιοριστεί ο διαφεύγων φωτισμός της συνολικής εγκατάστασης στο ελάχιστο δυνατό, έτσι ώστε να μην κατευθύνονται τμήματα της φωτεινής ροής εκτός οδοστρώματος. Επιπλέον, στο κεφάλαιο έξι που παρουσιάστηκε το φαινόμενο της φωτορύπανσης τονίστηκε ότι οι εγκαταστάσεις οδοφωτισμού με θερμοκρασία χρώματος 4000K επιδεινώνουν το φαινόμενο και έτσι θα πρέπει να προτιμάται η θερμοκρασία χρώματος 3000K για την υλοποίησή τους. Αυτός είναι και ο λόγος που στο παρόν σενάριο εξετάστηκε υλοποίηση μόνο με θερμοκρασία χρώματος 3000K .

Για να βρεθεί το ιδανικό φωτιστικό που εκπληρώνει τις προϋποθέσεις του σεναρίου δεν χρησιμοποιήθηκε ο λόγος ULR (Upward Light Ratio), που υπολογίζεται από το λογισμικό Dialux, καθώς κρίθηκε ανεπαρκής. Πιο συγκεκριμένα ο λόγος ULR αφορά κυρίως την φωτεινή ροή που κατευθύνεται άμεσα στον ουρανό και εξαρτάται κυρίως από την κλίση του φωτιστικού. Όμως εξαιτίας της καλής κατασκευής των φωτιστικών, καθώς χρησιμοποιούν φακούς με αποδοτική κατανομή της φωτεινής ροής, αλλά και ορθού τρόπου τοποθέτησης τους (συνήθως 0°) η τιμή ULR υπολογίζεται από το Dialux ίση με το μηδέν.

Προκειμένου λοιπόν, να προκύψει το κατάλληλο φωτιστικό για το σενάριο υπολογίστηκε για κάθε τύπο φωτιστικού ο λόγος φωτεινής ροής που κατευθύνεται προς τα πάνω (Upward Flux Ratio UFR) και θεωρήθηκε αυτός ως βασικό κριτήριο επιλογής του φωτιστικού. Ο λόγος UFR λαμβάνει υπ' όψιν το σύνολο της φωτεινής ροής που κατευθύνεται στον ουρανό είτε αυτή προέρχεται απευθείας από το φωτιστικό, είτε μέσω αντανακλάσεων καθιστώντας έτσι ακριβέστερο από τον λόγο ULR. Οι αντανακλάσεις μπορούν να προκύψουν είτε από την φωτιζόμενη επιφάνεια είτε από τον περιβάλλοντα χώρο. Ο λόγος UFR προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$UFR = \left\{ 1 + \frac{ULOR}{P_{area} * \mu} + \frac{P_{surrounds}}{P_{area}} \left( \frac{DLOR - \mu}{\mu} \right) \right\} \cdot \frac{L_{av, initial}}{L_{av, maint}}$$

όπου:

$$ULOR \text{ (Upward Light Ratio)} = \frac{\text{Upward Lumen Output of Luminaire}}{\text{Total Lamp Lumen output}}$$

θεωρήθηκε για όλα τα φωτιστικά ίσο με το μηδέν.

$$DLOR \text{ (Downward Light Ratio)} = \frac{\text{Downward Lumen Output of Luminaire}}{\text{Total Lamp Lumen output}}$$

θεωρήθηκε για όλα τα φωτιστικά ίσο με ένα.

$$\mu \text{ (Maximum Utilization Factor)} = \frac{\Phi_A}{\Phi_{lum}} \text{ και } \frac{L_{av, initial}}{L_{av, maint}} = \frac{1}{MF}$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης υπολογίστηκε για κάθε φωτιστικό ξεχωριστά με την βοήθεια του λογισμικού Oxytech.

$P_{area}$ : Ο συντελεστής αντανάκλασης του οδοστρώματος θεωρήθηκε ίσος με 0,07.

$P_{surrounds}$ : Ο συντελεστής αντανάκλασης του περιβάλλοντα χώρου θεωρήθηκε ίσος με 0,05.

Σε κάθε υποεξέταση φωτιστικό, λοιπόν, εφαρμόστηκε ο παραπάνω τύπος και υπολογίστηκε ο λόγος UFR. Το φωτιστικό που είχε το μικρότερο UFR ήταν αυτό που είχε την λιγότερη φωτεινή ροή που κατευθύνεται εκτός οδοστρώματος και άρα αυτό που επιλέχθηκε τελικώς. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπήρξαν φωτιστικά που είχαν μικρότερο λόγο UFR από αυτά που επιλέχθηκαν αλλά δεν εκπλήρωναν τα κριτήρια του EN13201 γι' αυτό και δεν προτιμήθηκαν.

### 7.5.1.1 Σενάριο φωτορύπανσης στον τυπικό κάρναβο E1

Το σενάριο της περιορισμού της φωτορύπανσης εφαρμόστηκε κάρναβο E1 όπου προέκυψε το ίδιο φωτιστικό (*Τύπου II*) που χρησιμοποιήθηκε στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης (για κάρναβο κατηγορίας E1 και θερμοκρασία χρώματος ίση με 3000K), καθώς αυτό είχε τον μικρότερο δείκτη UFR. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως και τα χαρακτηριστικά του φωτιστικού περιγράφονται με λεπτομέρεια στα κεφάλαια 7.4.1.1 και 7.4.1.2. Επίσης η τεχνοοικονομική μελέτη του συγκεκριμένου σεναρίου θα έχει ίδια αποτελέσματα τα οποία περιγράφονται στην ενότητα 7.4.2.4.

Στο συγκεκριμένο σενάριο υπολογίστηκε και ο δείκτης UFR ο οποίος δεν περιγράφεται στα παραπάνω κεφάλαια. Για τα διαθέσιμα φωτιστικά υπολογίστηκε ο δείκτης UFR προκειμένου να βρεθεί το ιδανικό φωτιστικό με την μικρότερη τιμή του δείκτη. Για το φωτιστικό *Τύπου II* που τελικά επιλέχθηκε, ο δείκτης UFR υπολογίστηκε ίσος με 1,988 και ήταν ο μικρότερος από όλα τα διαθέσιμα φωτιστικά, (που κάλυπτε και τις απαιτήσεις του προτύπου EN 13201), που εξετάστηκαν γι' αυτό άλλωστε και προτιμήθηκε.

### 7.5.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Αρχικά, βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα του σεναρίου είναι ότι η επιλογή του καταλλήλου φωτιστικού εξαρτάται κυρίως από τον δείκτη Utilization Factor καθώς οι υπόλοιποι παράμετροι της εξίσωσης ήταν κοινοί για όλα τα φωτιστικά. Έτσι το φωτιστικό που επιλέχθηκε είχε  $UF=0,539$  που ήταν ο υψηλότερος σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές. Η τιμή του παραπάνω συντελεστή αιτιολογείται πλήρως αν εξεταστεί το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού *Τύπου II* καθώς στο επίπεδο C0-C180 που φωτίζει κατά μήκος του οδοστρώματος κατευθύνονται μεγάλες τιμές φωτεινής έντασης (πάνω από 300cd/klm) σε ένα εύρος γωνιών από -45 έως 45 μοίρες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται η φωτεινή ροή που κατανέμεται εκτός οδοστρώματος, περιορίζοντας έτσι την φωτορύπανση. Τέλος, στο επίπεδο C90-C270 το σύνολο της φωτεινής ροής προσπίπτει στο οδόστρωμα, αφού περιορίζεται μεταξύ των γωνιών 0° έως 30°. Ο τρόπος κατανομής της φωτεινής ροής στο επίπεδο C90-C270 είναι πολύ σημαντικός, καθώς το σύνολο της φωτεινής ροής προσπίπτει στο οδόστρωμα, εξαιτίας και της σωστής τοποθέτησης

του φωτιστικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η γωνία  $\omega$  (Εικόνα 7.1) που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας του φωτιστικού και του τελευταίου σημείου του πλάτους του δρόμου είναι περίπου ίση με 37 μοίρες.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι αν είχε επιλεγεί μικρότερος συντελεστής αντανάκλασης περιβάλλοντα χώρου ο λόγος UFR θα ήταν ακόμα μικρότερος. Ενώ αντίστοιχα αν ο συντελεστής ανάκλασης ήταν μεγαλύτερος από 0,07 που έχει επιλεγεί ο λόγος UFR θα ήταν επίσης μικρότερος.

Επιπλέον, θα μπορούσε να σχολιαστεί ότι το γεγονός ότι το φωτιστικό που επιλέχθηκε για τον περιορισμό της φωτορύπανσης είναι κατηγορίας φωτεινής έντασης  $G^*2$  κάτι που μπορεί να φαίνεται οξύμωρο, καθώς αυτό σημαίνει ότι πάνω από τις  $80^\circ$  η μέγιστη φωτεινή ένταση του φωτιστικού κυμαίνεται μεταξύ 100 cd/klm και 150cd/klm. Αντίθετα, μια επιλογή φωτιστικού κατηγορίας τουλάχιστον  $G^*5$  θα φάνταζε ορθότερη καθώς στις  $80^\circ$  η μέγιστη φωτεινή ένταση του φωτιστικού είναι λιγότερη των 100 cd/klm. Φωτιστικά μεγαλύτερων κατηγοριών φωτεινών εντάσεων εξετάστηκαν αλλά δεν απέδιδαν καλύτερα από αυτό που επιλέχθηκε γι' αυτό και απορρίφθηκαν.

### 7.5.2.1 Σενάριο φωτορύπανσης στον τυπικό κάνναβο B5

Το σενάριο της περιορισμού της Φωτορύπανσης εφαρμόστηκε και σε κάνναβο B5 όπου προέκυψε το ίδιο φωτιστικό (*Τύπου IV*) που χρησιμοποιήθηκε στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης (για κάνναβο κατηγορίας B5 και θερμοκρασία χρώματος ίση με 3000K), καθώς αυτό είχε τον μικρότερο δείκτη UFR. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως και τα χαρακτηριστικά του φωτιστικού περιγράφονται με λεπτομέρεια στα κεφάλαια 7.4.2.1 και 7.4.2.2. Επίσης και η τεχνοοικονομική μελέτη θα έχει ίδια αποτελέσματα τα οποία περιγράφονται στην ενότητα 7.4.2.4.

Στο συγκεκριμένο σενάριο υπολογίστηκε και ο δείκτης UFR ο οποίος δεν περιγράφεται στα παραπάνω κεφάλαια. Ο λόγος UFR υπολογίστηκε ίσος με 2,184 και ήταν ο μικρότερος από όλα τα διαθέσιμα φωτιστικά που εξετάστηκαν γι' αυτό άλλωστε και προτιμήθηκε.

### 7.5.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Όπως τονίστηκε και στην ερμηνεία αποτελεσμάτων του καννάβου E1 η επιλογή του κατάλληλου φωτιστικού για την μείωση της φωτορύπανσης, σύμφωνα με την μέθοδο που ακολουθήθηκε, εξαρτάται κυρίως από τον δείκτη UF (Utilization Factor), καθώς όσο υψηλότερος είναι ο δείκτης χρησιμοποίησης τόσο περισσότερη φωτεινή ροή του φωτιστικού θα προσπίπτει στο οδόστρωμα. Στο συγκεκριμένο φωτιστικό ο δείκτης UF ήταν ίσος με 0,4813. Επιπλέον, τα συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με τους συντελεστές ανάκλασης του οδοστρώματος και του περιβάλλοντα χώρου εξακολουθούν να ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση.

Επίσης και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται η χρησιμοποίηση ενός φωτιστικού που είναι κατηγορίας φωτεινής έντασης  $G^*3$  κάτι που σημαίνει ότι στις  $70^\circ$  η μέγιστη φωτεινή ένταση του φωτιστικού θα είναι πάνω από 500 cd/klm. Παρόλα αυτά ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες είχε μικρότερο δείκτη UFR από άλλα φωτιστικά μεγαλύτερων κλάσεων  $G^*4$ - $G^*6$  που θεωρητικά θα έπρεπε να προτιμώνται σε τέτοια σενάρια καθώς έχουν μικρότερες τιμές φωτεινής έντασης σε αυτές τις γωνίες.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα που προέκυψαν και από τις δυο υλοποιήσεις (κάνναβος E1 και B5) ίσως οι κατηγορίες φωτεινή ένταση δεν θα έπρεπε να προτιμώνται σε σενάρια περιορισμού της φωτορύπανσης καθώς υπάρχει κίνδυνος να απορριφθούν φωτομετρικά αποδοτικότερα φωτιστικά που ανήκουν στις κατηγορίες G\*1-G\*3. Αντίθετα, θα πρέπει να εξετάζεται η φωτομετρική απόδοση του φωτιστικού μέσω του δείκτη UFR, αλλά και το πολικό διάγραμμα του εκάστοτε φωτιστικού. Άλλωστε τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν και στις δυο υλοποιήσεις στο επίπεδο C0 – C180 κατευθύνουν το σύνολο της φωτεινής τους ροής στο οδόστρωμα, περιορίζοντας έτσι απώλειες φωτεινής ροής που δημιουργούν φωτορύπανση. Επιπλέον, στο επίπεδο C90 – C270 μπορεί ένα μέρος να μην κατευθύνεται στο οδόστρωμα αλλά στο περιβάλλοντα χώρο του δρόμου αλλά αυτό είναι και απαραίτητο, καθώς το πρότυπο ορίζει συγκεκριμένη τιμή μέσης οριζόντιας έντασης φωτισμού στον περιβάλλοντα χώρο ίση περίπου με το 1/3 της μέσης οριζόντιας έντασης φωτισμού του οδοστρώματος.

Στο σενάριο περιορισμού της φωτορύπανσης αναζητήθηκαν και επιλέχθηκαν τα φωτιστικά με τον υψηλότερο δείκτη χρησιμοποίησης προκειμένου να περιοριστεί ο διαφεύγων φωτισμός της εγκατάστασης που συντελεί στην επιδείνωση του φαινομένου. Όμως φωτιστικά τέτοιου τύπου ήταν ιδανικά και στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης, καθώς κατηύθυναν μεγάλο μέρος της φωτεινής ροής τους στο οδόστρωμα, με αποτέλεσμα τα κριτήρια του προτύπου να καλύπτονται με φωτιστικά χαμηλής κατανάλωσης.

### 7.5.3 Ειδική περίπτωση σεναρίου φωτορύπανσης στον τυπικό κάρναβο B5

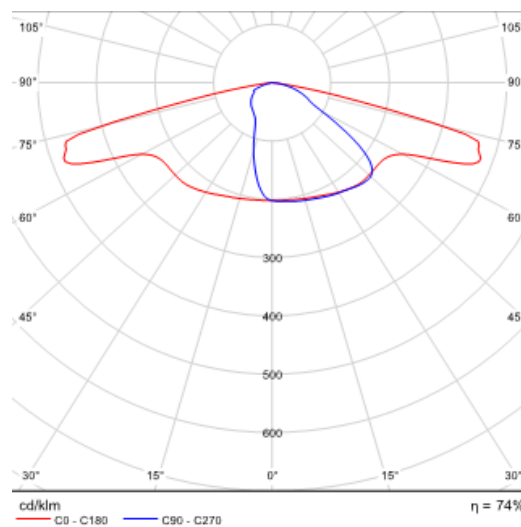
Κατά την εξέταση του προηγούμενου σεναρίου προτιμήθηκε τα φωτιστικά να τοποθετηθούν σε γωνία  $0^\circ$  καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις, με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερο μέρος της φωτεινής τους ροής προσπίπτει στο οδόστρωμα περιορίζοντας έτσι το φαινόμενο της φωτορύπανσης. Παρόλα αυτά αν και σπάνιο υπάρχει το ενδεχόμενο ένα φωτιστικό να αποδίδει καλύτερα στις  $5^\circ$  ή και σε ακόμα μεγαλύτερη κλίση απ' ότι στις μηδέν μοίρες. Έτσι για τον κάρναβο B5 βρέθηκε ένα φωτιστικό όπου στις  $5^\circ$  έχει μικρότερο δείκτη UFR απ' ότι στις  $0^\circ$ .

Πιο συγκεκριμένα το φωτιστικό Τύπου V καλύπτει τις απαιτήσεις του προτύπου EN13201 αλλά ταυτόχρονα έχει μικρότερο δείκτη UFR στις  $5^\circ$ .

Πίνακας 7.20 Υπολογισμός δείκτη UFR σε ειδική περίπτωση σεναρίου φωτορύπανσης στον κάρναβο B5

Τύπου V	$0^\circ$	$5^\circ$
UF	0,254	0,265
UFR	3,875	3,721

Ενώ το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού φαίνεται στην εικόνα 7.4.



Εικόνα 7.4 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου V

Προφανώς ο δείκτης UFR που προέκυψε είναι αρκετά μεγάλος, σε σχέση με αυτόν που ήδη έχει παρουσιαστεί, όποτε το φωτιστικό δεν ενδείκνυται για την χρησιμοποίηση του σε ένα σενάριο περιορισμού της φωτορύπανσης. Παρόλα αυτά, ο στόχος εδώ ήταν να βρεθεί ένα φωτιστικό που έχει μικρότερο δείκτη UFR στις  $5^\circ$  σε σχέση με τις  $0^\circ$  κάτι που επετεύχθη καθώς ο δείκτης UFR είναι ίσος με 3,875 στις  $0^\circ$ , ενώ στις  $5^\circ$  ισούται με 3,721. Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στον utilization Factor καθώς είναι ελαφρώς μικρότερος στις  $0^\circ$  απ' ότι στις  $5^\circ$ .

## 7.6 Ελάχιστη τιμή θάμβωσης

### 7.6.1 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο E1

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται μια εγκατάσταση οδοφωτισμού που θα επιτυγχάνει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές θάμβωσης. Υψηλές τιμές θάμβωσης σε μια εγκατάσταση οδοφωτισμού μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στον οδηγό και να προκαλέσουν ατυχήματα, όπως παρουσιάστηκε και στο έκτο κεφάλαιο. Στόχος στο παρόν σενάριο, λοιπόν, ήταν η δημιουργία μιας εγκατάστασης που χαρακτηρίζεται για τις χαμηλές τιμές θάμβωσης, προκειμένου να εξασφαλίζεται ένας ποιοτικός και φιλικός προς τον χρήστη φωτισμός. Στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13201 η τιμή της θάμβωσης μιας εγκατάστασης μετράται με τον δείκτη TI, καθώς ορίζεται μια μέγιστη τιμή του παραπάνω δείκτη που δεν πρέπει να υπερβεί ο μελετητής της εγκατάστασης. Στο παρόν σενάριο λοιπόν αναζητήθηκαν τα φωτιστικά που ελαχιστοποιούν τον δείκτη TI, έτσι ώστε να προκύψει τελικά μια εγκατάσταση με χαμηλές τιμές θάμβωσης.

Για να επιτευχθεί το παραπάνω έγιναν προσομοιώσεις με όλα τα διαθέσιμα φωτιστικά, όπου με την χρήση του λογισμικού Dialux ελεγχόταν η τιμή TI και τελικά επιλέχθηκε το φωτιστικό με την μικρότερη τιμή του παραπάνω δείκτη. Στο συγκεκριμένο σενάριο εξετάστηκε μια υλοποίηση για θερμοκρασία χρώματος 4000K. Έτσι επιλέχθηκε το φωτιστικό με την μικρότερη δυνατή τιμή θάμβωσης που όμως ικανοποιεί και τα υπόλοιπα κριτήρια του EN 13201.

Πιο συγκεκριμένα για τον τυπικό κάρναβο E1 ο τρόπος τοποθέτησης των φωτιστικών φαίνεται στον Πίνακα 7.21.

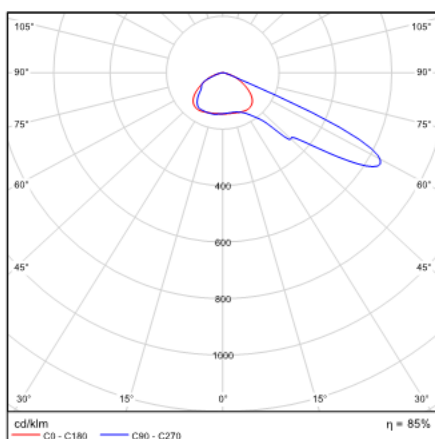
Πίνακας 7.21 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο E1 σεναρίου μειωμένης τιμής θάμβωσης

<i>Απόσταση Ιστών (m) :</i>	40
<i>Ύψος Σημείου Φωτός (m) :</i>	12
<i>Κλίση :</i>	0°
<i>Προεξοχή Φωτεινού Σημείου (m) :</i>	1,5
<i>Απόσταση Ιστός - Οδόστρωμα (m):</i>	0,5
<i>Κλάση :</i>	M2

Τα χαρακτηριστικά του φωτιστικού που χρησιμοποιήθηκε και έχει θερμοκρασία χρώματος 4000K φαίνονται στον Πίνακα 7.22, ενώ το πολικό του διάγραμμα στην Εικόνα 7.5.

Πίνακας 7.22 Χαρακτηριστικά φωτιστικού Τύπου VI

<i>Φωτεινή ροή πηγής LED (lm):</i>	42000
<i>Φωτεινή ροή φωτιστικού (lm):</i>	35608
<i>Βαθμός Απόδοσης Λειτουργίας (R<sub>LO</sub>):</i>	84,78
<i>Ισχύς (W):</i>	281
<i>Απόδοση φωτεινής πηγής (lm/W) :</i>	126,7
<i>Θερμοκρασία :</i>	4000K



Εικόνα 7.5 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου VI

### 7.6.1.1 Επεξεργασία και αποτελέσματα δεδομένων στον τυπικό κάρναβο E1

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση του παραπάνω φωτιστικού, μετά από προσομοίωση στο πρόγραμμα Dialux φαίνονται στον πίνακα 7.23. Ο δείκτης De προέκυψε για 4000 ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πίνακας 7.23 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο E1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

Φωτιστικό :	Τύπου VII
Θερμοκρασία (K):	4000
$Lm$ ( $cd/m^2$ )	1,51
$Uo$	0,73
$U1$	0,75
$TI$	5
$EIR$	0,8
Κατανάλωση :	
Ισχύς / $\chi\lambda\mu$ ( $W/km$ ) :	14050
Κατανάλωση Ενέργειας ( $kWh/year$ ):	2248
$De$ ( $kWh/m^2$ έτος):	2,68
$Dp$ ( $W/lx m^2$ ) :	0,021
Κατηγορία φωτεινής έντασης:	G*6

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του εβδόμου κεφαλαίου όπως έχει ήδη αναλυθεί:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot LSF = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,72$$

$LLMF = 0,8$ . Η φωτεινή πηγή έχει συντελεστή συντήρησης 0,8 σύμφωνα με τον κατασκευαστή, καθώς χρησιμοποιεί drivers των 700mA.

$$LMF = 0,9$$

$$LSF = 1$$

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι υπόλοιποι δείκτες όπως περιγράφονται στην ενότητα 7.3 όπου για την εύρεση της συνολικής φωτεινής ροής του φωτιστικού που προσπίπτει στην φωτιζόμενη επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Oxytech. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.24.

Πίνακας 7.24 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάναβο E1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

Φωτιστικό :	Τύπου VI
Θερμοκρασία (K):	4000
$\Phi_A (Lm) =$	8175
$CL =$	1,1
$U =$	0,223
$Np =$	0,450
$Ninst (Lm/W) =$	8,813

### 7.6.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο λογισμικό Dialux είναι φανερό ότι ο στόχος επετεύχθη, καθώς η τιμή της θάμβωσης της εγκατάστασης (που εκφράζεται μέσω του συντελεστή TI) περιορίστηκε στο μισό σε σχέση με την αντίστοιχη που υπολογίστηκε στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης και έτσι από 10 μειώθηκε σε 5.

Αυτή η μείωση οφείλεται προφανώς στο φωτιστικό που χρησιμοποιήθηκε και στο πολικό του διάγραμμα που φαίνεται στην εικόνα 7.7. Εξετάζοντας το πολικό του διάγραμμα του φωτιστικού Τύπου VI παρατηρείται ότι το σύνολο της φωτεινής ροής στο επίπεδο C90-C270 περιορίζεται αρκετά μεταξύ 45° και 60° και έτσι το φωτιστικό φωτίζει σε περιορισμένο χώρο πράγμα που δικαιολογεί και τις μειωμένες τιμές της θάμβωσης. Αντίθετα, το φωτιστικό Τύπου I ( Εικόνα 7.2 ) που χρησιμοποιήθηκε στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης η φωτεινή του ροή κατανέμεται πιο ομοιόμορφα στο επίπεδο C90-C270 από (-15° έως 30° ) φωτίζοντας έτσι μεγαλύτερη περιοχή αλλά παράλληλα δημιουργεί μεγαλύτερες τιμές θάμβωσης. Στο επίπεδο C0-C180 η τιμή της φωτεινής έντασης του φωτιστικού Τύπου VI είναι σχεδόν αμελητέα και ουσιαστικά δεν συνεισφέρει καθόλου τον φωτισμό του οδοστρώματος, ενώ αντίθετα το φωτιστικό Τύπου I στο ίδιο επίπεδο από -75° - 75° έχει φωτεινή ένταση πάνω από 300 cd/klm συμβάλλοντας σημαντικά στον φωτισμό κατά μήκος του δρόμου αυξάνοντας έτσι τις αντιθέσεις και άρα την τιμή της θάμβωσης. Τα παραπάνω μπορούν να επιβεβαιωθούν και από την εξέταση της φωτεινής ροής του κάθε



φωτιστικού που τελικά προσπίπτει στο οδόστρωμα όπου στην περίπτωση του *Τύπου VI* είναι ίση με  $\Phi_A = 81751\text{lm}$  (Πίνακας 7.23), ενώ στην περίπτωση του *Τύπου I* είναι ίση με  $\Phi_A = 11612\text{lm}$  (Πίνακας 7.6). Η διαφορά αυτή στα lumen εξηγείται και από ακόμα μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει. Πιο συγκεκριμένα θεωρώντας ως δεδομένα το πλάτος του δρόμου, το ύψος του φωτεινού σημείου και το μήκος της προεξοχής προκύπτει ότι η γωνία  $\omega$  (Εικόνα 7.1) που σχηματίζεται μεταξύ του φωτιστικού και του τελευταίου σημείου του πλάτους του δρόμου είναι περίπου ίση με 37 μοίρες. Όταν λοιπόν στο επίπεδο C90-C270 οι μεγαλύτερες τιμές φωτεινής έντασης κατανέμονται μετά τις 45° πρακτικά φωτίζεται το περιβάλλον του οδοστρώματος και όχι το οδόστρωμα. Έτσι είναι ορατή η ανάγκη περισσότερων διαθέσιμων lumen για να καλυφθούν οι ίδιες ανάγκες φωτισμού, εξαιτίας της πολικής κατανομής του φωτιστικού *Τύπου VI*, καθώς το οδόστρωμα φωτίζεται μόνο από το επίπεδο C90-C270.

