



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

Μεθοδολογία βελτιστοποίησης εγκαταστάσεων οδοφωτισμού με χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΓΟΣ Θ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ

Επιβλέπων: Ευάγγελος-Νικόλαος Δ. Μαδιάς
Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Μάιος 2019



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

Μεθοδολογία βελτιστοποίησης εγκαταστάσεων οδοφωτισμού με χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΓΟΣ Θ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ

Επιβλέπων: Ευάγγελος-Νικόλαος Δ. Μαδιάς
Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

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

.....
Πάυλος Σ. Γεωργιάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2019

(Υπογραφή)

.....

Λαγός Θ. Σπυρίδων

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

© 2019 – All rights reserved

Copyright © Λαγός Θ. Σπυρίδων, 2019. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 το 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.

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας βελτιστοποίησης εγκαταστάσεων οδοφωτισμού, με τη χρησιμοποίηση της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE II. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μεθοδολογία εφαρμόζεται πιλοτικά σε 2 οδούς διαφορετικής κλάσης φωτισμού οι οποίοι φωτίζονται με 10 διαφορετικά φωτιστικά. Οι επιδόσεις της κάθε διάταξης αξιολογούνται σύμφωνα με καθορισμένα κριτήρια με καθορισμένο συντελεστή βάρους που καθορίζονται από τον χρήστη. Άρα η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε περίπτωση οδού με κριτήρια που θα θέτει ο χρήστης κατά τη δική του κρίση και με βαρύτητα των κριτηρίων που επίσης θα καθορίζει ο χρήστης.

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο μηχανισμό όρασης και σε βασικές έννοιες φωτισμού ενώ ορίζονται τα θεμελιώδη φωτοτεχνικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις μελέτες οδοφωτισμού. Το 2^ο Κεφάλαιο αφορά τις εγκαταστάσεις οδοφωτισμού. Παρουσιάζονται οι τεχνολογίες λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό, ενώ γίνεται εκτενής αναφορά στις φωτοεκπέμπουσες διόδους (LED), λόγω των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν καθώς και λόγω της σταδιακής επικράτησής τους τόσο στον εσωτερικό φωτισμό όσο και στον οδοφωτισμό. Τέλος, αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων οδοφωτισμού και τα συστήματα κεντρικής διαχείρισης του.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται ο τρόπος εφαρμογής και οι απαιτήσεις του ευρωπαϊκού προτύπου EN 13201 και της αντίστοιχης Τεχνικής Οδηγίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας. Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στα πολυκριτήρια συστήματα αποφάσεων ως ένα εργαλείο επίλυσης προβλημάτων απόφασης σχετικά με τον οδοφωτισμό. Επίσης, αναλύεται η πολυκριτήρια μέθοδος PROMETHEE II και το μαθηματικό υπόβαθρο της, που είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρατίθενται οι φωτομετρικές μελέτες που εκπονήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού RELUX. Εν συνεχεία, δίνονται οι πίνακες με τα κριτήρια και τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν από τη μέθοδο PROMETHEE II. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου και τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτά.

Λέξεις-κλειδιά

Φωτισμός δρόμων, εξοικονόμηση ενέργειας, εγκατάσταση οδοφωτισμού, LED, πρότυπο οδοφωτισμού, EN13201, TOTEE, πολυκριτήρια ανάλυση, PROMETHEE II

Abstract

The purpose of this thesis is the development of a method that optimizes street lighting facilities through the use of the PROMETHEE II multicriteria analysis method. In the thesis, the method is implemented in 2 pilot streets that belong to 2 different lighting classes and that are lit by 10 different luminaires. The performance of each setup is evaluated using defined criteria and defined weight coefficients, all defined by the user. As a result, the method can be implemented in any case of road, with criteria defined by the user according to his judgement, as well as weight coefficients also defined by the user.

In Chapter 1 the mechanism of sight and basic lighting concepts are introduced and fundamental photometric quantities used in road lighting are defined.

In Chapter 2 the importance of implementing street lighting is initially analyzed. Furthermore, the types of lamps used for this application are presented, with a thorough analysis of light-emitting diodes (LED), because of their advantages as well as their dominance in indoor and outdoor lighting. Finally, the technical specifications of road lighting installations and central management systems are described.

In Chapter 3 regards the requirements and specifications of the European Norm EN 13201 as well as Technical Directive of the Technical Chamber of Greece.