Έτσι προκειμένου να εξασφαλιστεί και μια μειωμένη τιμή θάμβωσης αλλά και η ικανοποίηση των κριτηρίων του EN 13201 προτύπου, η επιλογή υψηλής κατανάλωσης φωτιστικών είναι μονόδρομος, καθώς υψηλότερη κατανάλωση συνεπάγεται συνήθως και περισσότερα διαθέσιμα lumen.

Επόμενο των παραπάνω, ήταν η επιλογή φωτιστικού αρκετά υψηλής κατανάλωσης (281W) προκειμένου να ικανοποιούνται τα κριτήρια του προτύπου EN13201. Η κακή φωτομετρική απόδοση του φωτιστικού φαίνεται ξεκάθαρα στον συντελεστή χρησιμοποίησης όπου είναι ίσος με  $U=0,223$  ο οποίος είναι υποδιπλάσιος από τον αντίστοιχο του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης  $U=0,469$  (Πίνακας 7.6) κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του ολικού συντελεστή αποδοτικότητας της εγκατάστασης σε μόλις  $N_{inst} = 8,813\text{lm/W}$ . Αναμενόμενη αύξηση παρατηρούμε και στον δείκτη  $Dp$  ο οποίος πλέον είναι ίσος με 0,021 ενώ στην αντίστοιχη περίπτωση του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης ήταν ίσος με 0,015. Όλα τα παραπάνω προφανώς θα μεταφραστούν σε ένα αρκετά δαπανηρό κόστος λειτουργίας.

Τελικώς, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση της τιμής της θάμβωσης όμως με σημαντικές υποχωρήσεις από άποψη κόστους. Η ακριβής αύξηση της ετήσιας κατανάλωσης επιγράφεται στο κεφάλαιο 7.6.1.3, αλλά ένα πρώτο συμπέρασμα της αυξημένης ετήσιας κατανάλωσης μπορεί να προκύψει εξετάζοντας τον δείκτη που υπολογίζεται από το λογισμικό Dialux και αφορά την ισχύ/χλμ της εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν στο πρώτο σενάριο ο δείκτης ήταν ίσος με  $7600\text{W/km}$ , ενώ στο παρόν σενάριο ο δείκτης σχεδόν διπλασιάστηκε και είναι ίσος με  $14050\text{W/km}$ . Σημαντικές μειώσεις του δείκτη θάμβωσης μπορούν να προκύψουν αλλάζοντας και την γεωμετρία της εγκατάστασης. Αν σε ένα υποθετικό σενάριο μειωνόταν η απόσταση των φωτιστικών θα ήταν δυνατό να επιτευχθούν ακόμα μικρότερες τιμές θάμβωσης, όμως αυτό θα σήμαινε αγορά και εγκατάσταση περισσότερων φωτιστικών αυξάνοντας έτσι το αρχικό κόστος αγοράς και στην συνέχεια το κόστος κατανάλωσης.

### 7.6.1.3 Τεχνοοικονομική μελέτη στον τυπικό κάνναβο E1

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και τώρα για τον κάνναβο E1 πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική προσέγγιση τεχνοοικονομικής μελέτης όπου ενδεικτικά επιλέχθηκαν μήκος οδοστρώματος 1 km και 4000 ώρες λειτουργίας. Για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παραδοχές, με βάση τις οποίες υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.25 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάνναβο E1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

Φωτιστικό	Πλήθος	Τιμή/μονάδα	Τελικό κόστος
Τύπου VI	50	650	32500
Κόστος Εγκατάστασης	50	30	1500

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας αρχικά υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε ένα χρόνο και στην συνέχεια το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των drivers.

Πίνακας 7.26 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάνναβο E1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

	Τύπου VI
Χρέωση Ενέργειας (€/kWh):	0,14466
Πάγιο (€/year):	6,36
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	56200
Κ Ενέργειας Ετήσιο (€):	8136,252

Για το κόστος λειτουργίας για τις βλάβες των driver θεωρούμε τις ίδιες προσεγγίσεις που έχουν ήδη αναλυθεί και εξηγηθεί στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης για καννάβους κατηγορίας E1 μόνο που τώρα ο κάθε driver των 700mA κοστίζει 125 Ευρώ.

Πίνακας 7.27 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάνναβο E1 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

	Βλάβες στα 5 χρόνια		Βλάβες από 5 έως 10 χρόνια	
	Πλήθος	Κόστος (€)	Πλήθος	Κόστος (€)
Drivers	5	150	5	775

Τέλος, ο καθαρισμός κάθε φωτιστικού που βρίσκεται σε ύψος πάνω από 8m θα στοιχίσει 25€ και θα πρέπει να προστεθεί και αυτός στα λειτουργικά έξοδα και όπως έχει υπολογιστεί στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης για καννάβους κατηγορίας E1, το ετήσιο κόστος της παραπάνω διαδικασίας είναι : 1250 €.

Η διαφορά της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ του παρόντος σεναρίου και του σεναρίου της οικονομικότερης υλοποίησης είναι σημαντική, καθώς στο πρώτο σενάριο απαιτούνται 7424kWh/year, ενώ τώρα 56200kWh/year. Όπως αναμενόταν το κόστος λειτουργίας μια τέτοιας εγκατάστασης είναι ιδιαίτερα αυξημένο καθώς το ετήσιο κόστος κατανάλωσης είναι ακριβότερο κατά 2836,252 € σε σχέση με το αντίστοιχο του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης και σε συνδυασμό με το ακριβότερο κόστος φωτιστικών μια τέτοια υλοποίηση δεν συνίσταται από οικονομικής άποψης. Επιπλέον ακριβότερη είναι και η αντικατάσταση των driver προσθέτοντας επιπλέον κόστος σε σχέση με το προαναφερθέν σενάριο.

## 7.6.2 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κήναβο B5

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια έτσι και στο παρόν σενάριο εξετάζεται και μια υλοποίηση για κήναβο B5. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία που ακολουθήθηκε και παρουσιάστηκε για την υλοποίηση της εγκατάστασης στον κήναβο E1 είναι η ίδια και για τον κήναβο B5. Για τον παρόν κήναβο, λοιπόν, υπολογίστηκαν και εξετάστηκαν δυο υλοποιήσεις του σεναρίου μειωμένης θάμβωσης μία για θερμοκρασία χρώματος 4000K και μια για 3000K. Έτσι επιλέχθηκαν φωτιστικά με την μικρότερη δυνατή τιμή θάμβωσης, (ελέγχοντας τον δείκτη TI στο λογισμικό Dialux), που παράλληλα ικανοποιούν τα κριτήρια του EN 13201.

Πιο συγκεκριμένα για τον τυπικό κήναβο B5 ο τρόπος τοποθέτησης των φωτιστικών φαίνεται στον Πίνακα 7.28.

Πίνακας 7.28 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κήναβο B5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

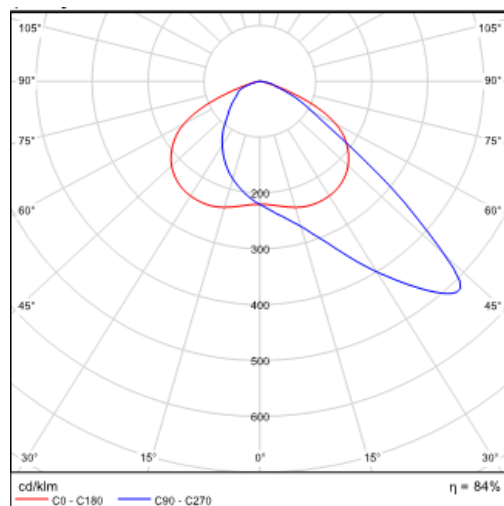
<i>Απόσταση Ιστών (m) :</i>	35
<i>Ύψος Σημείου Φωτός (m) :</i>	12,5
<i>Κλίση :</i>	0°
<i>Προεξοχή Φωτεινού Σημείου (m) :</i>	1,5
<i>Απόσταση Ιστός - Οδόστρωμα (m):</i>	1
<i>Κλάση :</i>	M3

Τα χαρακτηριστικά των φωτιστικών που χρησιμοποιήθηκαν για θερμοκρασία χρώματος 4000K και 3000K φαίνονται στον Πίνακα 7.28, ενώ το πολικό του διάγραμμα στην Εικόνα 7.6.

Πίνακας 7.29 Χαρακτηριστικά φωτιστικών Τύπου VII και Τύπου VIII

Φωτιστικό	Τύπου VII	Τύπου VIII
<i>Θερμοκρασία :</i>	4000K	3000K
<i>Φωτεινή ροή πηγής LED (lm):</i>	31000	31000
<i>Φωτεινή ροή φωτιστικού (lm):</i>	26151	26151
<i>Βαθμός Απόδοσης Λειτουργίας (R<sub>LO</sub>):</i>	84,36%	84,36%
<i>Ισχύς (W):</i>	210	221
<i>Απόδοση φωτεινής πηγής (lm/W) :</i>	124,5	118,3

Στον κάρναβο Β5 (όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις) χρησιμοποιήθηκε το ίδιο φωτιστικό και για τις δυο θερμοκρασίες χρώματος, μόνο που στην περίπτωση των 3000K εξαιτίας της χειρότερης απόδοσης του φωτιστικού επιλέχθηκε φωτιστικό μεγαλύτερης κατανάλωσης. Το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού που χρησιμοποιήθηκε είναι το ίδιο και φαίνεται στην εικόνα 7.6 είναι προφανώς το ίδιο και για τα δυο φωτιστικά.



Εικόνα 7.6 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου VII/VIII

### 7.6.2.1 Επεξεργασία και αποτελέσματα δεδομένων στον τυπικό κάρναβο Β5

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση των παραπάνω φωτιστικών, μετά από προσομοίωση στο πρόγραμμα Dialux φαίνονται στον πίνακα 7.30. Ο δείκτης De προέκυψε για 4000 ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πίνακας 7.30 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

Φωτιστικό :	Τύπου VII	Τύπου VIII
Θερμοκρασία (K):	4000K	3000K
$L_m$ ( $cd/m^2$ )	1,01	1,01
$U_o$	0,63	0,63
$U_l$	0,69	0,69
$TI$	2	2
$EIR$	0,78	0,78
Κατανάλωση :		
Ισχύς / χλμ ( $W/km$ ) :	6090	6409
Κατανάλωση Ενέργειας ( $kWh/year$ ):	840	884
$De$ ( $kWh/m^2$ έτος):	3,2	3,37
$D_p$ ( $W/lx m^2$ ) :	0,039	0,041
Κατηγορία φωτεινής έντασης:	G*6	G*6

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του εβδόμου κεφαλαίου όπως έχει ήδη αναλυθεί.:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot LSF = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,81$$

LLMF= 0,9. Η πηγή LED έχει συντελεστή συντήρησης 0,8 σύμφωνα με τον κατασκευαστή, καθώς χρησιμοποιεί drivers των 500mA.

$$LMF = 0,9.$$

$$LSF = 1.$$

Ο συντελεστής συντήρησης για τα δύο φωτιστικά είναι κοινός, όπως προέκυψε από τους παραπάνω υπολογισμούς.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι υπόλοιποι δείκτες όπως περιγράφονται στην ενότητα 7.3 όπου για την εύρεση της συνολικής φωτεινής ροής του φωτιστικού που προσπίπτει στην φωτιζόμενη επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Oxytech. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.31.

Πίνακας 7.31 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο Β5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

Φωτιστικό :	Τύπου VII	Τύπου VIII
Θερμοκρασία (K):	4000K	3000K
$\Phi_A (Lm) =$	6828	6828
$CL =$	0,549	0,549
$U =$	0,261	0,261
$Np =$	0,592	0,535
$Ninst (Lm/W) =$	7,232	6,204

### 7.6.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι φανερό ότι και σε αυτή την περίπτωση ο βασικός στόχος της μείωσης της θάμβωσης επετεύχθη καθώς η τιμή του TI μειώθηκε στο 2 από την τιμή του 7 που είχε υπολογιστεί στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης.

Όπως έχει ήδη αναλυθεί ( Κεφάλαιο 7.6.1.3 ) η δραστική μείωση οφείλεται κυρίως στο πολικό διάγραμμα του φωτιστικού που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν σενάριο. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 7.8 το μεγαλύτερο μέρος της φωτεινής ροής κατανέμεται στο επίπεδο C90 - C270 μεταξύ των 30° και 45° με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται εστιασμένος φωτισμός σε περιορισμένη περιοχή του οδοστρώματος. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι η φωτεινή ένταση που διοχετεύεται στο επίπεδο C0-C180 είναι πολύ περιορισμένη καθώς φωτίζεται ένα μικρό εύρος γωνιών -30° έως 30° με ακόμα μικρότερη τιμή φωτεινής έντασης καθώς δεν ξεπερνάει τις 200cd/klm. Αυτός ο τύπος πολικού διαγράμματος μπορεί να εξυπηρετεί τις ανάγκες του σεναρίου που εξετάζεται μειώνοντας αισθητά τις τιμές του TI, αλλά παράλληλα έχει επιπτώσεις στην λαμπρότητα και στην ομοιομορφία του οδοστρώματος. Επίσης, η υλοποίηση ενός σεναρίου μειωμένη θάμβωσης μπορεί να οδηγήσει και στην μείωση των απαιτούμενων αποστάσεων των ιστών προκειμένου να επιτυγχάνονται μεγαλύτερες μειώσεις της τιμής της θάμβωσης, με αποτέλεσμα όμως την αύξηση του κόστους αγοράς φωτιστικών.

Αντίθετα, τα φωτιστικά που χρησιμοποιήθηκαν στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης, για τον κάρναβο B5, η φωτεινή ροή τους κατανέμεται ομοιόμορφα στο επίπεδο C90 - C270 μεταξύ των  $-15^\circ$  έως  $30^\circ$  αλλά και στο επίπεδο C0-C180 μεταξύ των  $-75^\circ$  έως  $75^\circ$ . Έτσι με τα φωτιστικά του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης μπορούσε να καλυφθεί μεγαλύτερη επιφάνεια του οδοστρώματος εξαιτίας της πολικής κατανομής τους και γι' αυτό επιλέχθηκαν ως φωτιστικά χαμηλότερης κατανάλωσης. Μάλιστα η διαφορά στην κατανομή της φωτεινής ροής που σχολιάστηκε παραπάνω είναι φανερή και στον συντελεστή χρησιμοποίησης όπου στο σενάριο που εξετάζεται είναι ίσος με  $U=0,261$ , ενώ στο πρώτο σενάριο ήταν σχεδόν διπλάσιος και ίσος με  $U = 0,481$ . Επίσης η εξέταση της φωτεινής ροής κάθε φωτιστικού που προσπίπτει στο οδόστρωμα επιβεβαιώνει την περιορισμένη κατανομή της φωτεινής ροής του *Τύπου VII*. Πιο συγκεκριμένα για την εγκατάσταση θερμοκρασίας χρώματος 4000K στο πρώτο σενάριο χρειάστηκαν 4452lm, ενώ τώρα χρειάστηκαν 6828lm για να καλύψουν τα ίδια τετραγωνικά και τις ίδιες απαιτήσεις. Αντίστοιχα, και στην υλοποίηση των 3000K ενώ στο πρώτο σενάριο χρειάστηκαν 4369lm, στο σενάριο της μειωμένης θάμβωσης που εξετάζουμε χρειάστηκαν 6828lm για να καλύψουν πάλι τα ίδια τετραγωνικά και τις ίδιες απαιτήσεις. Επιπλέον κάνοντας την ίδια παρατήρηση με την προηγούμενη περίπτωση γίνεται ακόμα περισσότερο κατανοητό γιατί χρειάστηκαν περισσότερα lumen για την κάλυψη των ίδιων απαιτήσεων. Πιο συγκεκριμένα θεωρώντας, πάλι, ως δεδομένα το πλάτος του δρόμου, το ύψος του φωτεινού σημείου και το μήκος της προεξοχής προκύπτει ότι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του φωτιστικού και του τελευταίου σημείου του πλάτους του δρόμου είναι περίπου ίση με 26 μοίρες. Όταν λοιπόν στο επίπεδο C90-C270 οι μεγαλύτερες τιμές φωτεινής έντασης κατανέμονται μεταξύ των γωνιών  $30^\circ$ - $45^\circ$  πρακτικά φωτίζεται το περιβάλλον του οδοστρώματος και όχι το οδόστρωμα.

Προφανώς, όπως αναφέρθηκε και στον κάρναβο E1, έτσι και για τον κάρναβο B5 εξαιτίας αυτής της κατανομής της φωτεινής ροής του φωτιστικού επιλέχθηκαν φωτιστικά μεγάλης κατανάλωσης προκειμένου να ικανοποιούνται και τα κριτήρια του προτύπου EN12301. Αποτέλεσμα αυτής της επιλογής είναι η κατανάλωση 6090W/km στην υλοποίηση των 4000K, κατανάλωση σημαντικά αυξημένη συγκρινόμενη με την αντίστοιχη του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης όπου ήταν ίση με 1856W/km. Αντίστοιχα για την υλοποίηση των 3000K η κατανάλωση ενέργειας από 2233W/km στο πρώτο σενάριο αυξήθηκε στα 6409 W/km.

Όπως είναι προφανές και ο συντελεστής  $N_{inst}$  έχει μειωθεί σημαντικά καθώς εξαρτάται από τους υπόλοιπους δείκτες όπως  $N_p$  και  $U$  οι οποίοι έχουν και αυτοί μικρές τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές τους στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενεργειακή απόδοση ( $N_p$ ) του φωτιστικού μειώνεται όσο αυξάνεται η κατανάλωση του με αποτέλεσμα να πέφτει και ο συνολικός δείκτης  $N_{inst}$  της εγκατάστασης.

Όπως αποδεικνύεται ακόμα μια φορά, λοιπόν, η υλοποίηση των 3000K μπορεί να είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, αλλά είναι λιγότερο αποδοτική από την αντίστοιχη της στα 4000K, με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας.

### 7.6.2.3 Τεχνοοικονομική μελέτη στον τυπικό κάρναβο B5

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και τώρα για τον κάρναβο B5 πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική προσέγγιση τεχνοοικονομικής μελέτης όπου ενδεικτικά επιλέχθηκαν μήκος οδοστρώματος 1 km και 4000 ώρες λειτουργίας. Για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παραδοχές, με βάση τις οποίες υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.32 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο B5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

Φωτιστικό	Πλήθος	Τιμή(€) / μονάδα	Τελικό κόστος
Τύπου VII	29	590	17110
Τύπου VIII	29	615	17835
Κόστος Εγκατάστασης (€)	29	30	857

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας αρχικά υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε ένα χρόνο και στην συνέχεια το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των drivers.

Πίνακας 7.33 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο B5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

	Τύπου VII	Τύπου VIII
Χρέωση Ενέργειας (€/kWh):	0,14466	0,14466
Πάγιο (€/year):	6,36	6,36
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	24360	25636
Κ Ενέργειας Ετήσιο (€) :	3530,27	3714,864

Για το κόστος λειτουργίας για τις βλάβες των driver θεωρούμε τις ίδιες προσεγγίσεις που έχουν ήδη αναλυθεί και εξηγηθεί στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης για καννάβους κατηγορίας E1 μόνο που τώρα ο κάθε driver των 500mA κοστίζει 100Ευρώ.

Πίνακας 7.34 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάρναβο B5 σεναρίου μειωμένης θάμβωσης

	Βλάβες στα 5 χρόνια		Βλάβες από 5 έως 10 χρόνια	
	Πλήθος	Κόστος (€)	Πλήθος	Κόστος (€)
Drivers	3	90	3	390

Επιπλέον, ο καθαρισμός κάθε φωτιστικού που βρίσκεται σε ύψος πάνω από 8m θα στοιχίσει 25€ και θα πρέπει να προστεθεί και αυτός στα λειτουργικά έξοδα και όπως έχει υπολογιστεί στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης για καννάβους κατηγορίας B5, το ετήσιο κόστος της παραπάνω διαδικασίας είναι : 714 €.

Όπως αναμενόταν το κόστος λειτουργίας μια τέτοιας εγκατάστασης είναι ιδιαίτερα αυξημένο, καθώς το ετήσιο κόστος κατανάλωσης της εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλό. Πιο αναλυτικά η υλοποίηση των 4000K έχει ετήσιο κόστος ενέργειας ίσο με 3530,27Ευρώ ενώ η αντίστοιχη υλοποίηση της στο οικονομικότερο σενάριο έχει κόστος μόλις 1080,31Ευρώ. Αντίστοιχα η υλοποίηση των 3000K έχει ετήσιο κόστος ενέργειας ίσο με 3714,86Ευρώ, που είναι αρκετά ακριβότερο από τα 1298,46Ευρώ του πρώτου σεναρίου. Αν σε αυτό το ήδη αυξημένο κόστος προσθέσουμε και το ανεβασμένο κόστος αγοράς φωτιστικών είναι προφανές ότι αυτή η υλοποίηση είναι αρκετά πιο δαπανηρή.

Τέλος, η διαφορά κατανάλωσης μεταξύ της υλοποίησης των 3000K και των 4000K είναι ακόμα μια φορά εμφανής, καθώς σε ένα χρόνο καταναλώνεται ενέργεια ίση με 24360kWh στην υλοποίηση των 4000K, ενώ αυτή η κατανάλωση αυξάνεται στις 25636 kWh στην υλοποίηση των 3000K.



## 7.7 Μεγιστοποίηση της ομοιομορφίας της λαμπρότητας

### 7.7.1 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο E1

Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται μια εγκατάσταση οδοφωτισμού που θα χαρακτηρίζεται από τις υψηλές τιμές ολικής ομοιομορφίας της λαμπρότητάς της. Μια εγκατάσταση με υψηλές τιμές ομοιομορφίας συμβάλλει στην οπτική άνεση του χρήστη, ενώ όπως αναφέρθηκε και στο έκτο κεφάλαιο βοηθάει στον καλύτερο εντοπισμό των αντικειμένων στον δρόμο. Η τιμή της ολικής ομοιομορφίας της λαμπρότητας σε κάθε εγκατάσταση ελέγχεται με την χρήση του δείκτη  $U_0$  και θα πρέπει να είναι υψηλότερη από την τιμή κατωφλίου που ορίζει το ευρωπαϊκό πρότυπο EN13201 για κάθε κλάση δρόμου. Στο παρόν σενάριο, λοιπόν, στόχος είναι η εγκατάσταση να χαρακτηρίζεται από υψηλή ομοιομορφία, περιορίζοντας μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές της λαμπρότητας σε όλα τα σημεία του οδοστρώματος. Για να επιτευχθεί το παραπάνω σε κάθε προσομοίωση στο λογισμικό Dialux ελεγχόταν η τιμή του δείκτη  $U_0$  για όλα τα διαθέσιμα φωτιστικά και επιλέχθηκε αυτό που μεγιστοποιούσε τον δείκτη  $U_0$ . Στο συγκεκριμένο σενάριο εξετάστηκαν δυο υλοποιήσεις μια για θερμοκρασία χρώματος 4000K και μία για θερμοκρασία χρώματος 3000K.

Πιο συγκεκριμένα για τον τυπικό κάρναβο E1 ο τρόπος τοποθέτησης των φωτιστικών φαίνεται στον Πίνακα 7.35.

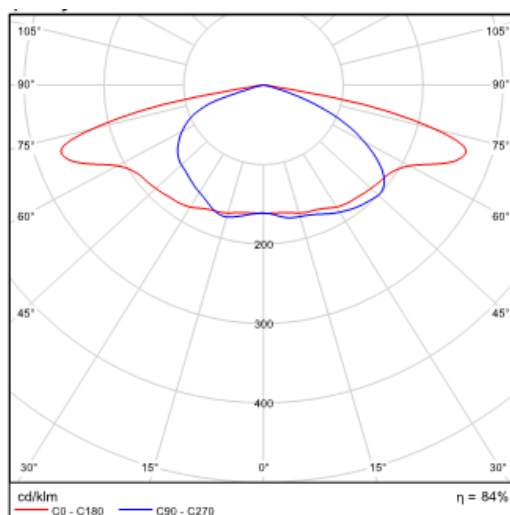
Πίνακας 7.35 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών στον κάρναβο E1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Απόσταση Ιστών (m) :	40
Ύψος Σημείου Φωτός (m) :	12
Κλίση :	0°
Προεξοχή Φωτεινού Σημείου (m) :	1
Απόσταση Ιστός - Οδόστρωμα (m):	0,5
Κλάση :	M2

Τα χαρακτηριστικά των φωτιστικών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 7.44, ενώ ακολουθεί και το πολικό τους διάγραμμα στην Εικόνα 7.9. Επειδή χρησιμοποιήθηκε το ίδιο φωτιστικό και στις δυο υλοποιήσεις, απλά στην περίπτωση των 3000K εξαιτίας της χειρότερης απόδοσης του φωτιστικού επιλέχθηκε φωτιστικό μεγαλύτερης κατανάλωσης, το πολικό διάγραμμα είναι προφανώς το ίδιο και για τα δυο φωτιστικά.

Πίνακας 7.36 Χαρακτηριστικά φωτιστικών Τύπου IX και Τύπου X

Φωτιστικό	Τύπου IX	Τύπου X
Θερμοκρασία (K)	4000	3000
Φωτεινή ροή πηγής LED (lm):	33840	33500
Φωτεινή ροή Φωτιστικού (lm):	28468	28182
Βαθμός απόδοσης λειτουργίας ( $R_{LO}$ ):	84,12%	84,12%
Ισχύς (W):	222	259
Απόδοση φωτεινής πηγής (lm/W) :	128,2	108,8



Εικόνα 7.7 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου IX/X

### 7.7.1.1 Επεξεργασία και αποτελέσματα δεδομένων στον τυπικό κάρναβο E1

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση του παραπάνω φωτιστικού, μετά από προσομοίωση στο πρόγραμμα Dialux φαίνονται στον πίνακα 7.37. Ο δείκτης De προέκυψε για 4000 ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πίνακας 7.37 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο E1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Φωτιστικό :	Τύπου IX	Τύπου X
Θερμοκρασία (K):	4000	3000
$L_m$ ( $cd/m^2$ )	1,52	1,51
$U_0$	0,78	0,78
$U_l$	0,92	0,92
$TI$	10	10
$EIR$	0,84	0,84
Κατανάλωση :		
Ισχύς / χλμ ( $W/km$ ) :	11100	12950
Κατανάλωση Ενέργειας ( $kWh/year$ ):	1776	2072
$De$ ( $kWh/m^2$ έτος):	2,11	2,47
$Dp$ ( $W/lx m^2$ ) :	0,023	0,027
Κατηγορία φωτεινής έντασης:	G*1	G*1

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του εβδόμου κεφαλαίου όπως έχει ήδη αναλυθεί.:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot LSF = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,72$$

LLMF = 0,8. Η πηγή LED έχει συντελεστή συντήρησης 0,8 σύμφωνα με τον κατασκευαστή, καθώς χρησιμοποιεί drivers των 700mA.

LMF = 0,9.

LSF = 1.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι υπόλοιποι δείκτες όπως περιγράφονται στην ενότητα 7.3 όπου για την εύρεση της συνολικής φωτεινής ροής του φωτιστικού που προσπίπτει στην φωτιζόμενη επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Oxytech. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.38.

Πίνακας 7.38 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάναβο E1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Φωτιστικό :	Τύπου IX	Τύπου X
Θερμοκρασία (K):	4000	3000
$\Phi_A$ (Lm) =	8483	8398
CL =	1,060	1,071
U =	0,298	0,298
Np =	0,577	0,420
Ninst (Lm/W) =	11,632	8,840

### 7.7.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του λογισμικού Dialux είναι προφανές ότι η ολική ομοιομορφία του οδοστρώματος αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με το σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης που εξετάστηκε. Πιο συγκεκριμένα ο δείκτης  $U_0$  αυξήθηκε από την τιμή των 0,47 και έφτασε την τιμή 0,78. Έτσι η ολική ομοιομορφία της προτεινόμενης εγκατάστασης αυξήθηκε σημαντικά μετατρέποντας τη σε μια εγκατάσταση πιο φιλική για τον χρήστη. Παράλληλα, αν και δεν ήταν πρωταρχικός στόχος, η συγκεκριμένη επιλογή φωτιστικού αύξησε και το επίπεδο κατά μήκος ομοιομορφίας  $U_1$  από 0,74 σε 0,92. Συνολικά, λοιπόν, είναι μια εγκατάσταση που διακρίνεται για τις μικρές αποκλίσεις λαμπρότητας σε όλα τα σημεία του οδοστρώματος.

Προφανώς για τα παραπάνω αποτελέσματα είναι υπεύθυνο το φωτιστικό που επιλέχθηκε. Εξετάζοντας λοιπόν το πολικό του διάγραμμα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι στο επίπεδο C0 – C180 το μεγαλύτερο μέρος της φωτεινής ροής του κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των γωνιών  $-75^\circ - 75^\circ$ , φωτίζοντας έτσι ομοιόμορφα κατά μήκος του οδοστρώματος. Επίσης παρατηρείται στο επίπεδο C0 – C180 η φωτεινή ροή του Τύπου IX που προσπίπτει στο οδόστρωμα έχει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές φωτεινής έντασης (κάτω από 200 cd/klm) στο διάστημα  $-60^\circ - 60^\circ$  ενώ για τα πιο απομακρυσμένα σημεία η τιμή της φωτεινής έντασης αυξάνεται στις 250 cd/klm στα διαστήματα των γωνιών  $[-75^\circ - -60^\circ]$  και  $[75^\circ - 60^\circ]$ . Εξετάζοντας τώρα και το

διάστημα C90–C270 παρατηρούμε ότι από τις  $-15^\circ$  έως τις  $45^\circ$  η φωτεινή ροή κατανέμεται ομοιόμορφα, φωτίζοντας όλο το πλάτος του οδοστρώματος με φωτεινή ένταση ίση με  $200\text{cd/km}$ . Αποτέλεσμα αυτού του πολικού διαγράμματος είναι όλα τα σημεία του οδοστρώματος να φωτίζονται με τουλάχιστον  $200\text{cd/km}$ , ενώ όπως είναι λογικό τα σημεία που βρίσκονται ακριβώς κάτω από το φωτιστικό φωτίζονται με σχεδόν  $400\text{cd/km}$  εξαιτίας της κατανομής της φωτεινής ροής στα δυο επίπεδα. Αν συγκριθεί το παραπάνω πολικό διάγραμμα (Εικόνα 7.7) με αυτό του φωτιστικού στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης με θερμοκρασία  $4000\text{K}$  (Εικόνα 7.2) παρατηρούμε διαφορές στα επίπεδα C0-C180 και C90-C270 οι οποίες αιτιολογούν την διαφορά επιλογής του κάθε φωτιστικού σε κάθε σενάριο. Πιο συγκεκριμένα αντίθετα με το φωτιστικό *Τύπου IX*, το φωτιστικό *Τύπου I* στο επίπεδο C90 –C270 κατανέμει το μεγαλύτερο μέρος της φωτεινής του ροής μεταξύ των γωνιών  $0^\circ$  και  $30^\circ$ , φωτίζοντας περισσότερο τοπικά. Αποτέλεσμα αυτού του περιορισμένου εύρους γωνίας είναι οι υψηλές τιμές φωτεινής έντασης που εντοπίζονται στο παραπάνω εύρος  $30^\circ$ , πάνω από  $300\text{cd/km}$ , δημιουργώντας έτσι περισσότερες αντιθέσεις και ανομοιόμορφο φωτισμό, καθώς μεγάλο μέρος του πλάτους του οδοστρώματος παραμένει αφώτιστο. Αντίθετα το *Τύπου IX* όπως αναφέρθηκε φωτίζει περισσότερο ομοιόμορφα σε μεγαλύτερο πλάτος του οδοστρώματος, ενώ η περιορισμένη φωτεινή ένταση του *Τύπου IX* σε αυτό το μεγάλο εύρος γωνιών δεν δημιουργεί μεγάλες αποκλίσεις λαμπρότητας στο οδόστρωμα, καθώς το σύνολο του φωτίζεται ομοιόμορφα. Προφανώς εντελώς ανάλογη είναι η περίπτωση των φωτιστικών θερμοκρασίας  $3000\text{K}$ .

Παρόλα αυτά, ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα του δείκτη *Ninst*, προκύπτει η διαπίστωση ότι δεν πρόκειται για μια αποδοτική εγκατάσταση καθώς προκύπτει ότι ο δείκτης είναι αρκετά μειωμένος. Στη υλοποίηση για θερμοκρασία χρώματος  $4000\text{K}$  ο δείκτης *Ninst* είναι ίσος με  $11,632\text{lm/W}$  ενώ στο πρώτο σενάριο ήταν ίσος με  $40,999\text{lm/W}$ , αντίστοιχα και στην υλοποίηση των  $3000\text{K}$  ο δείκτης *Ninst* υπολογίστηκε ίσος με  $8,840\text{lm/W}$ , ενώ στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης ήταν ίσος με  $21,368\text{lm/W}$ . Η διαφορά είναι κάτι παραπάνω από εμφανής και αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός, ότι χρειάστηκε η τοποθέτηση φωτιστικών μεγαλύτερης κατανάλωσης προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του EN 13201. Έτσι μειώθηκε ο συντελεστής ενεργειακής απόδοσης του φωτιστικού *Nr* και κατά συνέπεια η συνολική απόδοση της εγκατάστασης. Η μείωση του συντελεστή απόδοσης της εγκατάστασης αιτιολογείται και από τον δείκτη χρησιμοποίησης *U* όπου είναι ίσος με  $0,298$  ενώ στο πρώτο σενάριο ήταν ίσος με  $0,539$ .

Επόμενο, λοιπόν των παραπάνω είναι η αύξηση της κατανάλωσης της εγκατάστασης όπως αποτυπώνεται στον λόγο ισχύς/χλμ που υπολογίζεται από το λογισμικό *Dialux*. Πιο συγκεκριμένα στο εξεταζόμενο σενάριο η υλοποίηση των  $4000\text{K}$  καταναλώνει  $11100\text{W/km}$ , ενώ η αντίστοιχη των  $3000\text{K}$   $12950\text{W/km}$ . Αντίθετα για τη ίδια εγκατάσταση στο οικονομικότερο σενάριο η κατανάλωση ήταν  $7600\text{W/km}$  για θερμοκρασία χρώματος  $4000\text{K}$ , ενώ για  $3000\text{K}$  ήταν  $9250\text{W/km}$ . Προφανώς αυτή η διαφορά μεταφράζεται σε αύξηση ετήσιου κόστους λειτουργίας κάτι που κάνει μια τέτοια υλοποίηση λιγότερο ελκυστική από οικονομικής άποψης, αλλά ιδανική αν εξεταστεί η οπτική άνεση του χρήστη.

### 7.7.1.3 Τεχνοοικονομική μελέτη στον τυπικό κάρναβο E1

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και τώρα για τον κάρναβο E1 πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική προσέγγιση τεχνοοικονομικής μελέτης όπου ενδεικτικά επιλέχθηκαν μήκος οδοστρώματος 1 km και 4000 ώρες λειτουργίας. Για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παραδοχές, με βάση τις οποίες υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης.

Πίνακας 7.39 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο E1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Φωτιστικό	Πλήθος	Τιμή/μονάδα	Τελικό κόστος
Τύπου IX	50	595	29750
Τύπου X	50	615	30750
Κόστος Εγκατάστασης	50	30	1500

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας αρχικά υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε ένα χρόνο και στην συνέχεια το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των drivers.

Πίνακας 7.40 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο E1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

	Τύπου IX	Τύπου X
Χρέωση Ενέργειας (€/kWh):	0,14466	0,14466
Πάγιο (€/year):	6,36	6,36
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	44400	51800
Κ Ενέργειας Ετήσιο (€) :	6429,26	7499,748

Για το κόστος λειτουργίας για τις βλάβες των driver θεωρούμε τις ίδιες προσεγγίσεις που έχουν ήδη αναλυθεί και εξηγηθεί στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης για κάρναβους κατηγορίας E1 μόνο που τώρα ο κάθε driver των 700mA κοστίζει 125 Ευρώ.

Πίνακας 7.41 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάρναβο E1 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

	Βλάβες στα 5 χρόνια		Βλάβες από 5 έως 10 χρόνια	
	Πλήθος	Κόστος (€)	Πλήθος	Κόστος (€)
Drivers	5	150	5	775

Τέλος, ο καθαρισμός κάθε φωτιστικού που βρίσκεται σε ύψος πάνω από 8m θα στοιχίσει 25€ και θα πρέπει να προστεθεί και αυτός στα λειτουργικά έξοδα και όπως έχει υπολογιστεί στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης για κάρναβους κατηγορίας E1, το ετήσιο κόστος της παραπάνω διαδικασίας είναι : 1250 €.

Όπως αναμενόταν το κόστος λειτουργίας μια τέτοιας εγκατάστασης είναι ιδιαίτερα αυξημένο καθώς το ετήσιο κόστος κατανάλωσης είναι ακριβότερο κατά 2389,26Ευρώ για την υλοποίηση των 4000K και κατά 2140,97Ευρώ για την υλοποίηση των 3000K σε σχέση με το αντίστοιχο του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης.

### 7.7.2 Δεδομένα σεναρίου στον τυπικό κάρναβο B5

Για τον κάρναβο B5 υπολογίστηκαν και εξετάστηκαν δυο υλοποιήσεις του σεναρίου μέγιστης ομοιομορφίας της λαμπρότητας μία για θερμοκρασία χρώματος 4000K και μια για 3000K. Για να επιτευχθεί ο στόχος της μέγιστης δυνατής ολικής ομοιομορφίας της λαμπρότητας της εγκατάστασης σε κάθε προσομοίωση στο λογισμικό Dialux ελεγχόταν η τιμή  $U_0$  και επιλέχθηκε το φωτιστικό με την μεγαλύτερη τιμή που παράλληλα ικανοποιεί τα κριτήρια του EN 13201.

Πιο συγκεκριμένα για τον τυπικό κάρναβο B5 ο τρόπος τοποθέτησης των φωτιστικών φαίνεται στον Πίνακα 7.42.

Πίνακας 7.42 Χαρακτηριστικά τοποθέτησης φωτιστικών κάρναβου B5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

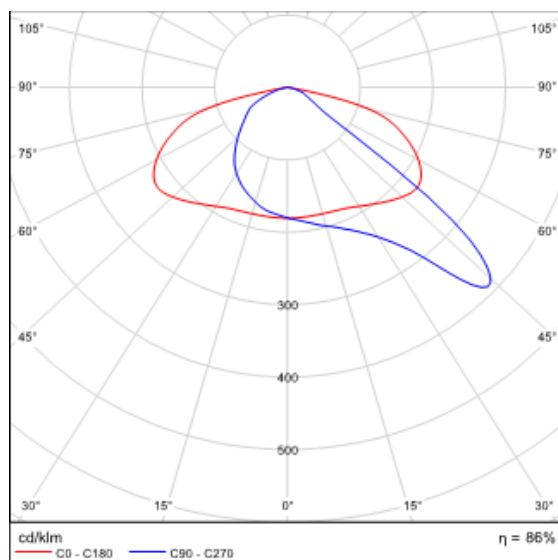
Απόσταση Ιστών (m) :	35
Ύψος Σημείου Φωτός (m) :	12,5
Κλίση :	0°
Προεξοχή Φωτεινού Σημείου (m) :	0,5
Απόσταση Ιστός - Οδόστρωμα (m):	1
Κλάση :	M3

Τα χαρακτηριστικά των φωτιστικών που χρησιμοποιήθηκαν για θερμοκρασία χρώματος 4000K και 3000K φαίνονται στον Πίνακα 7.43, ενώ το πολικό του διάγραμμα στην Εικόνα 7.8.

Πίνακας 7.43 Χαρακτηριστικά φωτιστικών Τύπου XI και Τύπου XII

Φωτιστικό	Τύπου XI	Τύπου XII
Θερμοκρασία :	4000K	3000K
Φωτεινή ροή πηγής LED (lm):	22656	23001
Φωτεινή ροή φωτιστικού (lm):	19579	19877
Βαθμός απόδοσης λειτουργίας ( $R_{LO}$ ):	86,42 %	86,42%
Ισχύς (W):	135	169
Απόδοση φωτεινής πηγής (lm/W) :	145,0	117,6

Επειδή χρησιμοποιήθηκε το ίδιο φωτιστικό και στις δυο υλοποιήσεις, απλά στην περίπτωση των 3000K εξαιτίας της χειρότερης απόδοσης του φωτιστικού επιλέχθηκε φωτιστικό μεγαλύτερης κατανάλωσης, το πολικό διάγραμμα είναι προφανώς το ίδιο και για τα δυο φωτιστικά.



Εικόνα 7.8 Πολικό διάγραμμα κατανομής φωτός του φωτιστικού Τύπου XI/XII

#### 7.7.2.1 Επεξεργασία και αποτελέσματα δεδομένων στον τυπικό κάρναβο B5

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση των παραπάνω φωτιστικών, μετά από προσομοίωση στο πρόγραμμα Dialux φαίνονται στον πίνακα 7.44. Ο δείκτης De προέκυψε για 4000 ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πίνακας 7.44 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο Dialux στον κάρναβο B5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Φωτιστικό :	Τύπου XI	Τύπου XII
Θερμοκρασία (K):	4000K	3000K
Lm (cd/m <sup>2</sup> )	1,01	1,03
U <sub>o</sub>	0,75	0,75
U <sub>l</sub>	0,82	0,82
TI	7	7
EIR	0,76	0,76
Κατανάλωση :		
Ισχύς / χλμ (W/klm) :	3915	4901
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	540	676
De (kWh/m <sup>2</sup> έτος):	2,06	2,58
Dp (W/lx m <sup>2</sup> ) :	0,035	0,043
Κατηγορία φωτεινής έντασης:	G*3	G*3

Για τον υπολογισμό του συντελεστή συντήρησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του εβδόμου κεφαλαίου όπως έχει ήδη αναλυθεί.:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot LSF = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,81$$

LLMF= 0,9. Η πηγή LED έχει συντελεστή συντήρησης 0,9 σύμφωνα με τον κατασκευαστή, καθώς χρησιμοποιεί drivers των 350 το Τύπου XI θερμοκρασίας 4000K και των 500mA το Τύπου XII θερμοκρασίας 3000K.

$$LMF = 0,9.$$

$$LSF = 1.$$

Ο συντελεστής συντήρησης για τα δύο φωτιστικά είναι κοινός, όπως προέκυψε από τους παραπάνω υπολογισμούς.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι υπόλοιποι δείκτες όπως περιγράφονται στην ενότητα 7.3 όπου για την εύρεση της συνολικής φωτεινής ροής του φωτιστικού που προσπίπτει στην φωτιζόμενη επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Oxytech. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.45.

Πίνακας 7.45 Δείκτες σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13201-5 6 στον κάρναβο Β5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Φωτιστικό :	Τύπου XI	Τύπου XII
Θερμοκρασία (K):	4000K	3000K
$\Phi_A$ (Lm) =	4969	5044
CL =	0,754	0,743
U =	0,254	0,254
Np =	1,074	0,696
Ninst (Lm/W) =	20,880	10,807

### 7.7.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό Dialux είναι προφανές ότι ο συντελεστής της ολικής ομοιομορφίας  $U_0$  είναι αισθητά βελτιωμένος συγκριτικά με τα υπόλοιπα σεναρία. Πιο συγκεκριμένα σε αυτήν την υλοποίηση η τιμή του δείκτη  $U_0$  είναι ίση με 0,75, ενώ στο σεναριο οικονομικότερης υλοποίησης η αντίστοιχη τιμή είναι ίση με 0,57. Έτσι στην προτεινόμενη εγκατάσταση οι διαφορές λαμπρότητας σε όλα τα σημεία του οδοστρώματος είναι σχετικά μικρές παρέχοντας στον χρήστη έναν ομοιόμορφο φωτισμό.

Εξετάζοντας, τώρα το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού που χρησιμοποιήθηκε, μπορεί η επιλογή του να μην φαίνεται τόσο προφανής όπως η επιλογή του Τύπου IX εξαιτίας της ομοιομορφίας που παρουσίαζε το πολικό του διάγραμμα, παρόλα αυτά το φωτιστικό Τύπου XI ήταν το ιδανικό σε αυτή την περίπτωση. Στο επίπεδο C90-C270 το φωτιστικό φωτίζει κάθετα προς το οδόστρωμα από τις  $-15^\circ$  έως τις  $30^\circ$  με μέγιστη φωτεινή ένταση περίπου τις 200cd/klm. Στην συνέχεια όμως από τις  $30^\circ$  έως τις  $45^\circ$  το φωτιστικό φωτίζει με φωτεινή ένταση από 250cd/klm έως 400 cd/klm. Έτσι αυτή η κατανομή φωτεινής ροής του έχει αποτέλεσμα τα σημεία που βρίσκονται ακριβώς από κάτω από το φωτιστικό να φωτίζονται με φωτεινή ένταση ίση με 200cd/klm, ενώ τα πιο απομακρυσμένα με



τουλάχιστον 250cd/klm μέχρι το πιο απόμακρο που αντιστοιχεί στις 45 ° με 400cd/klm. Με αυτό τον τρόπο πρακτικά φωτίζεται όλο το πλάτος του οδοστρώματος που βρίσκεται στην ευθεία του φωτιστικού. Στην συνέχεια στο επίπεδο C0-C180 από -60° μέχρι τις 60° η φωτεινή ροή μοιράζεται ομοιόμορφα κατά μήκος του οδοστρώματος με μέγιστη φωτεινή ένταση τις 200 cd/klm. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σημεία της επιφάνειας του οδοστρώματος που φωτίζονται ήδη με 200cd/klm από την κατανομή στο επίπεδο C90-C270 πλέον θα φωτίζονται με 400cd/klm όσο και τα πιο απομακρυσμένα σημεία της ευθείας του φωτιστικού στο επίπεδο C90-C270. Έτσι η φωτεινή ένταση που διοχετεύει το φωτιστικό στο οδόστρωμα δεν έχει μεγάλες αποκλίσεις, εξασφαλίζοντας μικρές αποκλίσεις λαμπρότητας οδοστρώματος.

Όσον αφορά την ολική αποδοτικότητα της εγκατάστασης με θερμοκρασία χρώματος 4000K είναι φανερά μειωμένη  $N_{inst}=20,88lm/W$  σε σχέση με την αντίστοιχη του σεναρίου οικονομική αποδοτικότητα ( $N_{inst}=83,85lm/W$ ) και αυτό οφείλεται κυρίως στο συντέλεσή χρησιμοποίησης  $U=0,254$  που είναι μισός σχετικά με αυτό στο πρώτο σενάριο ( $U=0,481$ ) αλλά και στον συντελεστή ενεργειακής απόδοσης του φωτιστικού. Ο συντελεστής ενεργειακής απόδοσης είναι εμφανώς μειωμένος, καθώς χρησιμοποιήθηκε φωτιστικό υψηλότερης κατανάλωσης προκειμένου να ικανοποιηθούν τα κριτήρια του EN13201. Αντίστοιχα παρόμοια μείωση της αποδοτικότητας της εγκατάστασης παρατηρούμε και στην υλοποίηση των 3000K κυρίως για τους ίδιους λόγους.

Προφανώς με βάση τα παραπάνω η προτεινόμενη εγκατάσταση έχει αυξημένη κατανάλωση ενέργειας κάτι που είναι ορατό στον λόγο ισχύς/χλμ όπου είναι ίσος με 3915W/km, ενώ στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης ήταν ίσος με 1856W/km, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν διπλάσια η κατανάλωση ανά χιλιόμετρο στην υλοποίηση με θερμοκρασία χρώματος 4000K. Αντίστοιχα σχεδόν υπερδιπλάσια ήταν και η κατανάλωση στην αντίστοιχη υλοποίηση των 3000K.

### 7.7.2.3 Τεχνοοικονομική μελέτη σεναρίου στον τυπικό κάρναβο Β5

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και τώρα για τον κάρναβο Β5 πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική προσέγγιση τεχνοοικονομικής μελέτης όπου ενδεικτικά επιλέχθηκαν μήκος οδοστρώματος 1 km και 4000 ώρες λειτουργίας. Για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παραδοχές, με βάση τις οποίες υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης

Πίνακας 7.46 Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

Φωτιστικό	Πλήθος	Τιμή(€) / μονάδα	Τελικό κόστος
Τύπου XI	29	580	16820
Τύπου XII	29	580	16820
Κόστος Εγκατάστασης (€)	29	30	857

Στην συνέχεια, για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας αρχικά υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας σε ένα χρόνο και στην συνέχεια το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των drivers.

Πίνακας 7.47 Κόστος λειτουργίας φωτιστικών στον κάρναβο Β5 σεναρίου μεγιστοποίησης ομοιομορφίας της λαμπρότητας

	Τύπου XI	Τύπου XII
Χρέωση Ενέργειας (€/kWh):	0,14466	0,14466
Πάγιο (€/year):	6,36	6,36
Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/year):	15660	19064
Κ Ενέργειας Ετήσιο (€) :	2271,73	2842,27

Για το κόστος λειτουργίας για τις βλάβες των driver θεωρούμε τις ίδιες προσεγγίσεις που έχουν ήδη αναλυθεί και εξηγηθεί στο σενάριο της οικονομικότερης υλοποίησης για κάρναβους κατηγορίας Β5 μόνο που τώρα ο κάθε driver των 350mA κοστίζει 75Ευρώ και ο driver των 500mA κοστίζει 100Ευρώ.

Πίνακας 7.48 Κόστος αντικατάστασης Driver στον κάρναβο Β5 σεναρίου μέγιστης ομοιομορφίας

	Βλάβες στα 5 χρόνια		Βλάβες από 5 έως 10 χρόνια	
	Πλήθος	Κόστος (€)	Πλήθος	Κόστος (€)
Drivers 350mA	3	90	3	315
Drivers 500mA	3	90	3	390

Τέλος, ο καθαρισμός κάθε φωτιστικού που βρίσκεται σε ύψος πάνω από 8m θα στοιχίσει 25€ και θα πρέπει να προστεθεί και αυτός στα λειτουργικά έξοδα και όπως έχει υπολογιστεί στο σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης για κάρναβους κατηγορίας Β5 το ετήσιο κόστος της παραπάνω διαδικασίας είναι : 714 €.