In Chapter 4 multicriteria decision systems are introduced as a tool to solve decision problems related to road lighting. Moreover, multicriteria method PROMETHEE II and its mathematical background are analyzed.

In Chapter 5 the lighting studies that were carried out by using the Relux software are demonstrated. Then the criteria and weights that were used by the implementation of PROMETHEE II are listed. Finally, the results of the method and the conclusions of this thesis are presented.

Key-words

Road lighting, energy saving, street lighting facilities, LED, road lighting standards, EN13201, TOTEE, multicriteria analysis, PROMETHEE II

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και τις χρήσιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Βαγγέλη Μαδιά, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής, για τις επεξηγήσεις και υποδείξεις του κατά την διεκπεραίωση της εργασίας, που με βοήθησαν ιδιαίτερα στην κατανόηση και σφαιρικότερη αντίληψη όσων έκανα. Ιδιαίτερα τον ευχαριστώ για τη διάθεση του να επιλύσει όλα τα προβλήματα που ανέκυπταν στην πορεία και να μου παρέχει κάθε δυνατή διευκόλυνση.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού	15
1.1 Φως και όραση	15
1.2 Φωτοανιχνευτές και τύποι όρασης	15
1.3 Βασικά φωτομετρικά μεγέθη	17
1.4 Φωτομετρικά μεγέθη που σχετίζονται με τον οδοφωτισμό	18
Κεφάλαιο 2: Ηλεκτροφωτισμός οδών.....	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά λαμπτήρων.....	22
2.2.1 Κατηγορίες λαμπτήρων	22
2.2.2 Λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (HPS).....	23
2.2.3 Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι(LED)	25
2.2.3.1 Αρχή λειτουργίας και δομή των LED	25
2.2.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	27
2.2.3.3 Ρύθμιση φωτεινής ροής LED(dimming)	28
2.2.3.4 Υπολογισμός διάρκειας ζωής.....	29
2.3 Εγκατάσταση συστήματος οδοφωτισμού	31
2.3.1 Χαρακτηριστικά φωτιστικών σωμάτων	31
2.3.2 Χαρακτηριστικά ιστών.....	34
2.4 Συστήματα διαχείρισης φωτισμού.....	36
Κεφάλαιο 3: Φωτισμός δρόμων με βάση το πρότυπο EN13201 και την Τεχνική Οδηγία του TEE(TOTEE).....	38
3.1 Εισαγωγή.....	38
3.2 Σχεδιασμός οδοφωτισμού.....	38
3.2.1 Επιλογή κλάσεων οδοφωτισμού.....	39
3.2.2 Επιλογή κλάσεων προσαρμοστικού οδοφωτισμού	43
3.2.3 Ποσοτικές και ποιοτικές απαιτήσεις οδοφωτισμού	44
3.3 Εκπόνηση μελέτης οδοφωτισμού.....	45
3.4 Υπολογισμός δεικτών ενεργειακής επίδοσης.....	46
3.5 Συντελεστής συντήρησης.....	47
Κεφάλαιο 4: Πολυκριτήρια συστήματα αποφάσεων.....	49
4.1 Η έννοια της απόφασης.....	49
4.2 Μοντελοποίηση προβλημάτων απόφασης.....	50

4.3	Πολυκριτήρια ανάλυση και σχετικές έννοιες.....	53
4.4	Η μέθοδος PROMETHEE II.....	57
	Κεφάλαιο 5: Μελέτη οδοφωτισμού και κατάταξη φωτιστικών με πολυκριτήρια ανάλυση.....	60
5.1	Περιγραφή γεωγραφικών στοιχείων οδού και χαρακτηριστικών οδοφωτισμού.....	60
5.2	Μελέτες οδοφωτισμού στους δρόμους κλάσης M3 και C4.....	61
5.2.1	Διάταξη 1.A.....	62
5.2.2	Διάταξη 1.B.....	63
5.2.3	Διάταξη 2.A.....	64
5.2.4	Διάταξη 2.B.....	65
5.2.5	Διάταξη 3.A.....	66
5.2.3	Διάταξη 3.B.....	67
5.2.7	Διάταξη 4.A.....	68
5.2.8	Διάταξη 4.B.....	69
5.2.9	Διάταξη 5.A.....	70
5.2.10	Διάταξη 5.B.....	71
5.2.11	