Όπως αναμενόταν το κόστος λειτουργίας μια τέτοιας εγκατάστασης είναι ακριβότερο, καθώς το ετήσιο κόστος κατανάλωσης είναι φανερά αυξημένο. Πιο αναλυτικά η υλοποίηση των 4000K έχει ετήσιο κόστος ενέργειας ίσο με 2271,73€ ενώ η αντίστοιχη υλοποίηση της στο οικονομικότερο σενάριο έχει κόστος μόλις 1080,31€. Αντίστοιχα η υλοποίηση των 3000K έχει ετήσιο κόστος ενέργειας ίσο με 2842,27€, που είναι αρκετά ακριβότερο από τα 1298,46€ του πρώτου σεναρίου. Αν σε αυτό το ήδη αυξημένο κόστος προσθέσουμε και το ανεβασμένο κόστος αγοράς φωτιστικών είναι προφανές ότι αυτή η υλοποίηση είναι αρκετά πιο δαπανηρή και θα πρέπει να γίνουν οικονομικές υπερβάσεις από την μεριά του υπεύθυνου για την υλοποίηση της εγκατάστασης.

Τέλος, η διαφορά κατανάλωσης μεταξύ της υλοποίησης των 3000K και των 4000K είναι ακόμα μια φορά εμφανής, καθώς σε ένα χρόνο καταναλώνεται ενέργεια ίση με 15660kWh στην υλοποίηση των 4000K, ενώ αυτή η κατανάλωση αυξάνεται στις 19064kWh στην υλοποίηση των 3000K.

## **Βιβλιογραφία**

1. ΕΛΟΤ EN 13201-2 2<sup>η</sup> έκδοση
2. [www.dialux.com](http://www.dialux.com)
3. [www.schreeder.com](http://www.schreeder.com)
4. [www.oxytech.com](http://www.oxytech.com)

## Κεφάλαιο Όγδοο: Πολυκριτηριακή ανάλυση δεδομένων

### 8.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία πολυκριτήριας ανάλυσης, περιλαμβάνει την λήψη μίας απόφασης λαμβάνοντας υπ' όψιν ένα ή περισσότερα συνήθως αντικρουόμενα κριτήρια. Προβλήματα που απαιτούν μια τέτοια αντιμετώπιση είναι πολλά και καθημερινά όπως για παράδειγμα η αγορά ενός αυτοκινήτου ή ενός σπιτιού, περιλαμβάνει διαφορές παραμέτρους όπως τιμή, μέγεθος, ασφάλεια άνεση κλπ. Προφανώς στον κόσμο των επιχειρήσεων αυτά τα προβλήματα μεγεθύνονται και οι παράμετροι περιπλέκονται περισσότερο [1].

Μία πρώτη προσέγγιση σε πρώιμο αρκετά στάδιο πραγματοποιήθηκε από τον Βενιαμίν Φραγκλίνο (1706-1790), ο οποίος είχε υιοθετήσει ένα απλό σύστημα όταν καλούταν να λάβει μια σημαντική απόφαση. Το σύστημα αυτό περιλάμβανε την καταγραφή των επιχειρημάτων της μίας άποψης σε ένα φύλλο και στην πίσω όψη τα αντεπιχειρήματά τους. Στην συνέχεια, έσβηνε τα επιχειρήματα κάθε όψης, όπου θεωρούσε ότι ήταν το ίδιο σημαντικά. Έτσι στο τέλος, η σελίδα που είχε τα περισσότερα επιχειρήματα ήταν και η άποψη που τελικά θα υιοθετούσε. Η πρώτη, όμως, τεκμηριωμένη επιστημονική προσπάθεια για επίλυση προβλημάτων που περιλάμβαναν πολλά κριτήρια έγινε το 1896 από τον Pareto, ο οποίος εισήγαγε βασικές αρχές της πολυκριτηριακής ανάλυσης αλλά ίσως και την βασικότερη έννοια της «την έννοια της αποδοτικότητας» [2]. Με το πέρασμα των ετών ασχολήθηκαν αρκετοί ερευνητές, όπως οι Von Neymann και Morgenstern το 1944 οι οποίοι ασχολήθηκαν με την θεωρία της χρησιμότητας, ενώ το 1955 οι Charnes, Cooper και Ferguson δημοσίευσαν ένα άρθρο σχετικά με την ανάγκη ύπαρξης ενός στόχου προγραμματισμού όπου επηρέασε αρκετούς ερευνητές. Όμως η σημαντικότερη ανάπτυξη σημειώθηκε μετά το 1970, καθώς η ανάπτυξη της πληροφορικής και των υπολογιστών βοήθησε σημαντικά στην περαιτέρω ανάπτυξη της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Έτσι παρόλο που τέτοιου είδους προβλήματα (MCDM – multiple criteria decision making) είναι καθημερινά η αυστηρή έννοια του όρου έχει σχετικά μικρή ιστορία περίπου 40 χρόνων. Η ανάπτυξη των υπολογιστών βοήθησε στην συστηματική αξιολόγηση περίπλοκων MCDM προβλημάτων, ενώ παράλληλα ο μεγάλος όγκος πληροφοριών που δημιουργήθηκαν εξαιτίας των υπολογιστών και του ίντερνετ έκανε ακόμα πιο σημαντική μια πολυκριτηριακή ανάλυση για την λύση προβλημάτων στον κόσμο των επιχειρήσεων.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 ο Bernard Roy ανέπτυξε την θεωρία σχέσεων υπεροχής (outranking relations) και θεωρήθηκε ιδρυτής της ευρωπαϊκής σχολής της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η βασική ιδέα της θεωρίας του περιλάμβανε την δημιουργία ενός άμεσου δικτύου προτιμήσεων. Με την χρησιμοποίηση του προκύπτει ένα σύνολο αποφάσεων υπεροχής ή απόφασης που θεωρούνται καλύτερες. Μάλιστα ο Roy το 1994 όρισε την πολυκριτηριακή ανάλυση ως την διαδικασία όπου ο βασικός στόχος δεν είναι να ανακαλύψουμε μια λύση αλλά να δημιουργήσουμε ή να κατασκευάσουμε κάτι το οποίο να θεωρείται ικανό να βοηθήσει κάποιον ενδιαφερόμενο να λάβει μέρος στη διαδικασία λήψης της απόφασης, άλλοτε για να διαμορφώσει και άλλοτε για να μεταβάλλει τις προτιμήσεις του ή να αποφασίσει σε συμφωνία με τους τελικούς στόχους.

### 8.1.1 Δομή πολυκριτηριακής ανάλυσης

Η πολυκριτηριακή ανάλυση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ορίζεται ως μια συστηματική και μαθηματική τυποποιημένη προσέγγιση με βασικό στόχο την επίλυση ενός προβλήματος το οποίο περιλαμβάνει αντικρουόμενους στόχους.

Η επίλυση πολύπλοκων και ιδιαίτερα σημαντικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων πρέπει να πραγματοποιείται μέσω πολύπλευρης και πολυδιάστατης ανάλυσης. Η εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορεί να μην έχει ως αποτέλεσμα την βέλτιστη λύση καθώς οι διαθέσιμες επιλογές σε ένα τέτοιο πρόβλημα παρουσιάζουν άριστη επίδοση μόνο ως προς έναν ή περισσότερους (αλλά ποτέ ως προς όλους) τους στόχους, αλλά διευκολύνει να παρθούν ικανοποιητικές αποφάσεις οι οποίες ανταποκρίνονται στον βασικό στόχο. Έτσι η πολυκριτηριακή ανάλυση λαμβάνει υπ' όψιν πολλά κριτήρια πριν προκύψει η τελική λύση. Είναι αναγκαίος λοιπόν ένας συμβιβασμός μεταξύ των αλληλοσυγκρουόμενων στόχων. Πρέπει δηλαδή ο υπεύθυνος για τη λήψη της απόφασης να επιλέξει τον ή τους στόχους, τους οποίους επιθυμεί να μεγιστοποιήσει, καθώς και τις αντισταθμιστικές απώλειες που είναι διατεθειμένος να αποδεχθεί ως προς τους υπόλοιπους στόχους.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση είναι χρήσιμη, διότι αντιμετωπίζει προβλήματα που είτε υπάρχουν αντικρουόμενοι στόχοι, είτε δεν υπάρχει αντικειμενικός τρόπος μέτρησης επίδοσης των κριτηρίων. Η πολυκριτηριακή ανάλυση λαμβάνει υπ' όψιν όλες τις παραμέτρους προκειμένου να προκύψει ένα ορθολογικό αποτέλεσμα, ενώ παράλληλα διαφοροποιείται από άλλες προσεγγίσεις καθώς ο τρόπος επιλογής του αποτελέσματος εξαρτάται από τις αποφάσεις που θα λάβει ο υπεύθυνος της διαδικασίας με βάση τους στόχους και τις προτιμήσεις του.

Ο Bernard Roy τόνισε ότι ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα αποτελείται από τρεις βασικές παραμέτρους: [3]

- Ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ . Οι ενέργειες πρέπει να είναι πεπερασμένες και καλά ορισμένες.
- Ένα δίκτυο κριτηρίων  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ . Κάθε κριτήριο αναπαριστά μία πραγματική συνάρτηση που ορίζεται στο σύνολο  $A$ , με τρόπο ώστε να επιτρέπει την σύγκριση των εναλλακτικών  $a_1$  και  $a_2$  μέσω της χρήσης των μεγεθών  $g_j(a_1)$   $g_j(a_2)$ .
- Όλα τα μεγέθη των εναλλακτικών ενεργειών ως προς τα κριτήρια αποτυπώνονται στον πολυκριτηριακό πίνακα, όπου οι γραμμές αναφέρονται στα κριτήρια και οι στήλες στις εναλλακτικές ενέργειες.

Τα θετικά μίας πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η ευκολία που προσφέρει στην αναπαράσταση πολυδιάστατων προβλημάτων, ενώ παράλληλα είναι και μια ευέλικτη μέθοδος που επιτρέπει την διαφορετική επίδραση διαφορετικών κριτηρίων στο τελικό αποτέλεσμα. Τέλος, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς απλοποιεί την αξιολόγηση μη μετρήσιμων μεγεθών.

Αντίθετα στα αρνητικά θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η πολυπλοκότητα που προκύπτει στην κατανομή των συντελεστών βαρύτητας αλλά και ότι η επιλογή τους κατευθύνεται από τον ανθρώπινο παράγοντα. Τέλος, οι λύσεις που προκύπτουν συνήθως δεν είναι ιδανικές αλλά συμβιβαστικές.

### 8.1.2 Λύσεις ενός πολυκριτηριακού προβλήματος

Τα MCDM προβλήματα δεν έχουν πάντα μία μοναδική λύση. Έτσι έχουν δοθεί διαφορετικά ονόματα σε κάθε λύση λαμβάνοντας υπ' όψιν την φύση της λύσης.

- **Ιδανική λύση:** Όλα τα κριτήρια σε ένα MCDM πρόβλημα μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Τα κριτήρια που συνήθως μεγιστοποιούνται είναι αυτά που ανήκουν στις κατηγορίες κέρδους, παρόλο που δεν είναι ανάγκη να ανήκουν πάντα σε αυτές τις κατηγορίες. Αντιστοίχως τα κριτήρια που ελαχιστοποιούνται είναι αυτά που ανήκουν στην κατηγορία κόστους. Μια ιδανική λύση προϋποθέτει την μεγιστοποίηση όλων των κριτηρίων κέρδους και την ελαχιστοποίηση των κριτηρίων κόστους. Λογικά όμως μία τέτοια λύση δεν είναι εφικτή.
- **Μη κυρίαρχη λύση:** Όταν η ιδανική λύση δεν είναι εφικτή, ο λήπτης της απόφασης θα πρέπει να εξετάζει μη κυρίαρχες λύσεις. Μια εναλλακτική λύση είναι κυρίαρχη εάν υπάρχουν άλλες εναλλακτικές που είναι ανώτερες από αυτήν σε μια τουλάχιστον κατηγορία και το ίδιο καλές στις υπόλοιπες κατηγορίες. Μια εναλλακτική λέγεται μη κυρίαρχη, αν δεν κυριαρχείται από άλλες εναλλακτικές.
- **Ικανοποιητική λύση:** Οι ικανοποιητικές λύσεις είναι ένα υποσύνολο από όλες τις πιθανές λύσεις που είναι ανώτερες από όλα τα αναμενόμενα κριτήρια. Αν η λύση είναι ικανοποιητική εξαρτάται από τον λήπτη της απόφασης.
- **Λύσεις Προτίμησης:** Είναι μία μη κυρίαρχη λύση που ικανοποιεί καλύτερα τις προσδοκίες του λήπτη της απόφασης.

## 8.2 Μέθοδος AHP

Η μέθοδος Analytic Hierarchy Process (AHP) αναπτύχθηκε από τον Thomas Satty (1980) και αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων απόφασης βοηθώντας τον λήπτη της απόφασης να ορίσει προτεραιότητες προκειμένου να λάβει την σωστή απόφαση. Πρακτικά η μέθοδος AHP μειώνει την πολυπλοκότητα της απόφασης καθώς πραγματοποιεί συγκρίσεις ανά ζεύγη το αποτέλεσμα των οποίων, συνθέτει η μέθοδος AHP βοηθώντας να ληφθούν υπ' όψιν οι υποκειμενικές και οι αντικειμενικές πτυχές μιας απόφασης [4], [5].

Η μέθοδος AHP περιλαμβάνει ένα σύνολο από κριτήρια αξιολόγησης και ένα σύνολο από εναλλακτικές επιλογές από τις οποίες επιλέγεται η καλύτερη απόφαση. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα κριτήρια μπορεί να είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους, ενώ η καλύτερη επιλογή δεν είναι πάντα αυτή που μεγιστοποιεί κάθε κριτήριο ξεχωριστά. Αντίθετα ιδανική επιλογή είναι αυτή που επιτυγχάνει την χρυσή τομή μεταξύ των κριτηρίων.

Με την χρησιμοποίηση της μεθόδου AHP υπολογίζεται ένα βάρος για κάθε κριτήριο αξιολόγησης, το οποίο αποφασίζεται από τις προτιμήσεις του λήπτη της απόφασης όταν τα συγκρίνει ανά ζεύγη. Όσο υψηλότερο είναι το βάρος τόσο πιο σημαντικό ρόλο έχει ένα κριτήριο κατά την λήψη της απόφασης. Στην συνέχεια, για ένα σταθερό κριτήριο, η μέθοδος AHP καθορίζει μία τιμή αξιολόγησης κάθε εναλλακτικής επιλογής, το οποίο προκύπτει από την δυαδική σύγκριση των εναλλακτικών με βάση το εκάστοτε κριτήριο. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή αξιολόγησης, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση της εναλλακτικής όσον αφορά το συγκεκριμένο κριτήριο. Τελικώς, η AHP συνδυάζει τα βάρη των κριτηρίων με τις τιμές αξιολόγησης και προκύπτει μία τελική τιμή για κάθε επιλογή και συνεπώς μια κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών. Η τελική τιμή κάθε εναλλακτικής επιλογής προκύπτει από το άθροισμα των τιμών αξιολόγησης.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος AHP στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί μόνο για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων, ενώ η κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών θα γίνει με την μέθοδο PROMETHEE (Κεφάλαιο 8.4).

## 8.3 Στάδια AHP

Η μέθοδος AHP μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια :

- Υπολογισμός του βάρους κάθε κριτηρίου.
- Υπολογισμός του πίνακα τιμής αξιολόγησης.
- Κατάταξη.



### 8.3.1 Υπολογισμός βάρους κριτηρίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί προκειμένου να υπολογιστούν τα βάρη των κριτηρίων η μέθοδος AHP ένα πίνακα δυαδικών συγκρίσεων  $A$ . Ο τετραγωνικός πίνακας  $A$  είναι διαστάσεων  $N \times N$  όπου  $N$  είναι ο αριθμός των κριτηρίων που έχουν χρησιμοποιηθεί. Κάθε κελί  $a_{j,k}$  του πίνακα  $A$  αντιπροσωπεύει το πόσο πιο σημαντικό είναι το  $j$  κριτήριο σε σχέση με το  $k$  κριτήριο. Οι συγκρίσεις από τις οποίες προκύπτει το πόσο πιο σημαντικό είναι ένα κριτήριο βασίζονται, στην κρίση του χρήστη της μεθόδου και πολλές φορές σε κριτήρια τα οποία είναι ακαθόριστα. Ο Saaty, λοιπόν προκειμένου να διευκολύνει αυτή την σύγκριση των κριτηρίων δημιούργησε μία θεμελιώδη κλίμακα απόλυτων αριθμών. Η κλίμακα αυτή προέρχεται από βασικές αρχές και αξιώματα όπου δημοσιεύθηκε από τον Saaty το 1986.

Το αποτέλεσμα της σχετικής σύγκρισης είναι ένας αριθμός από την κλίμακα των απόλυτων αριθμών (Πίνακας 8.1) από το 1 έως το 9. Έτσι ανάλογα πόσο πιο σημαντικό θεωρείται ένα κριτήριο έναντι του αντίστοιχου με το οποίο συγκρίνεται, τοποθετείται και ο ανάλογος αριθμός στον πίνακα. Αν η τιμή του κελιού  $a_{j,k}$  είναι μεγαλύτερη από το 1 τότε  $j$  κριτήριο είναι πιο σημαντικό από το  $k$  κριτήριο, ενώ αν η τιμή του κελιού  $a_{j,k}$  είναι μικρότερη από το 1 τότε  $k$  κριτήριο είναι λιγότερο σημαντικό από το  $j$  κριτήριο. Αν δύο κριτήρια έχουν τον ίδιο βαθμό σημαντικότητας τότε η τιμή του κελιού  $a_{j,k}$  είναι ίση με 1. Προφανώς οι τιμές των κελιών  $a_{j,k}$  και  $a_{k,j}$  ικανοποιούν την ακόλουθη συνθήκη :

$$a_{j,k} \cdot a_{k,j} = 1$$

Πίνακας 8.1 Κλίμακα απόλυτων αριθμών

Τιμή του $a_{j,k}$	Ερμηνεία
1	Το $j$ και $k$ είναι το ίδιο σημαντικά
3	Το $j$ είναι ελαφρώς πιο σημαντικό από το $k$
5	Το $j$ είναι πιο σημαντικό από το $k$
7	Το $j$ είναι αρκετά πιο σημαντικό από το $k$
9	Το $j$ είναι πολύ πιο σημαντικό από το $k$
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές

Όταν δημιουργηθεί ο πίνακας  $A$ , εξάγεται από τον  $A$  ένας κανονικοποιημένος πίνακας δυαδικών συγκρίσεων  $A'$  όπου το άθροισμα κάθε στήλης είναι ίσο με 1. Πιο συγκεκριμένα κάθε κελί  $\alpha'_{j,k}$  του νέου πίνακα υπολογίζεται από την σχέση :

$$\alpha'_{j,k} = \frac{a_{j,k}}{\sum_{l=1}^N a_{l,k}}$$

Τελικώς, το βάρος των κριτηρίων  $W$  υπολογίζεται από τον μέσο όρο κάθε σειράς του πίνακα  $A'$ .

$$W_j = \frac{\sum_{l=1}^N \alpha'_{l,k}}{N}$$

### 8.3.2 Υπολογισμός πίνακα τιμών αξιολόγησης εναλλακτικών επιλογών

Ο πίνακας  $S$  των τιμών αξιολόγησης είναι μεγέθους  $M \times N$ . Κάθε κελί  $s_{ij}$  του πίνακα  $S$  αντιπροσωπεύει την τιμή αξιολόγησης του  $i$  εναλλακτικού σεναρίου σε σχέση με το  $j$  κριτήριο. Για να προκύψουν αυτές οι τιμές, δημιουργείται ένας πίνακας  $B^{(j)}$  για κάθε ένα από τα  $N$  κριτήρια,  $j=1,2,3,\dots,N$ . Ο πίνακας  $B^{(j)}$  είναι διαστάσεων  $M \times M$ , όπου  $M$  είναι ο αριθμός των εναλλακτικών σεναρίων που εξετάστηκαν. Κάθε καταχώρηση  $b_{ih}^{(j)}$  του πίνακα  $B^{(j)}$   $M \times M$  αναπαριστά το αποτέλεσμα της αξιολόγησης της  $i$  εναλλακτικής συγκρινόμενη με την  $h$  με βάση πάντα το εκάστοτε σενάριο. Αν  $b_{ih}^{(j)} > 1$  τότε η  $i$  εναλλακτική είναι καλύτερη από την  $h$ , ενώ τα ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν αν  $b_{ih}^{(j)} < 1$ . Για την δημιουργία αυτού του πίνακα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία κλίμακα σαν αυτή που παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.1. Και σε αυτόν τον πίνακα ισχύει η σχέση :

$$b_{ih}^{(j)} \cdot b_{hi}^{(j)} = 1$$

Στην συνέχεια, εφαρμόζεται σε κάθε πίνακα  $B^{(j)}$  η ίδια διαδικασία δυο βημάτων όπως περιγράφηκε για τον δυαδικό πίνακα συγκρίσεων  $A$ . Πιο συγκεκριμένα, διαιρείται κάθε κελί του αρχικού πίνακα από το άθροισμα των κελιών της ίδιας στήλης και στην συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος κάθε σειράς, υπολογίζοντας έτσι τα ιδιοδιάνυσμα  $s^{(j)}$ ,  $j=1,2,3,\dots,N$ . Το  $s^{(j)}$  ιδιοδιάνυσμα περιέχει τις τιμές αξιολόγησης των εναλλακτικών σεναρίων με βάση το  $j$  κριτήριο. Τελικώς, ο πίνακας τιμών αξιολόγησης  $S$  είναι ο παρακάτω :

$$S = [s^{(1)}, s^{(2)}, s^{(3)} \dots s^{(N)}]$$

### 8.3.3 Κατάταξη εναλλακτικών επιλογών.

Μόλις υπολογισθούν το βάρος των κριτηρίων  $w$  και ο πίνακας τιμών  $S$ , η ΑΗΡ υπολογίζει ένα ίδιο διάνυσμα  $v$  της τελικής τιμής αξιολόγησης με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$v = S \cdot w$$

Η  $v_i$  αντιπροσωπεύει την τελική τιμή αξιολόγησης της  $i$  εναλλακτικής επιλογής. Στο τελικό στάδιο κατατάσσονται τα αποτελέσματα σε φθίνουσα σειρά και επιλέγεται το σενάριο με την μεγαλύτερη τελική τιμή.

## 8.4 PROMETHEE

### 8.4.1 Ιστορική αναδρομή

Η μέθοδος PROMETHEE I (μερικής κατάταξης) και η PROMETHEE II (πλήρης κατάταξη) αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν από τον J.P Brans για πρώτη φορά το 1982 σε ένα συνέδριο που οργανώθηκε στο πανεπιστήμιο Laval του Κεμπέκ στον Καναδά. Μερικά χρόνια αργότερα ο J.P Brans και ο B.Marescal ανέπτυξαν την PROMETHEE III (επιτρέπει την προσέγγιση προβλημάτων σε στοχαστικό περιβάλλον απόφασης) και την PROMETHEE IIII (επιτρέπει την αντιμετώπιση προβλημάτων αξιολόγησης μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων). Οι ίδιοι συγγραφείς πρότειναν το 1988 μια μέθοδο γραφικής απεικόνισης του προβλήματος GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Assistanse). Το 1992 και το 1994 οι J.P Brans και B.Marescal πρότειναν δυο ακόμα επεκτάσεις: PROMETHEE V (πλαίσιο για την αντιμετώπιση κατανομής πόρων) PROMETHEE VI (διενέργεια αναλύσεων ευαισθησίας) [6], [7].

### 8.4.2 Εισαγωγή

Η PROMETHEE (Prefence Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων υπεροχής που αναπτύχθηκαν από τον B.Roy και περιλαμβάνει δυο φάσεις:

- Την δημιουργία σχέσεων υπεροχής.
- Την εκμετάλλευση αυτών των σχέσεων προκειμένου να βρεθεί λύση στο πρόβλημα.

Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα χαρακτηρίζεται από ένα πίνακα απόφασης, που αποτελείται από:

- $A = [ a_1, a_2, a_3, \dots, a_n ]$  το σύνολο των εναλλακτικών σεναρίων.
- $F = [ f(a_1), f(a_2) \dots f(a_k) ]$  το σύνολο των κριτηρίων απόφασης.

Πίνακας 8.2 Πίνακας απόφασης

a	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	.....	f <sub>j</sub>	.....	f <sub>k</sub>
a <sub>1</sub>	f <sub>1</sub> (a <sub>1</sub> )	f <sub>2</sub> (a <sub>1</sub> )	.....	f <sub>j</sub> (a <sub>1</sub> )	.....	f <sub>k</sub> (a <sub>1</sub> )
a <sub>2</sub>	f <sub>1</sub> (a <sub>2</sub> )	f <sub>2</sub> (a <sub>2</sub> )	.....	f <sub>j</sub> (a <sub>2</sub> )	.....	f <sub>k</sub> (a <sub>2</sub> )
...			.....		.....	
a <sub>i</sub>	f <sub>1</sub> (a <sub>i</sub> )	f <sub>2</sub> (a <sub>i</sub> )	.....	f <sub>j</sub> (a <sub>i</sub> )	.....	f <sub>k</sub> (a <sub>i</sub> )
....			.....		.....	.....
a <sub>n</sub>	f <sub>1</sub> (a <sub>n</sub> )	f <sub>2</sub> (a <sub>n</sub> )	.....	f <sub>j</sub> (a <sub>n</sub> )	.....	f <sub>k</sub> (a <sub>n</sub> )

Η λύση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν εξαρτάται μόνο από τα βασικά δεδομένα αλλά και από τον ίδιο τον λήπτη της απόφασης. Δεν υπάρχει λοιπόν τέλεια λύση, αλλά αντίθετα πρόκειται για την καλύτερη συμβιβαστική λύση που στηρίζεται στις προτιμήσεις του λήπτη της απόφασης. Όλες οι μέθοδοι πολυκριτηριακής απόφασης αρχίζουν από τον πίνακα αξιολόγησης, αλλά διαφοροποιούνται με βάση τις επιπλέον πληροφορίες που απαιτούν. Η μέθοδος PROMETHEE απαιτεί πολύ συγκεκριμένες επιπλέον

πληροφορίες, οι οποίες είναι εύκολο να αποκτηθούν και να κατανοηθούν από τον αναλυτή και από τον λήπτη της απόφασης.

Ο σκοπός όλων των πολυκριτηριακών μεθόδων είναι να περιορίσουν την ασυμβατότητα των εξεταζόμενων σεναρίων και αν είναι δυνατόν να περιοριστεί το πολυκριτηριακό πρόβλημα σε πρόβλημα ενός κριτηρίου όπου υπάρχει η καλύτερη δυνατή λύση. Κάτι τέτοιο μπορεί να φαίνεται υπερβολικό καθώς απαιτεί σημαντικές υποθέσεις και μεταβάλλει τελείως την δομή ενός πολυκριτηριακού προβλήματος. Γι' αυτό το λόγο ο B. Roy πρότεινε την δημιουργία σχέσεων υπεροχής που περιλαμβάνουν μόνο εμπλουτισμένες ρεαλιστικές κυρίαρχες σχέσεις. Η μέθοδος PROMETHEE ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων σχέσεων υπεροχής και για την υλοποίηση της πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις:

- Προϋπόθεση 1: Το εύρος της διαφοράς μεταξύ δύο επιδόσεων των εναλλακτικών σεναρίων πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν όταν αξιολογούνται δυο σενάρια. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά των επιδόσεων των σεναρίων  $d_j(a,b)$  για κάθε κριτήριο  $f_j$  της ανάλυσης θα είναι :  $d_j(a,b) = f_j(a) - f_j(b)$ .
- Προϋπόθεση 2: Οι επιδόσεις των εναλλακτικών κάθε κριτηρίου  $f_j(a)$  πρέπει να κανονικοποιούνται για να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα των διαφορετικών κλιμάκων μέτρησης των κριτηρίων.
- Προϋπόθεση 3: Κατά την δυαδική σύγκριση δύο σεναρίων το αποτέλεσμα που θα πρέπει να δίνεται από κάθε πολυκριτηριακή μέθοδο θα πρέπει να είναι ένα από τα παρακάτω :
  - Η προτίμηση του ενός έναντι του άλλου (aPb).
  - Η ασυμβατότητα των εξεταζόμενων σεναρίων (aRb).
  - Η ισοδυναμία (αδιαφορία) μεταξύ των σεναρίων (aIb).

Ο σκοπός είναι προφανώς η μείωση όσο το δυνατόν περισσότερων κριτηρίων ασυμβατότητας, αλλά όταν αυτά δεν είναι ρεαλιστικά. Τότε η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως δίκαιη.

- Προϋπόθεση 4: Διαφορετικές πολυκριτηριακές μέθοδοι απαιτούν επιπλέον πληροφορίες και χρησιμοποιούν διαφορετικές υπολογιστικές μεθόδους, έτσι οι λύσεις μπορεί να διαφέρουν. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει οι μέθοδοι να είναι κατανοητές από τους λήπτες απόφασης.
- Προϋπόθεση 5: Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος δεν πρέπει να περιλαμβάνει τεχνικές παραμέτρους, οι οποίες είναι ασήμαντες για τον λήπτη της απόφασης.
- Προϋπόθεση 6: Μία κατάλληλη μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες για αντικρουόμενα κριτήρια.
- Προϋπόθεση 7: Πρέπει επίσης να υπάρχει ξεκάθαρη άποψη για την βαρύτητα των κριτηρίων ανάλυσης.

Η μέθοδος PROMETHEE δεν υπολογίζει την σχετική επικράτηση  $w_j$  των κριτηρίων ανάλυσης, θεωρώντας ότι η πληροφορία αυτή είναι ήδη διαθέσιμη από τους λήπτες απόφασης με μοναδική προϋπόθεση ότι ισχύει η σχέση :

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1$$

### 8.4.3 Μέθοδος PROMETHEE

Η μέθοδος PROMETHEE χρησιμοποιεί τους πίνακες δυαδικών συγκρίσεων των εναλλακτικών σεναρίων, προκειμένου να αποφασιστεί η απόδοση εναλλακτικών σεναρίων από τους λήπτες απόφασης. Οι πίνακες δυαδικών συγκρίσεων περιέχουν την διαφορά των επιδόσεων των σεναρίων  $d_j(a,b)$  για κάθε κριτήριο  $f_j$  μέσω της σχέσης :

$$d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b)$$

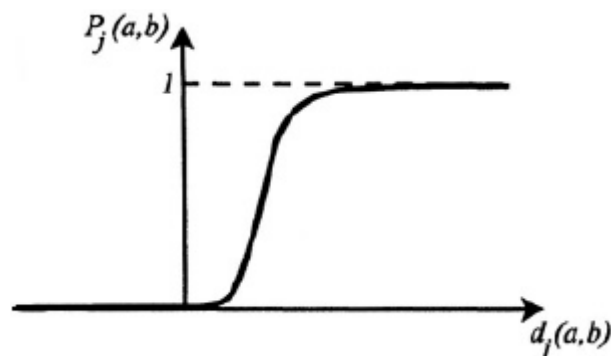
Η διαφορά δύο επιδόσεων των εναλλακτικών σεναρίων ενός συγκεκριμένου κριτηρίου πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν. Για παράδειγμα για μικρή τιμή διαφοράς θα πρέπει, ο λήπτης απόφασης να υιοθετήσει μια μικρή προτίμηση της καλύτερης εναλλακτικής ή ακόμα και καμία ιδιαίτερη προτίμηση αν θεωρεί ότι η διαφορά είναι αμελητέα. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός προτίμησης. Επίσης, σημαντική είναι και η αναγωγή των διαφορών που καταγράφονται στις επιδόσεις των εναλλακτικών σεναρίων σε κοινή κλίμακα μέτρησης  $P_j$  για κάθε κριτήριο της ανάλυσης κάτι που επιτυγχάνεται με την χρήση συναρτησιακών σχέσεων  $F_j$  και για τις οποίες ισχύει:

$$P_j(a, b) = F [d_j(a, b)] = F_j [f_j(a) - f_j(b) ]$$

$$0 < P_j(a,b) < 1$$

Ένα κριτήριο μπορεί να είναι αύξον ή φθίνον. Όταν ένα κριτήριο είναι αύξον και η επίδοση του  $a$  είναι μεγαλύτερη από την επίδοση του  $b$ , τότε η προτίμηση της  $a$  έναντι της  $b$  υπολογίζεται από την σχέση 11. Η προτίμηση θα έχει την τιμή 0 εάν η τιμή της διαφοράς είναι αρνητική.

$$P_j(a, b) \geq 0 \rightarrow P_j(b,a) = 0$$



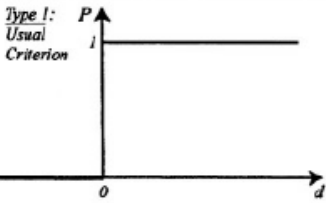
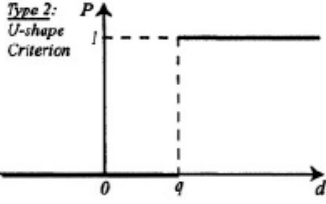
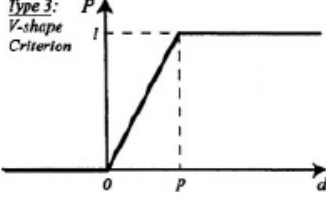
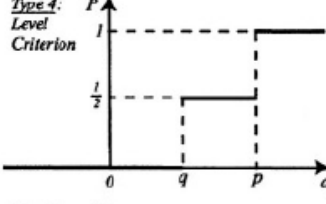
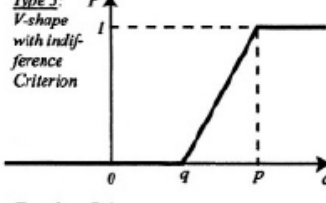
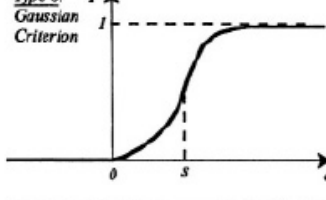
Εικόνα 8.1 Συνάρτηση προτίμησης

Αν ένα κριτήριο είναι φθίνον πρέπει να υπολογίζεται το αντίθετο της διαφοράς των επιδόσεων.

$$P_j(a, b) = F [-d_j(a, b)] = F_j [f_j(b) - f_j(a)]$$

Το ζευγάρι  $\{f_j, P_j(a, b)\}$  ονομάζεται γενικευμένο κριτήριο, το οποίο σχετίζεται με το κριτήριο  $f_j$ . Παρόμοια γενικευμένα κριτήρια πρέπει να καθορίζονται για κάθε κριτήριο και έτσι δημιουργήθηκαν έξι τύποι συναρτήσεων προτίμησης προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία συσχέτισης τους.

Εικόνα 8.2 Τύποι συναρτήσεων προτίμησης

Generalised criterion	Definition	Parameters to fix
<p><i>Type 1: Usual Criterion</i></p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	-
<p><i>Type 2: U-shape Criterion</i></p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	$q$
<p><i>Type 3: V-shape Criterion</i></p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	$p$
<p><i>Type 4: Level Criterion</i></p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	$p, q$
<p><i>Type 5: V-shape with indifference Criterion</i></p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	$p, q$
<p><i>Type 6: Gaussian Criterion</i></p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	$s$

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να οριστούν ορισμένοι παράμετροι :

- $q_j$  (indifference threshold): Η μεγαλύτερη τιμή της διαφοράς  $d$  για την οποία οι εναλλακτικές λύσεις είναι μεταξύ τους αδιάφορες για το κριτήριο  $j$ .
- $p_j$  (preference threshold): Η μικρότερη τιμή της διαφοράς  $d$  στο κριτήριο  $j$  πάνω από την οποία υπάρχει σαφής προτίμηση.
- $s$ : μια τιμή ανάμεσα στο  $q_j$  και στο  $p_j$ .

Οι παραπάνω τύποι συναρτήσεων προτίμησης προτάθηκαν από τα λογισμικά PROMCALC και DECISION LAB και έχουν κριθεί ικανοποιητικοί για τις περισσότερες εφαρμογές μέχρι σήμερα. Πιο αναλυτικά κάθε τύπος συναρτήσεων περιγράφεται παρακάτω.

- Τύπος I: Σε αυτή την περίπτωση όταν δύο επιδόσεις των εναλλακτικών  $a$  και  $b$  είναι διαφορετικές τότε ο λήπτης απόφασης έχει αυστηρή προτίμηση για την εναλλακτική με την καλύτερη επίδοση.
- Τύπος II: Δύο εναλλακτικές είναι ίδιες για τον λήπτη της απόφασης μόνο εάν η διαφορά των επιδόσεων τους είναι μικρότερη από την τιμή αδιαφορίας  $q_j$ , διαφορετικά υπάρχει αυστηρή προτίμηση. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει ο λήπτης της απόφασης να καθορίσει την τιμή  $q_j$ , όπου συνήθως καθορίζεται ως η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ δυο επιδόσεων των εναλλακτικών.
- Τύπος III: Όσο η τιμή της διαφοράς  $d$  είναι μικρότερη από την τιμή προτίμησης  $p$ , η προτίμηση του λήπτη απόφασης αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με το  $d$ . Εάν η τιμή του  $d$  γίνει μεγαλύτερη από την τιμή προτίμησης  $p$ , υπάρχει αυστηρή προτίμηση. Σε αυτή την περίπτωση ο λήπτης απόφασης θα πρέπει να καθορίσει την τιμή κατωφλίου προτίμησης  $p$  η οποία θα ισούται με την μικρότερη τιμή της διαφοράς  $d$  των επιδόσεων.
- Τύπος IV: Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές προτίμησης  $p$  και αδιαφορίας  $q$  πρέπει να καθοριστούν ταυτόχρονα, ενώ αν η τιμή του  $d$  κυμαίνεται μεταξύ των  $q$  και  $p$  τότε υπάρχει ασθενής προτίμηση  $P(d)=1/2$ .
- Τύπος V: Σε αυτή την περίπτωση η προτίμηση αυξάνεται γραμμικά από την αδιαφορία έως την αυστηρή προτίμηση, σε ένα εύρος από τις τιμές κατωφλίων  $q$  και  $p$ .
- Τύπος VI: Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να υπολογιστεί η τιμή του  $s$  η οποία υπολογίζεται εύκολα από την κανονική κατανομή. Αυτή η συνάρτηση είναι συνεχής.

#### 8.4.4 Υπολογισμός πίνακα βαθμού υπεροχής

Ο υπολογισμός των προτιμήσεων P του σεναρίου a σε σχέση με το σενάριο b για κάθε κριτήριο ανάλυσης βοηθάει για τον υπολογισμό του βαθμού υπεροχής του σεναρίου a έναντι του σεναρίου b  $\pi(a,b)$  για το σύνολο των κριτηρίων της ανάλυσης σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$\pi(a,b) = \sum_{j=1}^k w_j \cdot P_j(a, b)$$

Ενώ ο βαθμός υπεροχής του σεναρίου b έναντι του a δίνεται από την σχέση :

$$\pi(b,a) = \sum_{j=1}^k w_j \cdot P_j(b, a)$$

Ο υπολογισμός του βαθμού υπεροχής όλων των δυαδικών συγκρίσεων των επιδόσεων των εναλλακτικών σεναρίων, δημιουργεί ένα πίνακα nxn όπου σε κάθε κελί του τοποθετείται το άθροισμα των αντίστοιχων (σταθμισμένων με το βάρος κριτηρίου  $w_j$ ) προτιμήσεων  $P_j$ .

Ο κάθε πίνακας υπεροχής ικανοποιεί τις παρακάτω ιδιότητες :

- $\pi(a,a)=0$
- $0 \leq \pi(a,b) \leq 1$
- $0 \leq \pi(b,a) \leq 1$
- $0 \leq \pi(a,b) + \pi(b,a) \leq 1$

Αν  $\pi(a,b) \sim 0$  τότε υπάρχει μία ασθενής συνολική προτίμηση της a έναντι της b εναλλακτικής.

Αν  $\pi(a,b) \sim 1$  τότε υπάρχει μία ισχυρή συνολική προτίμηση της a έναντι της b εναλλακτικής.

#### 8.4.5 Κατάταξη

Θεωρώντας τώρα ένα σύνολο A όπου περιέχει όλα τα εναλλακτικά σενάρια που εξετάζονται, κάθε εναλλακτική συγκρίνεται με n-1 σενάρια.

Το μέτρο της υπεροχής του εναλλακτικού σεναρίου  $a_i$  έναντι των υπολοίπων σεναρίων υπολογίζεται από την θετική ροή κατάταξης  $\Phi^+$ .

$$\Phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n \pi(a_i, a_m)$$

Ενώ το μέτρο της επικράτησης των εναλλακτικών σεναρίων έναντι του  $a_i$  υπολογίζεται από την αρνητική ροή κατάταξης  $\Phi^-$ .

$$\Phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n \pi(a_m, a_i)$$



Τελικά η πλήρης κατάταξη δίνεται από την μέθοδο PROMETHEE II, η οποία αποτελεί και επέκταση της μεθόδου PROMETHEE I. Έτσι ο βαθμός ικανοποίησης των στόχων υπολογίζεται σύμφωνα με το μέγεθος της καθαρής ροής των σεναρίων  $\Phi^{net}$ , η οποία προκύπτει από την διαφορά της θετικής  $\Phi^+$  με την αρνητική ροή  $\Phi^-$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της καθαρής ροής ενός σεναρίου, τόσο καλύτερο είναι. Συνεπώς, το σενάριο με μεγαλύτερη τιμή καθαρής ροής, αποτελεί την συμβιβαστική λύση του προβλήματος. Τέλος, όταν χρησιμοποιείται η PROMETHEE II όλες οι εναλλακτικές είναι συγκρίσιμες και δεν υπάρχει ασυμβατότητα μεταξύ των σεναρίων.

$$\Phi^{net}(\alpha_i) = \Phi^+(\alpha_i) - \Phi^-(\alpha_i)$$

$$\alpha P b \text{ όταν } \Phi^{net}(\alpha) > \Phi^{net}(b)$$

$$\alpha I b \text{ όταν } \Phi^{net}(\alpha) = \Phi^{net}(b)$$

$$0 \leq \Phi^{net}(\alpha_i) \leq 1$$

## Βιβλιογραφία

1. *Introduction to Multi-Criteria Decision Making and the Evidential Reasoning Approach*, May 2001, Dr. Ling Xu & Dr. Jian-Bo Yang
2. [www.mcdmsociety.org/](http://www.mcdmsociety.org/)
3. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*, Bernard Roy
4. *The Analytic Hierarchy Process*
5. Saaty, T.L., 1980. "The Analytic Hierarchy Process." McGraw-Hill, New York.
6. *How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method* J.P. BRANS, Ph. VINCKE and B. MARESCHAL Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium
7. *Chapter 5 PROMETHEE METHODS* Jean-Pierre Brans

## Κεφάλαιο Ένατο: Πολυκριτηριακή ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων

### 9.1 Εισαγωγή

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν ορισμένα εναλλακτικά σενάρια, όπου στόχο είχαν εκτός από την ικανοποίηση των κριτηρίων του EN 13201 και την εκπλήρωση ορισμένων συμπληρωματικών στόχων. Πιο συγκεκριμένα βρέθηκαν τα κατάλληλα φωτιστικά, όπου στόχευαν την μικρότερη κατανάλωση της εγκατάστασης, περιορίζαν το φαινόμενο της φωτορύπανσης, μείωναν αισθητά την τιμή της θάμβωσης και μεγιστοποιούσαν την ομοιομορφία λαμπρότητας της εγκατάστασης. Σε αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θεωρώντας ως δεδομένα τα αποτελέσματα των προηγούμενων σεναρίων θα πραγματοποιηθεί μια πολυκριτηριακή ανάλυση των τελευταίων. Ο στόχος της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι να βρεθεί ποιο από τα παραπάνω εναλλακτικά σενάρια εξυπηρετεί καλύτερα τους στόχους κάθε προβλήματος που τίθεται. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την πολυκριτηριακή ανάλυση αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν στο όγδοο κεφάλαιο. Η πολυκριτηριακή ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί στην συνέχεια του κεφαλαίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από μια αναθέτουσα αρχή, η οποία έχει ως στόχο την αξιολόγηση εναλλακτικών προτάσεων για την υλοποίηση ενός έργου. Συνοψίζοντας, στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν δυο διαφορετικά υποθετικά προβλήματα που το καθένα θα έχει διαφορετικούς στόχους.

### 9.2 Παρουσίαση δεδομένων

Στο όγδοο κεφάλαιο αναλύθηκε και παρουσιάστηκε η δομή ενός πολυκριτηριακού προβλήματος. Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα αποτελείται, λοιπόν, από ένα σύνολο εναλλακτικών διαθέσιμων επιλογών, από ένα δίκτυο κριτηρίων και από ένα πολυκριτηριακό πίνακα όπου αποτυπώνονται όλα τα μεγέθη των εναλλακτικών επιλογών ως προς τα κριτήρια. Οι γραμμές του πίνακα αναφέρονται στα κριτήρια και οι στήλες στις εναλλακτικές επιλογές.

Στο παρόν κεφάλαιο, λοιπόν, θα πραγματοποιηθεί πολυκριτηριακή ανάλυση των εναλλακτικών σεναρίων που υπολογίστηκαν στο έβδομο κεφαλαίο με στόχο την εύρεση μιας συμβιβαστικής λύσης σε δυο υποθετικά προβλήματα που θα τεθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου. Με βάση τα παραπάνω, οι διαθέσιμες επιλογές από τις οποίες θα προκύψει η συμβιβαστική λύση του προβλήματος, θα είναι ένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν στο έβδομο κεφάλαιο και γι' αυτό τον λόγο τα αποτελέσματα τους θα τοποθετηθούν στις στήλες του πολυκριτηριακού πίνακα που θα δημιουργηθεί. Υπενθυμίζεται ότι τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι: οικονομικότερη υλοποίηση με βάση τους δείκτες  $D_p, D_e$ , περιορισμός της φωτορύπανσης, μειωμένη τιμή του δείκτη θάμβωσης  $T_I$  και μέγιστη δυνατή τιμή ολικής ομοιομορφίας  $U_o$ . Ενδεικτικά επιλέχθηκαν τα αποτελέσματα των υλοποιήσεων των τυπικών καννάβων κατηγορίας B5 ως εναλλακτικές επιλογές της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Προφανώς δεν θα μπορούσε να υπάρχει μια μίξη καννάβων κατηγορίας B5 και E1, καθώς θα οδηγούσε σε λανθασμένα αποτελέσματα, διότι έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά οι δυο υλοποιήσεις και επομένως δεν μπορούν να συγκριθούν. Συνοψίζοντας, στις στήλες του πολυκριτηριακού πίνακα

θα τοποθετηθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των εναλλακτικών σεναρίων κατηγορίας καννάβου B5.

Τα παραπάνω δεδομένα θα πρέπει να αξιολογηθούν από ένα δίκτυο κριτηρίων, προκειμένου να προκύψει μια συμβιβαστική λύση σε κάθε πρόβλημα.

Πρώτο κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε είναι ο δείκτης  $D_p$  (δείκτης πυκνότητας ισχύος) που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης. Ο δείκτης  $D_p$  είναι ανάλογος με την συνολική ισχύ της εγκατάστασης, επομένως όσο χαμηλότερη είναι η καταναλισκόμενη ενεργεία μίας εγκατάστασης τόσο μικρότερος είναι ο παραπάνω δείκτης. Επόμενο είναι, λοιπόν, ο λήπτης της απόφασης να προτιμά εγκαταστάσεις με χαμηλή κατανάλωση και συνεπώς με χαμηλό δείκτη  $D_p$ . Έτσι ο δείκτης  $D_p$  περιγράφεται ως φθίνον κριτήριο.

Δεύτερο κριτήριο αξιολόγησης αποτελεί ο δείκτης  $T_I$ . Ο δείκτης  $T_I$  χρησιμοποιείται για να μετρήσει την τιμή της θάμβωσης της εγκατάστασης και η τιμή του συνήθως δεν θα πρέπει να υπερβαίνει ένα ανώτατο όριο που ορίζεται από τις κλάσεις της τεχνικής έκθεσης CEN/TR 13201. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη  $T_I$ , τόσο λιγότερη είναι η θάμβωση μιας εγκατάστασης και επομένως πιο φιλική για τον χρήστη. Το κριτήριο  $T_I$  θεωρείται φθίνον, καθώς προτιμώνται όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές θάμβωσης σε μια εγκατάσταση οδοφωτισμού.

Ένα ακόμα κριτήριο αξιολόγησης που αφορά την οπτική άνεση του χρήστη είναι ο δείκτης αξιολόγησης ολικής ομοιομορφίας της λαμπρότητας  $U_o$ . Ο δείκτης  $U_o$ , όπως έχει ήδη οριστεί είναι ο λόγος ελάχιστης προς μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος και συνεπώς όσο μεγαλύτερος είναι τόσο καλύτερη είναι η ομοιομορφία της λαμπρότητας της εγκατάστασης. Υψηλές τιμές ολικής ομοιομορφίας συμβάλλουν σε ένα φωτισμό φιλικότερο προς τον χρήστη, με μικρές αποκλίσεις λαμπρότητας στο οδόστρωμα. Το κριτήριο  $U_o$ , λοιπόν, θεωρείται αύξον, καθώς προτιμώνται υψηλές τιμές ολικής ομοιομορφίας σε μια εγκατάσταση οδοφωτισμού.

Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε στο όγδοο κεφάλαιο, δεν μπορεί να απουσιάζει από μια πολυκριτηριακή ανάλυση ένα οικονομικό κριτήριο. Το οικονομικό κριτήριο στα προβλήματα που θα εξεταστούν αφορά το κόστος αγοράς φωτιστικών για την υλοποίηση μιας εγκατάστασης σε κάνναβο κατηγορίας B5. Το κόστος αγοράς υπολογίστηκε για ενδεικτικό μήκος εγκατάστασης ίσο με ένα χιλιόμετρο, όπως παρουσιάστηκε στο έβδομο κεφάλαιο. Προφανώς στόχος είναι η οικονομικότερη αγορά φωτιστικών, γι' αυτό και το κριτήριο είναι φθίνον.

Επίσης, ένα ακόμα κριτήριο αξιολόγησης της εγκατάστασης είναι η θερμοκρασία χρώματος που προτιμά ο λήπτης της απόφασης. Οι εναλλακτικές επιλογές εγκατάστασης οδοφωτισμού έχουν υλοποιηθεί σε δυο διαφορετικές θερμοκρασίες χρώματος 3000K και 4000K. Σε αυτή την περίπτωση η μονοτονία του κριτηρίου καθορίζεται από την προτίμηση του λήπτη απόφασης, καθώς αν επιθυμεί η εγκατάσταση που θα επιλέξει να είναι θερμοκρασίας χρώματος 4000K τότε το κριτήριο θα είναι αύξον, ενώ αν επιθυμεί θερμοκρασία χρώματος 3000K τότε το κριτήριο θα είναι φθίνον.

Τέλος, ακόμα ένα κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο συντελεστής χρησιμοποίησης UF. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης, όπως έχει ήδη αναλυθεί στο έβδομο κεφάλαιο, είναι ο λόγος της φωτεινής ροής που φτάνει στο οδόστρωμα προς την συνολική φωτεινή ροή του φωτιστικού. Υψηλές τιμές του παραπάνω συντελεστή εξασφαλίζουν τον περιορισμό του διαφεύγοντα φωτισμού, περιορίζοντας έτσι το φαινόμενο της φωτορύπανσης. Το κριτήριο λοιπόν είναι αύξον, καθώς υψηλότερες τιμές του UF προτιμώνται από τον λήπτη της απόφασης.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας που περιλαμβάνει το σύνολο των διαθέσιμων εναλλακτικών επίλογων (στις στήλες του πίνακα) αλλά και τα διαθέσιμα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθούν οι εναλλακτικές επιλογές (στις γραμμές του πίνακα). Ο πολυκριτηριακός πίνακας παραμένει κοινός για τα δυο υποθετικά προβλήματα που θα τεθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Πίνακας 9.1 Δεδομένα πολυκριτηριακού προβλήματος

	Εναλλακτικά σενάρια για δρόμο κατηγορίας B5						Max Uo 3000K	Max Uo 3000K
	Eco 3000K	Eco 4000K	Min 4000K	TI	Min 3000K	TI		
<b>Κριτήρια Αξιολόγησης (Xi)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>		<b>Δ</b>		<b>E</b>	<b>Z</b>
<b>PDI D<sub>p</sub> (mWlx<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>)</b>	0,023	0,019	0,039		0,041		0,035	0,043
<b>TI</b>	7	7	2		2		7	7
<b>Total Uniformity U<sub>o</sub> (L<sub>min</sub>/L<sub>ave</sub>)</b>	0,57	0,57	0,63		0,63		0,75	0,75
<b>Κόστος Φωτιστικών</b>	15370	15370	17110		17835		16820	16820
<b>Colour Temperatutre (K)</b>	3000	4000	4000		3000		4000	3000
<b>Utilization Factor</b>	0,481	0,481	0,261		0,261		0,254	0,254

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των σεναρίων που εξετάστηκαν στο έβδομο κεφάλαιο. Στις στήλες έχουν τοποθετηθεί τα αποτελέσματα των εναλλακτικών επιλογών που υλοποιήθηκαν στο έβδομο κεφάλαιο, οι οποίες έχουν αντιστοιχηθεί με ελληνικά γράμματα. Στους πίνακες που ακολουθούν θα αναγράφονται τα ελληνικά γράμματα που αντιστοιχούν σε κάθε εναλλακτικό σενάριο για λόγους συντομίας. Πιο συγκεκριμένα το σενάριο οικονομικότερης υλοποίησης των 3000K θα αντιπροσωπεύεται από το ελληνικό γράμμα Α και η αντίστοιχη υλοποίηση των 4000K από το ελληνικό γράμμα Β. Επιπλέον, το σενάριο μειωμένης θάμβωσης με θερμοκρασία χρώματος 4000K αντιστοιχίζεται με το γράμμα Γ και η αντίστοιχη υλοποίηση των 3000K από το ελληνικό γράμμα Δ. Τέλος, το σενάριο αυξημένης ολικής ομοιομορφίας της εγκατάστασης με θερμοκρασία χρώματος 4000K αντιπροσωπεύεται από το γράμμα Ε, ενώ το αντίστοιχο με θερμοκρασία χρώματος 3000K αντιπροσωπεύεται από το γράμμα Ζ.

Παράλληλα στις πρώτες δύο στήλες του πίνακα εντοπίζονται τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν και με βάση αυτά θα κρίνονται τα εναλλακτικά σενάρια σε κάθε πρόβλημα. Όπως οι εναλλακτικές επιλογές αντιστοιχήθηκαν με ένα γράμμα έτσι και τώρα αντιστοιχούνται τα κριτήρια αξιολόγησης με ένα αγγλικό χαρακτήρα. Το πρώτο κριτήριο αξιολόγησης που επιλέχθηκε αποτελεί ο δείκτης D<sub>p</sub> και αντιστοιχίζεται με τον αγγλικό χαρακτήρα Α. Στην συνέχεια, το κριτήριο του δείκτη θάμβωσης TI αντιστοιχίζεται με τον αγγλικό χαρακτήρα Β, το κριτήριο του λόγου ομοιομορφίας με τον αγγλικό χαρακτήρα C, το κριτήριο του κόστους φωτιστικών με το γράμμα D, το κριτήριο της θερμοκρασίας χρώματος με το γράμμα Ε και τέλος το κριτήριο του συντελεστή χρησιμοποίησης με το γράμμα F.

### 9.3 Οικονομικότερη εγκατάσταση.

Υποθέτοντας τώρα ότι μια αναθέτουσα αρχή έχει αναλάβει την αξιολόγηση και την επιλογή της κατάλληλης εγκατάστασης οδοφωτισμού από το σύνολο εναλλακτικών επιλογών που παρουσιάστηκαν, θα υπολογιστούν τα βάρη που αντιστοιχούν σε κάθε κριτήριο αξιολόγησης. Πιο αναλυτικά ο πρωταρχικός στόχος της αναθέτουσας αρχής είναι η δημιουργία μιας εγκατάστασης χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ παράλληλα ο διαθέσιμος προϋπολογισμός για αγορά των φωτιστικών είναι σημαντικά περιορισμένος. Οι παραπάνω στόχοι της αναθέτουσας αρχής θέτονται ως προτεραιότητες με αποτέλεσμα τα κριτήρια Dp και κόστος φωτιστικών να έχουν τον μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα κριτήρια. Επίσης, στόχος της αναθέτουσας αρχής είναι η μείωση του διαφεύγοντα φωτισμού, καθώς δεν επιθυμεί τον φωτισμό του περιβάλλοντα χώρου πέρα από τα όρια του οδοστρώματος. Γι' αυτό το λόγο το κριτήριο του συντελεστή χρησιμοποίησης UF πρέπει να έχει ένα αυξημένο συντελεστή βαρύτητας έναντι των εναπομεινάντων κριτηρίων. Επιπλέον, ως δευτερεύοντες στόχους θεωρούνται οι τιμές της ολικής ομοιομορφίας και της θάμβωσης της εγκατάστασης. Παρόλα αυτά, μεταξύ των δυο προτιμάται μια εγκατάσταση με υψηλές τιμές ομοιομορφίας. Τέλος, η αναθέτουσα αρχή δεν θεωρεί ως προτεραιότητα την θερμοκρασία χρώματος της εγκατάστασης, και έτσι ως κριτήριο δεν θα πρέπει να του αποδοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα. Παρόλα αυτά, εφόσον σκοπός είναι η δημιουργία μιας εγκατάστασης με μειωμένη κατανάλωση, υπάρχει η προτίμηση για θερμοκρασία χρώματος 4000K, καθώς τα φωτιστικά LED είναι ενεργειακά πολύ αποδοτικά στην παραπάνω θερμοκρασία χρώματος.

### 9.3.1 Υπολογισμός των βαρών με την μέθοδο AHP

Με την βοήθεια της μεθόδου AHP που αναπτύχθηκε στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο και με βάση τις προτιμήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω θα προκύψει ο πίνακας βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης.

Πίνακας 9.2 Επιλογή βάρους κριτηρίων

Επιλογή Βάρους Κριτηρίων							
Κριτήρια	A	B	C	D	E	F	
<b>PDI D<sub>p</sub> (mW lx<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) (min)</b>	1	5	5	3	5	3	
<b>TI (min)</b>	0,2	1	0,33	0,2	3	0,33	
<b>Total Uniformity U<sub>o</sub> (L<sub>min</sub>/L<sub>ave</sub>) (max)</b>	0,2	3	1	0,33	3	0,33	
<b>Κόστος Φωτιστικών (min)</b>	0,33	5	3	1	5	5	
<b>Colour Temperatutre (K) (max)</b>	0,2	0,33	0,33	0,2	1	0,33	
<b>UF (max)</b>	0,33	3	3	0,2	3	1	

Είναι σημαντικό να τονισθεί πως μεταφράστηκαν τα δεδομένα του προβλήματος, που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου 9.3, στον πίνακα επιλογής βάρους κριτηρίων.

Εξετάζοντας αρχικά τον δείκτη D<sub>p</sub> είναι σαφής η υπεροχή του έναντι των άλλων κριτηρίων όπως αποτυπώθηκε στον πίνακα 9.2. Είχε αναφερθεί άλλωστε και στην αρχή του προβλήματος ότι πρωταρχικός στόχος είναι η χαμηλή κατανάλωση της εγκατάστασης γι' αυτό και υπερισχύει έναντι του κριτηρίου D (κόστους φωτιστικών) όπως και των κριτηρίων συντελεστή χρησιμοποίησης UF, ομοιομορφίας U<sub>o</sub> και θάμβωσης TI. Αντίθετα η θερμοκρασία χρώματος είναι αδιάφορη για την υπάρχουσα εγκατάσταση και αυτό αποτυπώθηκε στον πίνακα επιλέγοντας από την κλίμακα απόλυτων αριθμών την τιμή 5.

Ο δείκτης θάμβωσης υπερέχει μόνο του αδιάφορου κριτηρίου της θερμοκρασίας χρώματος γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός 3.

Το κριτήριο της ομοιομορφίας υπερτερεί όπως αναφέρθηκε του κριτηρίου της θάμβωσης και της θερμοκρασίας χρώματος γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε η τιμή προτίμησης 3.

Επιπλέον το κριτήριο κόστους φωτιστικών θεωρείται το δεύτερο πιο σημαντικό με βάση τις προτιμήσεις, που έχουν αναφερθεί, γι' αυτό και η υπερέχει έναντι όλων των κριτηρίων εκτός του δείκτη D<sub>p</sub>. Επιλέχθηκε η τιμή της ελαφριάς προτίμησης έναντι της ομοιομορφίας (3), ενώ για τα υπόλοιπα δύο κριτήρια επιλέχθηκε μια τιμή πιο αυστηρής προτίμησης ίση με 5. Τέλος, το κριτήριο του δείκτη UF υπερέχει του κριτηρίου της θάμβωσης, της ομοιομορφίας και της θερμοκρασίας χρώματος σύμφωνα με τις απαιτήσεις τις αναθέτουσας αρχής, γι' αυτό το λόγο άλλωστε επιλέχθηκε ο αριθμός 3 προκειμένου να εκφραστεί η προτίμηση έναντι των κριτηρίων. Στα εναπομείναντα αντίστοιχα κελιά κάτω από την διαγώνιο σύμφωνα με την μέθοδο τοποθετήθηκαν οι αντίστροφες από τις τιμές που αναφέρθηκαν.

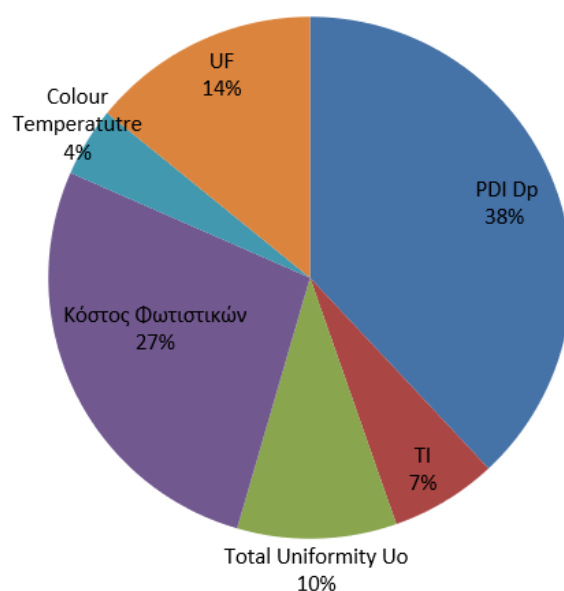
Τέλος, στον πίνακα 9.2 φαίνεται σε παρένθεση και η μονοτονία των κριτηρίων. Το κριτήριο θερμοκρασίας χρώματος είναι αύξον, καθώς η επιθυμητή θερμοκρασία χρώματος της εγκατάστασης είναι 4000K.

Στην συνέχεια, ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 8 υπολογίστηκε ο κανονικοποιημένος πίνακας δυαδικών συγκρίσεων άλλα και το τελικό βάρος των κριτηρίων.

Πίνακας 9.3 Κανονικοποιημένος πίνακας δυαδικών συγκρίσεων

	A	B	C	D	E	F	Weights
A	0,441	0,288	0,395	0,608	0,250	0,300	0,380
B	0,088	0,058	0,026	0,041	0,150	0,033	0,066
C	0,088	0,173	0,079	0,068	0,150	0,033	0,099
D	0,147	0,288	0,237	0,203	0,250	0,500	0,271
E	0,088	0,019	0,026	0,041	0,050	0,033	0,043
F	0,147	0,173	0,237	0,041	0,150	0,100	0,141

Για την καλύτερη αντίληψη των βαρών που προέκυψαν σχεδιάστηκε και η ανάλογη πίτα με την βοήθεια του Excel.



Εικόνα 9.1 Γράφημα αναπαράστασης βαρών

Εξετάζοντας τώρα το γράφημα είναι προφανές ότι έγινε σωστή επιλογή των αριθμών της κλίμακας προτίμησης καθώς το κριτήριο της κατανάλωσης Dp υπερτερεί έναντι των υπολοίπων αισθητά, ενώ και το κριτήριο κόστους φωτιστικών έχει μεγάλη βαρύτητα. Συνολικά, μάλιστα οι δυο πρωταρχικοί στόχοι που τέθηκαν καταλαμβάνουν περίπου το 65% του συνόλου, κάτι που σημαίνει η κατάταξη των εναλλακτικών σεναρίων θα καθοριστεί κυρίως από τα δυο αυτά κριτήρια.



### 9.3.2 Υπολογισμός της κατάταξης των εναλλακτικών σεναρίων με την μέθοδο PROMETHEE

Για την συνέχεια της πολυκριτηριακής ανάλυσης θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος PROMETHEE όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Πρώτο βήμα της υλοποίησης της μεθόδου PROMETHEE είναι η επιλογή των κατάλληλων τύπων συναρτήσεων που αντιπροσωπεύουν τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθούν τέσσερις διαφορετικοί τύποι συναρτήσεων για τα κριτήρια αξιολόγησης.

Αρχικά για το κριτήριο κατανάλωσης  $D_p$  θα χρησιμοποιηθεί ο τρίτος τύπος συνάρτησης προκειμένου να δημιουργηθεί ένα γενικευμένο κριτήριο. Ο τρίτος τύπος συνάρτησης αφορά την σύγκριση της διαφοράς των επιδόσεων  $d$  των εναλλακτικών με μια τιμή προτίμησης  $p$ , καθώς όσο η διαφορά παραμένει θετική και μικρότερη από την τιμή  $p$  η προτίμηση αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με το  $d$ . Αν η τιμή  $d$  είναι μεγαλύτερη από την τιμή  $p$  τότε υπάρχει αυστηρή προτίμηση του ενός σεναρίου έναντι του άλλου. Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι το κριτήριο αξιολόγησης είναι φθίνον πράγμα που σημαίνει ότι η διαφορά των επιδόσεων των εναλλακτικών θα λαμβάνεται με ένα μείον μπροστά. Τέλος, σύμφωνα με την θεωρία η τιμή προτίμησης  $p$  λαμβάνεται ίση με την μικρότερη τιμή της διαφοράς  $p$  και σε αυτό το κριτήριο είναι ίση με 0,024.

Στην συνέχεια, για το κριτήριο μειωμένης θάμβωσης θα χρησιμοποιηθεί ο δεύτερος τύπος συνάρτησης ενώ και σε αυτή την περίπτωση το κριτήριο είναι φθίνον. Η τιμή προτίμησης  $p$  σύμφωνα με την θεωρία θα είναι ίση με 5.

Για το κριτήριο ομοιομορφίας θα χρησιμοποιηθεί πάλι ο τρίτος τύπος συνάρτησης, ενώ σε αυτή την περίπτωση το κριτήριο είναι αύξον. Τιμή προτίμησης  $p$  θεωρείται ίση με 0,18.

Ο πέμπτος τύπος συνάρτησης θα χρησιμοποιηθεί για το κριτήριο κόστους φωτιστικών καθώς θεωρείται ότι για διαφορές κόστους κάτω των 145 ευρώ δεν θα υπάρχει προτίμηση κάποιας εναλλακτικής. Αντίστοιχα αν η διαφορά κόστους δυο σεναρίων ξεπερνάει τα 2400Ευρώ τότε υπάρχει αυστηρή προτίμηση. Τέλος, το παρόν κριτήριο είναι φθίνον.

Για το κριτήριο επιλογής θερμοκρασίας χρώματος θα χρησιμοποιηθεί ο πρώτος τύπος κριτηρίου καθώς υπάρχουν δυο εναλλακτικές και ο χρήστης έχει αυστηρή προτίμηση για την εναλλακτική με την καλύτερη επίδοση. Το κριτήριο σε αυτή την περίπτωση είναι αύξον.

Τέλος, για τον συντελεστής χρησιμοποίησης UF θα χρησιμοποιηθεί ο τρίτος τύπος κριτηρίου με τιμή προτίμησης  $p=0,227$ . Το κριτήριο αξιολόγησης είναι αύξον.

Αφού καθοριστούν οι τύποι συνάρτησης θα πρέπει τώρα να υπολογιστούν οι διαφορές επιδόσεων των εναλλακτικών σεναρίων για κάθε κριτήριο αξιολόγησης. Έτσι θα υπολογιστούν οι πίνακες δυαδικών συγκρίσεων που επιγράφηκαν στην ενότητα 8.4.3.

Πίνακας 9.4 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων Α κριτηρίου αξιολόγησης

<b>d(A)min</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>E</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Α</b>	0	-0,004	0,016	0,02	0,012	0,02
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Β</b>	0,004	0	0,02	0,024	0,016	0,024
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Γ</b>	-0,016	-0,02	0	0,004	-0,004	0,004
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Δ</b>	-0,018	-0,022	-0,002	0	-0,006	0,002
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ε</b>	-0,012	-0,016	0,004	0,008	0	0,008
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ζ</b>	-0,02	-0,024	-0,004	-0,002	-0,008	0

Πίνακας 9.5 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων Β κριτηρίου αξιολόγησης

<b>d(B)min</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>E</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Α</b>	0	0	-5	-5	0	0
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Β</b>	0	0	-5	-5	0	0
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Γ</b>	5	5	0	0	5	5
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Δ</b>	5	5	0	0	5	5
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ε</b>	0	0	-5	-5	0	0
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ζ</b>	0	0	-5	-5	0	0

Πίνακας 9.6 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων C κριτηρίου αξιολόγησης

<b>d(C)max</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>E</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Α</b>	0	0	-0,06	-0,06	-0,18	-0,18
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Β</b>	0	0	-0,06	-0,06	-0,18	-0,18
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Γ</b>	0,06	0,06	0	0	-0,12	-0,12
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Δ</b>	0,06	0,06	0	0	-0,12	-0,12
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ε</b>	0,18	0,18	0,12	0,12	0	0
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ζ</b>	0,18	0,18	0,12	0,12	0	0

Πίνακας 9.7 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων D κριτηρίου αξιολόγησης

<b>d(D)max</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>E</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Α</b>	0	0	1740	2465	1450	1450
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Β</b>	0	0	1740	2465	1450	1450
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Γ</b>	-1740	-1740	0	725	-290	-290
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Δ</b>	-2465	-2465	-725	0	-1015	-1015
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ε</b>	-1450	-1450	290	1015	0	0
<b>ΣΕΝΑΠΙΟ Ζ</b>	-1450	-1450	290	1015	0	0

Πίνακας 9.8 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων E κριτηρίου αξιολόγησης

d(E)max	A	B	Γ	Δ	E	Z
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Α</i>	0	-1000	-1000	0	-1000	0
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Β</i>	1000	0	0	1000	0	1000
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</i>	1000	0	0	1000	0	1000
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</i>	0	-1000	-1000	0	-1000	0
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Ε</i>	1000	0	0	1000	0	1000
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Ζ</i>	0	-1000	-1000	0	-1000	0

Πίνακας 9.9 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων F κριτηρίου αξιολόγησης

d(F)max	A	B	Γ	Δ	E	Z
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Α</i>	0	0	0,2203	0,2203	0,2275	0,2275
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Β</i>	0	0	0,2203	0,2203	0,2275	0,2275
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</i>	-0,2203	-0,2203	0	0	0,0072	0,0072
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</i>	-0,2203	-0,2203	0	0	0,0072	0,0072
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Ε</i>	-0,2275	-0,2275	-0,0072	-0,0072	0	0
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Ζ</i>	-0,2275	-0,2275	-0,0072	-0,0072	0	0

Οι παραπάνω είναι οι πίνακες δυαδικών συγκρίσεων των σεναρίων που προέκυψαν ύστερα από την εφαρμογή του τύπου:  $d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b)$ . Οι πίνακες με όπου η πρώτη γραμμή και στήλη τους είναι κόκκινη, αντιπροσωπεύουν φθίνοντα κριτήρια. Στην συνέχεια, σύμφωνα με την μέθοδο, πρέπει να υπολογιστεί ο δείκτης προτίμησης  $P_j$  μέσω της εφαρμογής των τύπων συναρτήσεων. Αυτό θα γίνει πάλι με την δημιουργία πινάκων διαστάσεων  $6 \times 6$  όσα και τα σενάρια που εξετάζονται.

Πίνακας 9.10 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του A κριτηρίου αξιολόγησης

<b>Κριτήριο A</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>E</b>	<b>Z</b>
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Α</i>	0,000	0,000	0,667	0,833	0,500	0,833
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Β</i>	0,167	0,000	0,833	1,000	0,667	1,000
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</i>	0,000	0,000	0,000	0,167	0,000	0,167
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,083
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Ε</i>	0,000	0,000	0,167	0,333	0,000	0,333
<i>ΣΕΝΑΡΙΟ Ζ</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Πίνακας 9.11 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του Β κριτηρίου αξιολόγησης

<b>Κριτήριο Β</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>Ε</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Α</b>	0	0	0	0	0	0
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Β</b>	0	0	0	0	0	0
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</b>	1	1	0	1	1	1
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</b>	1	1	0	0	1	1
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ε</b>	0	0	0	0	0	0
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ζ</b>	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 9.12 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του C κριτηρίου αξιολόγησης

<b>Κριτήριο C</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>Ε</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Α</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Β</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</b>	0,333	0,333	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</b>	0,333	0,333	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ε</b>	1,000	1,000	0,667	0,667	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ζ</b>	1,000	1,000	0,667	0,667	0,000	0,000

Πίνακας 9.13 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του D κριτηρίου αξιολόγησης

<b>Κριτήριο D</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>Ε</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Α</b>	0,000	0,000	0,707	1,000	0,579	0,579
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Β</b>	0,000	0,000	0,707	1,000	0,579	0,579
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</b>	0,000	0,000	0,000	0,257	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ε</b>	0,000	0,000	0,064	0,386	0,000	0,000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ζ</b>	0,000	0,000	0,064	0,386	0,000	0,000

Πίνακας 9.14 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του E κριτηρίου αξιολόγησης

<b>Κριτήριο E</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>Γ</b>	<b>Δ</b>	<b>Ε</b>	<b>Z</b>
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Α</b>	0	0	0	0	0	0
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Β</b>	1	0	0	1	0	1
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</b>	1	0	0	1	0	1
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</b>	0	0	0	0	0	0
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ε</b>	1	0	0	1	0	1
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Ζ</b>	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 9.15 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του F κριτηρίου αξιολόγησης

Κριτήριο F	A	B	Γ	Δ	E	Z
ΣΕΝΑΡΙΟ A	0,000	0,000	0,970	0,970	1,000	1,000
ΣΕΝΑΡΙΟ B	0,000	0,000	0,970	0,970	1,000	1,000
ΣΕΝΑΡΙΟ Γ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,032
ΣΕΝΑΡΙΟ Δ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,032
ΣΕΝΑΡΙΟ E	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣΕΝΑΡΙΟ Z	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (Κεφάλαιο 8.4.4) ο υπολογισμός των προτιμήσεων  $P$  του σεναρίου  $a$  σε σχέση με το σενάριο  $b$  βοηθάει στον υπολογισμό του βαθμού υπεροχής του ενός σεναρίου έναντι του άλλου. Έτσι δημιουργήθηκε ένας πίνακας διαστάσεων  $6 \times 6$  όπου σε κάθε κελί του περιέχεται το άθροισμα των αντίστοιχων (σταθμισμένων με το βάρος κριτηρίου  $w_j$ ) προτιμήσεων  $P_j$ . Ο πίνακας φαίνεται παρακάτω μαζί με τον υπολογισμό των μέτρων υπεροχής  $[\Phi^+(a_i), \Phi^-(a_i)]$  αλλά και την καθαρή ροή των σεναρίων  $\Phi_{net}$ .

Πίνακας 9.16 Υπολογισμός του βαθμού υπεροχής και τελική κατάταξη των σεναρίων

	A	B	Γ	Δ	E	Z	SUM	$\Phi^+$
<b>A</b>	0,0000	0,0000	0,5823	0,7249	0,4882	0,6150	2,4104	0,4821
<b>B</b>	0,1063	0,0000	0,6457	0,8313	0,5516	0,7214	2,8563	0,5713
<b>Γ</b>	0,1418	0,0989	0,0000	0,2420	0,0705	0,1768	0,7300	0,1460
<b>Δ</b>	0,0989	0,0989	0,0000	0,0000	0,0705	0,1022	0,3704	0,0741
<b>E</b>	0,1415	0,0985	0,1465	0,3399	0,0000	0,1697	0,8962	0,1792
<b>Z</b>	0,0985	0,0985	0,0831	0,1702	0,0000	0,0000	0,4503	0,0901
<b>SUM</b>	0,5870	0,3948	1,4575	2,3084	1,1808	1,7851		
<b><math>\Phi^-</math></b>	0,1174	0,0790	0,2915	0,4617	0,2362	0,3570		
<b><math>\Phi_{net}</math></b>	0,36468	0,49230	-0,14550	-0,38759	-0,05693	-0,26696		
<b>RANKING</b>	2	1	4	6	3	5		

Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα της μεθόδου PROMETHEE προκύπτει ότι η υλοποίηση των 4000K του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης είναι η καλύτερη επιλογή για το πρόβλημα. Ακολουθούν η αντίστοιχη υλοποίηση των 3000K, η υλοποίηση μέγιστης ομοιομορφίας των 4000K, η υλοποίηση περιορισμού θάμβωσης για θερμοκρασία χρώματος 4000K και ακολουθούν οι υλοποιήσεις μέγιστης ομοιομορφίας και ελάχιστης θάμβωσης με θερμοκρασία χρώματος 3000K.

Εξετάζοντας το αποτέλεσμα παρατηρείται ότι η εγκατάσταση που προέκυψε είναι αυτή που καλύπτει τις απαιτήσεις που είχε θέση η αναθέτουσα αρχή, καθώς έχει την χαμηλότερη κατανάλωση αλλά και το χαμηλότερο κόστος αγοράς φωτιστικών. Επιπλέον παρουσιάζει και τον υψηλότερο συντελεστή χρησιμοποίησης κατανέμοντας το μεγαλύτερο μέρος της φωτεινής ροής στο οδόστρωμα.

## 9.4 Ποιοτική και φιλική εγκατάσταση προς τον χρήστη

Υποθέτοντας, τώρα, ότι ακόμα μια αναθέτουσα αρχή έχει αναλάβει τον ρόλο της αξιολόγησης και την επιλογής της κατάλληλης εγκατάστασης οδοφωτισμού από το σύνολο εναλλακτικών επιλογών που παρουσιάστηκαν. Σε αυτή την εκδοχή, η αναθέτουσα αρχή φαίνεται διατεθειμένη να κάνει οικονομικές υπερβάσεις προκειμένου να εξασφαλίσει ένα ποιοτικό και φιλικό φωτισμό προς τους χρήστες της εγκατάστασης. Γι' αυτό το λόγο, η αναθέτουσα αρχή, επιθυμεί η εγκατάσταση να έχει υψηλές τιμές ολικής ομοιομορφίας αλλά και χαμηλές τιμές θάμβωσης προκειμένου να εξασφαλίζεται η οπτική άνεση του χρήστη. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να υπάρχει αυξημένη προτίμηση στο κριτήριο με τον λόγο ομοιομορφίας  $U_0$  αλλά και στο κριτήριο με τον δείκτη TI. Επίσης, στα πλαίσια της δημιουργίας μιας εγκατάστασης φιλικής και προς το περιβάλλον με στόχο την μείωση του φαινομένου της φωτορύπανσης, η εγκατάσταση θα πρέπει να έχει και υψηλό συντελεστή χρησιμοποίησης. Επιπλέον, όσον αφορά τα οικονομικά κριτήρια ( $D_p$ , Κόστος φωτιστικών) της ανάλυσης, μπορεί η αναθέτουσα αρχή να κάνει ορισμένες υποχωρήσεις όμως δεν θα πρέπει να αμεληθούν εντελώς ως κριτήρια. Τέλος, η αναθέτουσα αρχή στην προσπάθειά της να δημιουργήσει μια φιλική εγκατάσταση οδοφωτισμού τόσο προς το περιβάλλον όσο και προς τους χρήστες προτιμά θερμοκρασία χρώματος της εγκατάστασης ίση με 3000K.

### 9.4.1 Υπολογισμός των βαρών με την μέθοδο AHP

Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση έτσι και τώρα θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος AHP που αναπτύχθηκε στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο και σε συνδυασμό με τις προτιμήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω θα προκύψει ο πίνακας βαρών των κριτηρίων αξιολόγησης.

Πίνακας 9.17 Επιλογή Βάρους Κριτηρίων

Επιλογή Βάρους Κριτηρίων							
Κριτήρια		A	B	C	D	E	F
PDI $D_p$ ( $mW\ lx^{-1}\ m^{-2}$ ) (min)	A	1	0,33	0,333	3	3	0,333
TI (min)	B	3	1	0,333	3	3	3
Total Uniformity $U_0$ ( $L_{min}/L_{ave}$ ) (max)	C	3	3	1	3	5	3
Κόστος Φωτιστικών (min)	D	0,333	0,333	0,333	1	3	0,333
Colour Temperatutre (K) (min)	E	0,333	0,333	0,2	0,333	1	0,33
UF (max)	F	3	0,333	0,333	3	3	1

Είναι σημαντικό να τονισθεί και σε αυτή την περίπτωση πως μεταφράστηκαν τα δεδομένα του προβλήματος, που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου 9.4, στον πίνακα επιλογής βαρών κριτηρίων.

Εξετάζοντας πρώτα τον ένα εκ των βασικών στόχων του προβλήματος που είναι η ομοιομορφία της εγκατάστασης, βλέπουμε ότι το κριτήριο υπερέχει έναντι των υπολοίπων κριτηρίων  $D_p$  και Κόστους Φωτιστικών και αυτό αποτυπώνεται με την επιλογή του αριθμού 3 από την κλίμακα απόλυτων αριθμών. Το παρόν κριτήριο υπερέχει σημαντικά του κριτηρίου της θερμοκρασίας χρώματος της εγκατάστασης γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός 5 από την κλίμακα των απόλυτων αριθμών.

Δεύτερος στόχος αποτελούσε ο περιορισμός της θάμβωσης γι' αυτό το κριτήριο B δεν υπερέχει του κριτηρίου της ομοιομορφίας, αλλά υπερέχει των υπολοίπων κριτηρίων με τιμή προτίμησης 3.

Ο δείκτης χρησιμοποίησης, με την σειρά του υπερέχει των κριτηρίων κόστους αγοράς φωτιστικών και κατανάλωσης Dp και θερμοκρασίας χρώματος γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός 3 για να αντιπροσωπεύσει αυτή την υπεροχή.

Επιπλέον, η κατανάλωση της εγκατάστασης υπερέχει έναντι των κριτηρίων του κόστους αγοράς και θερμοκρασίας χρώματος, σύμφωνα με την εκφώνηση του προβλήματος, και αυτό φαίνεται από την επιλογή του αριθμού 3 από την κλίμακα των απόλυτων αριθμών.

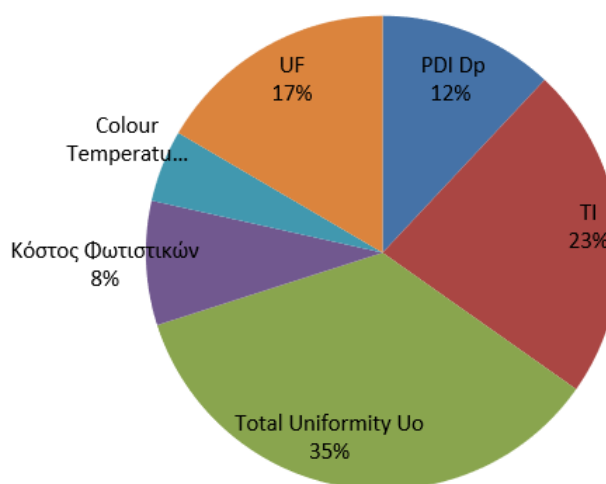
Τέλος, στον πίνακα 9.17 φαίνεται σε παρένθεση και η μονοτονία των κριτηρίων. Το κριτήριο θερμοκρασίας χρώματος είναι φθίνον καθώς η επιθυμητή θερμοκρασία χρώματος της εγκατάστασης είναι 3000K.

Στην συνέχεια, ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 8 υπολογίστηκε ο κανονικοποιημένος πίνακας δυαδικών συγκρίσεων άλλα και το τελικό βάρος των κριτηρίων.

Πίνακας 9.18 Κανονικοποιημένος Πίνακας Δυαδικών Συγκρίσεων

	A	B	C	D	E	F	Weights
A	0,0938	0,0619	0,1304	0,2250	0,1664	0,0417	0,1199
B	0,2813	0,1876	0,1318	0,2250	0,1664	0,3752	0,2279
C	0,2813	0,5629	0,3953	0,2250	0,2773	0,3752	0,3528
D	0,0313	0,0625	0,1318	0,0750	0,1664	0,0417	0,0848
E	0,0313	0,0625	0,0791	0,0250	0,0555	0,0413	0,0491
F	0,2813	0,0625	0,1318	0,2250	0,1681	0,1251	0,1656

Όπως και για το προηγούμενο πρόβλημα έτσι και τώρα σχεδιάστηκε ένα γράφημα πίτας, με στόχο την καλύτερη αποτύπωση των βαρών που προέκυψαν.



Εικόνα 9.2 Γράφημα αναπαράστασης βαρών

Εξετάζοντας, ακόμα μια φορά το γράφημα που προέκυψε είναι προφανές ότι έγινε σωστός καταμερισμός βαρών και ο στόχος της δημιουργίας μιας εγκατάστασης που διακρίνεται για την ομοιομορφία της και την μειωμένη θάμβωση της

αποτυπώνεται πλήρως στο γράφημα. Πιο συγκεκριμένα η ομοιομορφία έχει το μεγαλύτερο βάρος περίπου 0,35 ενώ κατά σειρά δεύτερο έρχεται το κριτήριο της θάμβωσης με βάρος ίσο με 0,23. Ακολουθούν το κριτήριο του συντελεστή χρησιμοποίησης με βάρος ίσο με 0,17.

#### 9.4.2 Υπολογισμός της κατάταξης των εναλλακτικών σεναρίων με την μέθοδο PROMETHEE

Για την συνέχεια της πολυκριτηριακής ανάλυσης θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος PROMETHEE όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο όγδοο κεφάλαιο. Πρώτο βήμα της υλοποίησης της μεθόδου PROMETHEE είναι η επιλογή των κατάλληλων τύπων συναρτήσεων που αντιπροσωπεύουν τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί. Οι τύποι συνάρτησης είναι οι ίδιοι με αυτούς που επιλέχθηκαν στην ενότητα 9.3.2 γι' αυτό και δεν θα αναλυθούν περαιτέρω. Η μόνη διαφοροποίηση εντοπίζεται στο κριτήριο θερμοκρασίας χρώματος όπου σε αυτή την περίπτωση είναι φθίνον καθώς προτιμάται εγκατάσταση με θερμοκρασία χρώματος 3000K.

Αφού καθοριστούν οι τύποι συνάρτησης θα πρέπει τώρα να υπολογιστούν οι διαφορές επιδόσεων των εναλλακτικών σεναρίων για κάθε κριτήριο αξιολόγησης. Όμως επειδή τα κριτήρια αξιολόγησης και οι επιδόσεις των σεναρίων παραμένουν ίδιες με αυτές που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 9.3.2 οι πίνακες που προκύπτουν είναι ίδιοι με αυτούς που έχουν ήδη περιγράψει στον προαναφερθέν κεφάλαιο (Πίνακες 9.4,9.5,9.6,9.7,9.9). Ο μόνος πίνακας που διαφέρει είναι αυτός που περιλαμβάνει τις διαφορές επιδόσεων του κριτηρίου αξιολόγησης θερμοκρασίας χρώματος καθώς τώρα το κριτήριο είναι φθίνον, ενώ στην προηγούμενη περίπτωση ήταν αύξον. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται στην συνέχεια.

Πίνακας 9.19 Πίνακας δυαδικών συγκρίσεων E κριτηρίου αξιολόγησης

d(E)max	A	B	Γ	Δ	E	Z
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ A</b>	0	1000	1000	0	1000	
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ B</b>	-1000	0	0	-1000	0	-1000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Γ</b>	-1000	0	0	-1000	0	-1000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Δ</b>	0	1000	1000	0	1000	0
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ E</b>	-1000	0	0	-1000	0	-1000
<b>ΣΕΝΑΡΙΟ Z</b>	0	1000	1000	0	1000	0

Στην συνέχεια, σύμφωνα με την μέθοδο, πρέπει να υπολογιστεί ο δείκτης προτίμησης  $P_j$  μέσω της εφαρμογής των τύπων συναρτήσεων. Αυτό θα γίνει πάλι με την δημιουργία πινάκων διαστάσεων 6x6 όσα και τα σενάρια που εξετάζονται. Όπως και για τους πίνακες δυαδικών συγκρίσεων και σε αυτή την περίπτωση οι πίνακες που αποτυπώνουν τον δείκτη προτίμησης  $P_j$  είναι ίδιοι με αυτούς που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 9.3.2 (Πίνακες 9.10,9.11,9.12,9.13,9.15). Αντίθετα ο πίνακας προτίμησης του E κριτηρίου αξιολόγησης διαφέρει εξαιτίας του φθίνοντος κριτηρίου σε αυτή την περίπτωση, γι' αυτό και παρουσιάζεται παρακάτω.



Πίνακας 9.20 Υπολογισμός του δείκτη προτίμησης  $P_j$  του E κριτηρίου αξιολόγησης

Κριτήριο E	A	B	Γ	Δ	E	Z
ΣΕΝΑΡΙΟ A	0	1	1	0	1	0
ΣΕΝΑΡΙΟ B	0	0	0	0	0	0
ΣΕΝΑΡΙΟ Γ	0	0	0	0	0	0
ΣΕΝΑΡΙΟ Δ	0	1	1	0	1	0
ΣΕΝΑΡΙΟ E	0	0	0	0	0	0
ΣΕΝΑΡΙΟ Z	0	1	1	0	1	0

Όπως και στο προηγούμενο πρόβλημα έτσι και τώρα δημιουργήθηκε ένας πίνακας διαστάσεων  $6 \times 6$  όπου σε κάθε κελί του περιέχεται το άθροισμα των αντίστοιχων (σταθμισμένων με το βάρος κριτηρίου  $w_j$ ) προτιμήσεων  $P_j$ . Ο πίνακας φαίνεται παρακάτω μαζί με τον υπολογισμό των μέτρων υπεροχής [ $\Phi^+(a_i)$ ,  $\Phi^-(a_i)$ ] αλλά και την καθαρή ροή των σεναρίων  $\Phi_{net}$ .

Πίνακας 9.21 Υπολογισμός του βαθμού υπεροχής και τελική κατάταξη των σεναρίων

	A	B	Γ	Δ	E	Z	SUM	$\Phi^+$
A	0,0000	0,0493	0,3370	0,3291	0,3128	0,3022	1,3303	0,2661
B	0,0194	0,0000	0,3071	0,3484	0,2828	0,3216	1,2793	0,2559
Γ	0,3486	0,3486	0,0000	0,2629	0,2293	0,2487	1,4381	0,2876
Δ	0,3486	0,3979	0,0493	0,0000	0,2786	0,2390	1,3134	0,2627
E	0,3733	0,3733	0,2731	0,3166	0,0000	0,0387	1,3750	0,2750
Z	0,3733	0,4226	0,3030	0,2778	0,0493	0,0000	1,4260	0,2852
SUM	1,4633	1,5917	1,2694	1,5348	1,1528	1,1502		
$\Phi^-$	0,2927	0,3183	0,2539	0,3070	0,2306	0,2300		
$\Phi_{net}$	<b>-0,02658</b>	<b>-0,06249</b>	<b>0,03374</b>	<b>-0,04427</b>	<b>0,04443</b>	<b>0,05517</b>		
RANKING	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>2</u>	<u>1</u>		

Εξετάζοντας τώρα τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρατηρείται ότι η υλοποίηση που προτείνεται είναι αυτή της μέγιστης ομοιομορφίας με θερμοκρασία χρώματος 3000K. Ακολουθούν (με σειρά προτεραιότητας) η αντίστοιχη υλοποίηση με θερμοκρασία χρώματος 4000K, η υλοποίηση της μειωμένης θάμβωσης με θερμοκρασία χρώματος 4000K, η οικονομικότερη υλοποίηση με θερμοκρασία χρώματος 3000K, η υλοποίηση της μειωμένης θάμβωσης με θερμοκρασία χρώματος 3000K και τελευταία η οικονομικότερη υλοποίηση των 4000K.

Με βάση τα αποτελέσματα είναι προφανές ότι η βαρύτητα που δόθηκε για την ύπαρξη υψηλής τιμής ομοιομορφίας καθόρισε σε σημαντικό βαθμό την τελική κατάταξη, αφού οι αντίστοιχες υλοποιήσεις βρέθηκαν στις δυο πρώτες θέσεις προτίμησης.

## Κεφάλαιο Δέκατο: Τελικά συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω ερεύνα

### 10.1 Τελικά συμπεράσματα

Τα παλαιότερα χρόνια και ειδικότερα τον περασμένο αιώνα ο βασικότερος στόχος ήταν η φωταγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων δρόμων, χωρίς την ύπαρξη κανενός περιορισμού, με στόχους κυρίως την αποφυγή ατυχημάτων την νύχτα αλλά και την μείωση της εγκληματικότητας. Πλέον με την ανάπτυξη της τεχνολογίας πρέπει να θέτονται επιπλέον και ίσως και πιο σύνθετοι στόχοι από τον εκάστοτε μελετητή με στόχο την δημιουργία αποδοτικών εγκαταστάσεων που παρέχουν και φωτισμό ποιοτικό και φιλικό προς τους χρήστες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι επιπλέον οδηγίες που παρέχουν οι ευρωπαϊκές χώρες και παρουσιάστηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο με απώτερο στόχο την υλοποίηση αποδοτικότερων εγκαταστάσεων.

Στο κεφάλαιο 6.3 παρουσιάζονται τεχνολογίες που μπορούν να περιορίσουν σημαντικά την κατανάλωση μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού, ενώ αν συνδυαστούν και με κατάλληλα φωτιστικά όπως αυτά που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 7.4 μπορούν να κάνουν την εγκατάσταση ιδιαίτερος αποδοτική με σημαντική μείωση του κόστους κατανάλωσης.

Ακόμα ένας παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνουν υπ' όψιν οι μελετητές σήμερα είναι ο περιορισμός του φαινομένου της φωτορύπανσης καθώς έχει αρκετές επιπτώσεις τόσο στον άνθρωπο όσο και στην φύση. Μάλιστα, θα πρέπει να γίνει προσεκτική μελέτη με βάση τον δείκτη UFR για τον προσδιορισμό του κατάλληλου φωτιστικού καθώς μια απλή προσέγγιση με βάση τις  $G^*$  κλάσεις ή τους δείκτες cut-off δεν είναι αρκετή προκειμένου να προκύψουν ορθά αποτελέσματα, όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 7.5. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η επιλογή ενός φωτιστικού που περιορίζει την φωτορύπανση είναι συνήθως και μια οικονομική επιλογή από άποψη κατανάλωσης ενέργειας καθώς το μεγαλύτερο μέρος της φωτεινής ροής του καταλήγει στο οδόστρωμα χωρίς να κατασπαταλάται φωτεινή ροή και ενέργεια.

Δευτερεύοντες στόχοι όπως η ύπαρξη υψηλού επιπέδου της ομοιομορφίας και μικρές τιμές θάμβωσης που εξασφαλίζουν ένα ποιοτικό και φιλικό φωτισμό στους χρήστες δεν θα πρέπει να αμελούνται. Τα παραπάνω όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 6 είναι καθοριστικά για την οπτική άνεση του χρήστη αλλά ταυτόχρονα μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά και στην μείωση των ατυχημάτων. Χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν από την υλοποίηση των παραπάνω στόχων στο έβδομο κεφάλαιο. Για παράδειγμα αν ο στόχος μια εγκατάστασης οδοφωτισμού είναι να περιορίσει την θάμβωση αποτελεσματικά θα πρέπει να προτιμώνται φωτιστικά κλάσεως  $G^*5$  και  $G^*6$ , ενώ μια ομοιόμορφη κατανομή της φωτεινής ροής στα επίπεδα C90-C270 και C0-C180 θα συμβάλλει σημαντικά στην ομοιομορφία της εγκατάστασης αλλά και σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο φωτισμού περιβάλλοντος χώρου. Μάλιστα παρατηρήθηκε ότι ακόμα και αν η φωτεινή ροή δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στα δύο επίπεδα του πολικού διαγράμματος μπορεί να επιτευχθούν υψηλές τιμές ομοιομορφίας αρκεί τα δυο επίπεδα να φωτίζονται με χαμηλές τιμές φωτεινής έντασης διαφορετικά σημεία του οδοστρώματος. Τέλος, μπορεί οι παραπάνω υλοποιήσεις όπως αποδείχθηκε να έχουν αυξημένες ενεργειακές ανάγκες καθώς δεν οδηγούν σε ενεργειακά αποδοτικές εγκαταστάσεις, άλλα αν συνδυαστούν με τεχνολογίες dimming και ελεγχόμενης λειτουργίας το τελικό κόστος κατανάλωσης μπορεί να μειωθεί αισθητά.

Επιπλέον, η επιλογή της κατάλληλης εγκατάστασης οδοφωτισμού είναι σημαντικό να προκύπτει μετά από μια πολυκριτηριακή ανάλυση των διαθέσιμων επιλογών έτσι ώστε να προκύπτει η καλύτερη δυνατή επιλογή που να ανταποκρίνεται πλήρως στους στόχους που έχει θέσει ο λήπτης της απόφασης. Τα παραπάνω αποτυπώθηκαν πλήρως στο ένατο κεφάλαιο, όπου θέτοντας διαφορετικές προτιμήσεις στα δυο σενάρια που εξετάστηκαν προέκυψε διαφορετική κατάταξη των ίδιων εναλλακτικών επιλογών, καθώς κάθε εναλλακτική ικανοποιούσε σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό τους διαφορετικούς στόχους που διατυπώθηκαν στα δυο σενάρια.

## 10.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Αρχικά ένας ακόμα παράγοντας που περιγράφεται στο πρότυπο EN13201 είναι οι G\* κλάσεις θάμβωσης, και θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η εξέταση της επίδραση τους σε μια εγκατάσταση οδοφωτισμού αναλύοντας χαρακτηριστικά όπως η φωτεινή ροή που απαιτείται (για την ικανοποίηση των κριτηρίων του EN 13201) ή καταναλισκόμενη ενέργεια της εγκατάστασης για κάθε G\* κλάση.

Επιπλέον, θα μπορούσαν να συνδυαστούν ορισμένα σενάρια από τα παραπάνω που εξετάστηκαν με στόχο την υλοποίηση εγκαταστάσεων οδοφωτισμού που ικανοποιούν περισσότερους από έναν στόχους, προφανώς όμως με ορισμένους συμβιβασμούς. Για παράδειγμα, ορίζοντας μια τιμή κατωφλίου (που θεωρείται ικανοποιητική) για την συνολική ομοιομορφία της εγκατάστασης, υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης του φωτιστικού που ικανοποιεί την παραπάνω απαίτηση αλλά παράλληλα έχει και τον μεγαλύτερο συντελεστή χρησιμοποίησης περιορίζοντας έτσι την φωτορύπανση.

Επίσης, ο συνδυασμός των σεναρίων που εξετάστηκαν (και είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία εγκαταστάσεων οδοφωτισμού που διακρίνονται για τον ποιοτικό και φιλικό προς τον χρήστη φωτισμό τους) με τεχνολογία dimming έτσι ώστε να υπολογιστεί η μείωση κατανάλωσης που μπορεί να επιτευχθεί κάνοντας τις παραπάνω υλοποιήσεις πιο ανταγωνιστικές και από πλευράς ενεργειακής κατανάλωσης. Παράλληλα ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η εφαρμογή μιας εγκατάστασης με ποιοτικό και φιλικό φωτισμό προς τον χρήστη και στην συνέχεια η παρατήρηση της με στόχο να διαπιστωθεί η συμβολή της εγκατάστασης στην μείωση των ατυχημάτων τις βραδινές ώρες.

Τέλος, περαιτέρω ερευνά θα μπορούσε να γίνει στην μέθοδο του παραρτήματος επιλογής κλάσεων της τεχνικής έκθεσης CEN/TR 13201 που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, με στόχο να μελετηθεί αν μπορεί να οδηγήσει σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού χαμηλότερης κατανάλωσης σε σχέση με την κλασική επιλογή κλάσεων με την μέθοδο των βαρών, εξαιτίας του εύρους που παρουσιάζει στην επιλογή της ελάχιστης τιμής λαμπρότητας του οδοστρώματος.

## Παράρτημα Α : Αποτελέσματα λογισμικού Oxytech.

Όπως σχολιάστηκε στο κεφάλαιο 7.3 για τον υπολογισμό της φωτεινής ροής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Oxytech, το οποίο παρείχε οι δυο πίνακες αντιστοιχούν τιμές γωνιών με ποσοστό φωτεινής έντασης που προσπίπτει στο οδόστρωμα. Ενδεικτικά παρατίθεται ο πίνακας που υπολογίστηκε το φωτιστικό τύπου III, καθώς εντελώς αντίστοιχα προέκυψαν οι πίνακες για τα υπόλοιπα φωτιστικά.

Πίνακας Α.1 Κατανομή φωτεινής ροής φωτιστικού Τύπου III

Piano	0.00	0.00%	Piano	0.00	0.00%
Piano	1.00	1.25%	Piano	1.00	1.28%
Piano	2.00	2.48%	Piano	2.00	2.59%
Piano	3.00	3.68%	Piano	3.00	3.94%
Piano	4.00	4.85%	Piano	4.00	5.31%
Piano	5.00	5.99%	Piano	5.00	6.71%
Piano	6.00	7.10%	Piano	6.00	8.15%
Piano	7.00	8.17%	Piano	7.00	9.62%
Piano	8.00	9.22%	Piano	8.00	11.13%
Piano	9.00	10.23%	Piano	9.00	12.68%
Piano	10.00	11.21%	Piano	10.00	14.27%
Piano	11.00	12.15%	Piano	11.00	15.89%
Piano	12.00	13.06%	Piano	12.00	17.53%
Piano	13.00	13.93%	Piano	13.00	19.20%
Piano	14.00	14.76%	Piano	14.00	20.88%
Piano	15.00	15.55%	Piano	15.00	22.58%
Piano	16.00	16.30%	Piano	16.00	24.27%
Piano	17.00	17.01%	Piano	17.00	25.95%
Piano	18.00	17.69%	Piano	18.00	27.63%
Piano	19.00	18.34%	Piano	19.00	29.29%
Piano	20.00	18.95%	Piano	20.00	30.93%
Piano	21.00	19.54%	Piano	21.00	32.54%
Piano	22.00	20.10%	Piano	22.00	34.12%
Piano	23.00	20.64%	Piano	23.00	35.66%
Piano	24.00	21.16%	Piano	24.00	37.15%
Piano	25.00	21.65%	Piano	25.00	38.59%
Piano	26.00	22.13%	Piano	26.00	39.96%
Piano	27.00	22.60%	Piano	27.00	41.24%
Piano	28.00	23.05%	Piano	28.00	42.43%
Piano	29.00	23.48%	Piano	29.00	43.51%
Piano	30.00	23.90%	Piano	30.00	44.48%
Piano	31.00	24.31%	Piano	31.00	45.32%
Piano	32.00	24.71%	Piano	32.00	46.06%
Piano	33.00	25.09%	Piano	33.00	46.69%
Piano	34.00	25.46%	Piano	34.00	47.23%
Piano	35.00	25.83%	Piano	35.00	47.71%
Piano	36.00	26.17%	Piano	36.00	48.13%
Piano	37.00	26.51%	Piano	37.00	48.51%
Piano	38.00	26.84%	Piano	38.00	48.85%
Piano	39.00	27.15%	Piano	39.00	49.17%
Piano	40.00	27.45%	Piano	40.00	49.46%
Piano	41.00	27.75%	Piano	41.00	49.72%
Piano	42.00	28.03%	Piano	42.00	49.97%
Piano	43.00	28.29%	Piano	43.00	50.20%
Piano	44.00	28.55%	Piano	44.00	50.42%
Piano	45.00	28.80%	Piano	45.00	50.63%
Piano	46.00	29.03%	Piano	46.00	50.83%
Piano	47.00	29.25%	Piano	47.00	51.02%
Piano	48.00	29.47%	Piano	48.00	51.20%
Piano	49.00	29.67%	Piano	49.00	51.37%

Piano	50.00	29.87%	Piano	50.00	51.54%
Piano	51.00	30.05%	Piano	51.00	51.69%
Piano	52.00	30.23%	Piano	52.00	51.85%
Piano	53.00	30.40%	Piano	53.00	51.99%
Piano	54.00	30.56%	Piano	54.00	52.13%
Piano	55.00	30.71%	Piano	55.00	52.27%
Piano	56.00	30.86%	Piano	56.00	52.39%
Piano	57.00	30.99%	Piano	57.00	52.52%
Piano	58.00	31.12%	Piano	58.00	52.64%
Piano	59.00	31.24%	Piano	59.00	52.75%
Piano	60.00	31.35%	Piano	60.00	52.86%
Piano	61.00	31.46%	Piano	61.00	52.97%
Piano	62.00	31.56%	Piano	62.00	53.07%
Piano	63.00	31.65%	Piano	63.00	53.16%
Piano	64.00	31.74%	Piano	64.00	53.25%
Piano	65.00	31.82%	Piano	65.00	53.34%
Piano	66.00	31.90%	Piano	66.00	53.42%
Piano	67.00	31.97%	Piano	67.00	53.50%
Piano	68.00	32.04%	Piano	68.00	53.58%
Piano	69.00	32.10%	Piano	69.00	53.64%
Piano	70.00	32.16%	Piano	70.00	53.71%
Piano	71.00	32.21%	Piano	71.00	53.77%
Piano	72.00	32.26%	Piano	72.00	53.82%
Piano	73.00	32.31%	Piano	73.00	53.87%
Piano	74.00	32.35%	Piano	74.00	53.92%
Piano	75.00	32.39%	Piano	75.00	53.96%
Piano	76.00	32.42%	Piano	76.00	54.00%
Piano	77.00	32.45%	Piano	77.00	54.03%
Piano	78.00	32.48%	Piano	78.00	54.06%
Piano	79.00	32.50%	Piano	79.00	54.09%
Piano	80.00	32.51%	Piano	80.00	54.11%
Piano	81.00	32.52%	Piano	81.00	54.12%
Piano	82.00	32.53%	Piano	82.00	54.14%
Piano	83.00	32.54%	Piano	83.00	54.15%
Piano	84.00	32.54%	Piano	84.00	54.16%
Piano	85.00	32.55%	Piano	85.00	54.17%
Piano	86.00	32.55%	Piano	86.00	54.17%
Piano	87.00	32.55%	Piano	87.00	54.17%
Piano	88.00	32.55%	Piano	88.00	54.18%
Piano	89.00	32.55%	Piano	89.00	54.18%
Piano	90.00	32.55%	Piano	90.00	54.18%

Το φωτιστικό Τύπου III που χρησιμοποιήθηκε στο σενάριο της φωτορύπανσης για κάναβο B5 με μήκος προεξοχής φωτεινού σημείου ίσο με 1,5 έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία γωνιών  $\omega = 25,64^\circ$  (γωνία δρόμου) και  $\phi=6,84^\circ$  (γωνία κρασπέδου). Ελέγχοντας τώρα τις τιμές στον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το ποσοστό της φωτεινής ροής που φτάνει στο οδόστρωμα και υπολογίζεται συνολικό άθροισμα φωτεινής ροής που προσπίπτει στο οδόστρωμα ίσο με  $0,3996+0,0817=0,5332$ . Άρα ο αριθμός 0,5332 αποτελεί τον συντελεστή χρησιμοποίησης της εγκατάστασης. Εντελώς ανάλογα υπολογίστηκαν και οι υπόλοιποι συντελεστές χρησιμοποίησης κάθε φωτιστικού.

## Παράρτημα Β : Αποτελέσματα προσομοίωσης λογισμικού Dialux

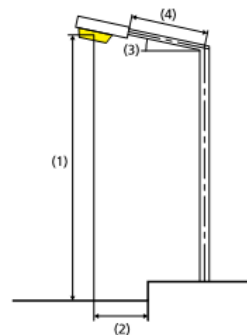
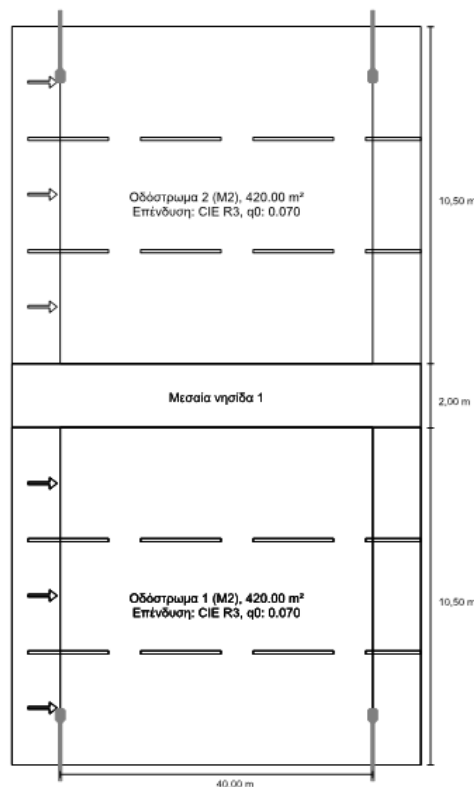
Στο παράρτημα Β παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του λογισμικού Dialux από τα σενάρια που εξετάστηκαν στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 7.3. Αντίστοιχα πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις για τα υπόλοιπα σενάρια.

### B1 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης σε κάνναβο E1

Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης στον κάνναβο E1 με θερμοκρασία χρώματος 4000K.

Δρόμος 1 προς EN 13201:2015

Schröder AMPERA MAXI / 5235 / 112 LEDs 450mA  
NW / 405912



Λάμπα:	1x112 LEDs 450mA NW
Φωτεινή ροή (φωτιστικό):	21539.76 lm
Φωτεινή ροή (λαμπτήρας):	25018.00 lm
Ωρες λειτουργίας	4000 h:
	100.0 %, 152.0 W
W/κm:	7600.0
Διάταξη:	αμφίπλευρα αντικριστά
Απόσταση ιστιών (κολόνες):	40.000 m
Κλίση βραχίονα (3):	0.0°
Μήκος βραχίονα (4):	1.370 m
Ύψος σημείου φωτός (1):	12.000 m
Προεξοχή φωτεινών σημείων (2):	1.500 m

ULR: 0.00

ULOR: 0.00

Μέγιστες τιμές της έντασης φωτός

πάνω από 70° 659 cd/klm \*

πάνω από 80° 133 cd/klm \*

πάνω από 90° 0.00 cd/klm \*

Κατηγορία φωτεινότητας:

G\*2

Κάθε φορά σε όλες τις κατευθύνσεις, που σχηματίζουν τη

δεδομένη γωνία με την κάτω κάθετο σε εγκαταστημένα φωτιστικά

που λειτουργούν.

\* Luminous intensity values in [cd/klm] for calculating luminous

intensity class refer to the output flux of the luminaire, according

EN 13201:2015.

Η διάταξη εκπληρεί την κατηγορία δείκτη τύφωσης D.4

Αποτελέσματα για πεδία αξιολόγησης  
Συντελεστής συντήρησης: 0.67

Οδόστρωμα 2 (M2)

Lm [cd/m²]	Uo	UI	TI [%]	EIR
≥ 1.50	≥ 0.40	≥ 0.70	≤ 10	≥ 0.35
✓ 1.53	✓ 0.47	✓ 0.74	✓ 10	✓ 0.51

Οδόστρωμα 1 (M2)

Lm [cd/m²]	Uo	UI	TI [%]	EIR
≥ 1.50	≥ 0.40	≥ 0.70	≤ 10	≥ 0.35
✓ 1.53	✓ 0.47	✓ 0.74	✓ 10	✓ 0.51

Αποτελέσματα για δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Δείκτης της πυκνότητας ισχύος (Dp) 0.015 W/klm²

Πυκνότητα κατανάλωσης ενέργειας

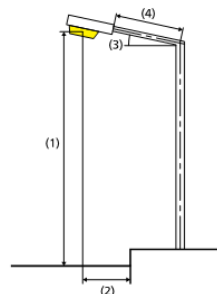
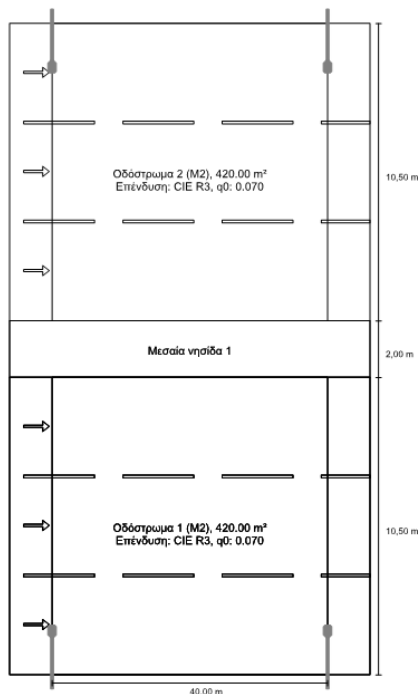
Διάταξη: AMPERA MAXI / 5235 / 112 LEDs 450mA NW / 405912 (1216.0 kWh/έτος) 1.4 kWh/m² έτος

Εικόνα Β.1 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου E1 με θερμοκρασία χρώματος 4000K

Στην συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε κάρναβο E1 με θερμοκρασία χρώματος 3000K.

Δρόμος 1 προς EN 13201:2015

SCHREDER 405912 AMPERA MAXI 5235 Flat glass  
- 112 OSOLON SQUARE GIANT@558mA Warm  
White830 230V 00-36-982 405912



Λάμπα: 1x112 OSOLON SQUARE GIANT@558mA Warm White830 230V 00-36-982  
 Φωτεινή ροή (φωτιστικό): 21567.31 lm  
 Φωτεινή ροή (λαμπτήρας): 25050.00 lm  
 Ώρες λειτουργίας: 4000 h: 100.0 %, 185.0 W  
 W/km: 9250.0  
 Διάταξη: αμφίπλευρα αντικριστά  
 Απόσταση ιστών (καλόνες): 40.000 m  
 Κλίση βραχίονα (3): 0.0°  
 Μήκος βραχίονα (4): 2.000 m  
 Ύψος σημείου φωτός (1): 12.000 m  
 Προεξοχή φωτεινών σημείων (2): 1.500 m

ULR: 0.00  
 ULOR: 0.00

Μέγιστες τιμές της έντασης φωτός πάνω από 70°: 659 cd/klm \*  
 πάνω από 80°: 133 cd/klm \*  
 πάνω από 90°: 0.00 cd/klm \*

Κατηγορία φωτεινότητας: G\*2

Κάθε φορά σε όλες τις κατευθύνσεις, που σχηματίζουν τη δεδομένη γωνία με την κάτω κάθετο σε εγκαταστημένα φωτιστικά που λειτουργούν.

\* Luminous intensity values in [cd/klm] for calculating luminous intensity class refer to the output flux of the luminaire, according EN 13201:2015.

Η διάταξη εκπληρεί την κατηγορία δείκτη τύφλωσης D.5

Αποτελέσματα για πεδία αξιολόγησης  
 Συντελεστής συντήρησης: 0.67

Οδόστρωμα 2 (M2)

Lm [cd/m <sup>2</sup> ] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 1.53	✓ 0.47	✓ 0.74	✓ 10	✓ 0.51

Οδόστρωμα 1 (M2)

Lm [cd/m <sup>2</sup> ] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 1.53	✓ 0.47	✓ 0.74	✓ 10	✓ 0.51

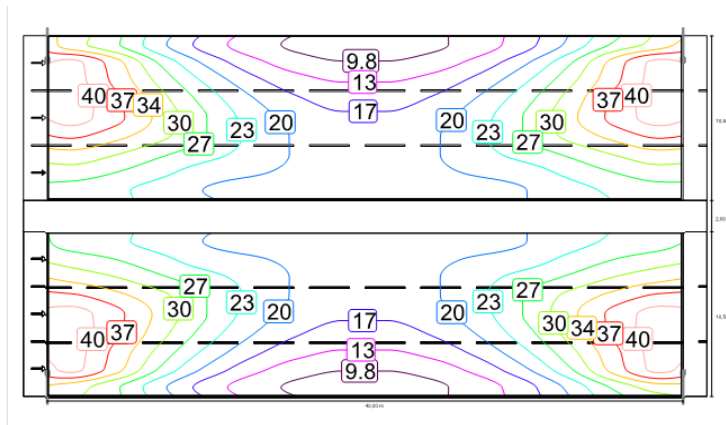
Αποτελέσματα για δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Δείκτης της πυκνότητας ισχύος (Dp) 0.018 W/lkm<sup>2</sup>

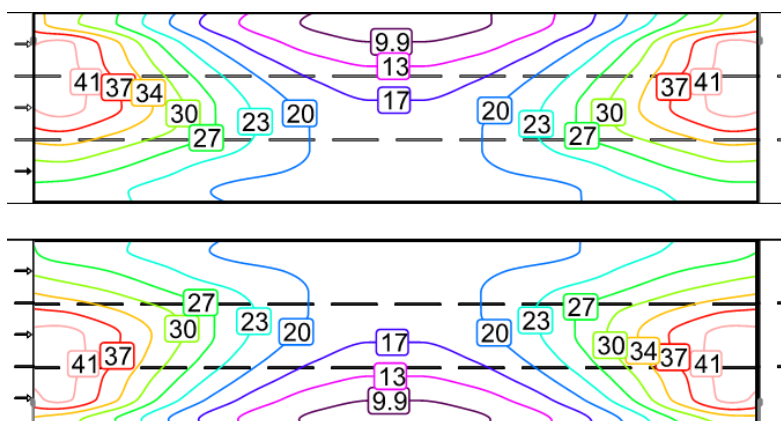
Πυκνότητα κατανάλωσης ενέργειας

Διάταξη: AMPERA MAXI 5235 Flat glass - 112 OSOLON SQUARE GIANT@558mA Warm White830 230V 00-36-982 405912 (1480.0 kWh/έτος) 1.8 kWh/m<sup>2</sup> έτος

Εικόνα Β.2 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου E1 με θερμοκρασία χρώματος 3000K



Εικόνα Β.3 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Ε1 με θερμοκρασία χρώματος 4000K  
(Ισοδύναμες γραμμές)



Εικόνα Β.4 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Ε1 με θερμοκρασία χρώματος 3000K  
(Ισοδύναμες γραμμές)

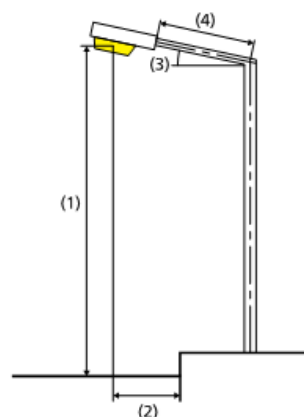
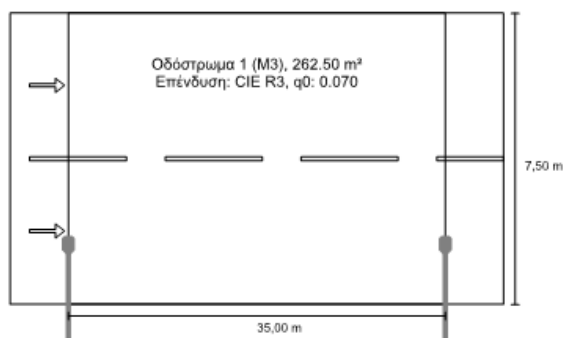


## B2 : Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου οικονομικότερης υλοποίησης σε κάρναβο B5

Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε κάρναβο B5 με θερμοκρασία χρώματος 4000K.

Δρόμος 1 προς EN 13201:2015

Schröder 403222 AMPERA MIDI 5136 Flat glass - 6 OSLO SQUARE GIANT@341mA Neutral White74 230V 00-36-649 403222



Αποτελέσματα για πεδία αξιολόγησης  
Συντελεστής συντήρησης: 0.67

Οδόστρωμα 1 (M3)

Lm [cd/m <sup>2</sup> ]	U <sub>0</sub>	U <sub>I</sub>	TI [%]	EIR
≥ 1.00	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.30
✓ 1.01	✓ 0.57	✓ 0.79	✓ 7	✓ 0.33

Αποτελέσματα για δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Δείκτης της πυκνότητας ισχύος (Dp)	0.019 W/lx·m <sup>2</sup>
Πυκνότητα κατανάλωσης ενέργειας	1.0 kWh/m <sup>2</sup> έτος
Διάταξη: AMPERA MIDI 5136 Flat glass - 64 OSLO SQUARE GIANT@341mA Neutral White740 230V 00-36-649 403222 (256.0 kWh/έτος)	

Λάμπα:	1x64 OSLO SQUARE GIANT@341mA Neutral White740 230V 00-36-649
Φωτεινή ροή (φωτιστικό):	9252.27 lm
Φωτεινή ροή (λαμπτήρας):	11000.00 lm
Ώρες λειτουργίας	
4000 h:	100.0 %, 64.0 W
W/km:	1856.0
Διάταξη:	μονόπλευρα κάτω
Απόσταση ιστών (κολόνες):	35.000 m
Κλίση βραχίονα (3):	0.0°
Μήκος βραχίονα (4):	2.500 m
Ύψος σημείου φωτός (1):	12.500 m
Προεξοχή φωτεινών σημείων (2):	1.500 m

ULR:	0.00
ULOR:	0.00

Μέγιστες τιμές της έντασης φωτός	
πάνω από 70°	985 cd/klm *
πάνω από 80°	48.2 cd/klm *
πάνω από 90°	0.00 cd/klm *

Κατηγορία φωτεινότητας: G\*3

Κάθε φορά σε όλες τις κατευθύνσεις, που σχηματίζουν τη δεδομένη γωνία με την κάτω κάθετο σε εγκαταστημένα φωτιστικά που λειτουργούν.

\* Luminous intensity values in [cd/klm] for calculating luminous intensity class refer to the output flux of the luminaire, according EN 13201:2015.

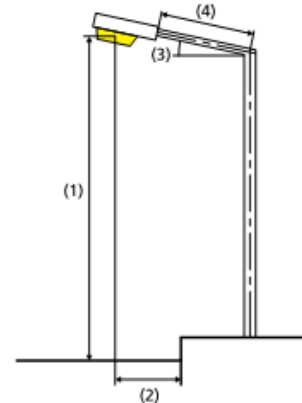
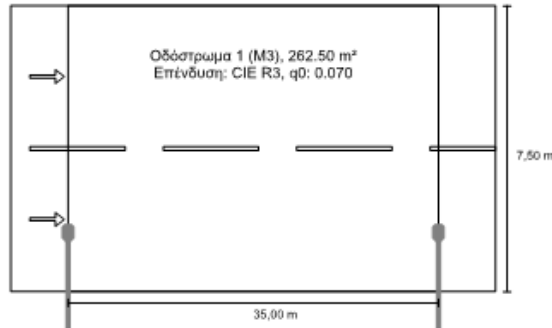
Η διάταξη εκπληρωεί την κατηγορία δείκτη τύφωσης D.6

Εικόνα B.5 Αποτελέσματα μελέτης κάρναβου B5 με θερμοκρασία χρώματος 4000K

Στην συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοίωσης σε κάρναβο E1 με θερμοκρασία χρώματος 3000K.

Δρόμος 1 προς EN 13201:2015

Schröder AMPERA MIDI / 5136 / 64 LEDs 400mA WW / 403222



Αποτελέσματα για πεδία αξιολόγησης  
Συντελεστής συντήρησης: 0.67

Οδόςτρωμα 1 (M3)

Lm [cd/m <sup>2</sup> ]	U <sub>0</sub>	U <sub>I</sub>	T <sub>I</sub> [%]	EIR
≥ 1.00	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.30
✓ 1.00	✓ 0.57	✓ 0.79	✓ 7	✓ 0.33

Αποτελέσματα για δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Δείκτης της πυκνότητας ισχύος (Dp)	0.023 W/lxkm <sup>2</sup>
Πυκνότητα κατανάλωσης ενέργειας	
Διάταξη: AMPERA MIDI / 5136 / 64 LEDs 400mA WW / 403222 (308.0 kWh/έτος)	1.2 kWh/m <sup>2</sup> έτος

Λάμπα:	1x64 LEDs 400mA WW
Φωτεινή ροή (φωτιστικό):	9079.84 lm
Φωτεινή ροή (λαμπτήρας):	10795.00 lm
Ώρες λειτουργίας	
4000 h:	100.0 %, 77.0 W
W/km:	2233.0
Διάταξη:	μονόπλευρα κάτω
Απόσταση ιστών (κολόνες):	35.000 m
Κλίση βραχίονα (3):	0.0°
Μήκος βραχίονα (4):	2.010 m
Ύψος σημείου φωτός (1):	12.500 m
Προεξοχή φωτεινών σημείων (2):	1.500 m

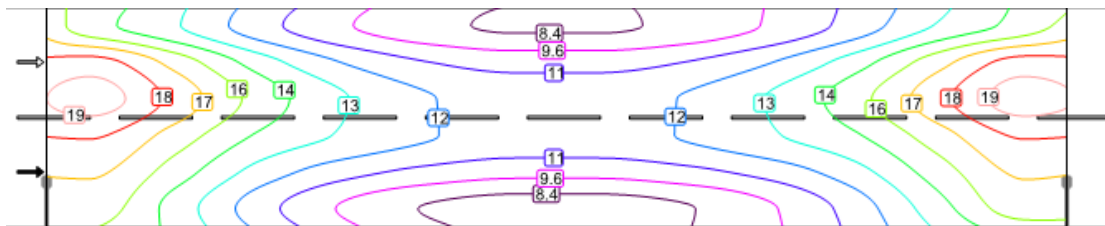
ULR:	0.00
ULOR:	0.00
Μέγιστες τιμές της έντασης φωτός	
πάνω από 70°	985 cd/klm *
πάνω από 80°	48.2 cd/klm *
πάνω από 90°	0.00 cd/klm *
Κατηγορία φωτεινότητας:	G*3

Κάθε φορά σε όλες τις κατευθύνσεις, που σχηματίζουν τη δεδομένη γωνία με την κάτω κάθετο σε εγκαταστημένα φωτιστικά που λειτουργούν.

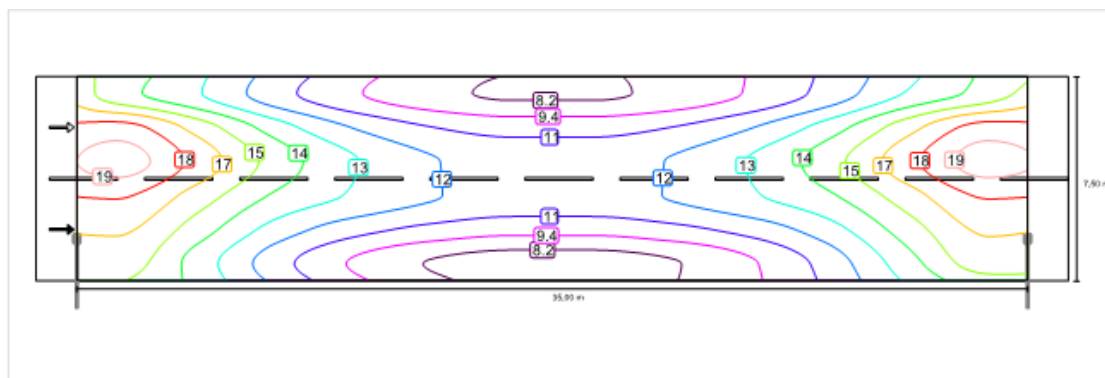
\* Luminous intensity values in [cd/klm] for calculating luminous intensity class refer to the output flux of the luminaire, according EN 13201:2015.

Η διάταξη εκπληρεί την κατηγορία δείκτη τύφλωσης D.6

Εικόνα Β.6 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Β5 με θερμοκρασία χρώματος 3000K



Εικόνα Β.7 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Β5 με θερμοκρασία χρώματος 4000K (Ισοδύναμες γραμμές)



Εικόνα Β.8 Αποτελέσματα μελέτης καννάβου Β5 με θερμοκρασία χρώματος 3000K (Ισοδύναμες γραμμές)

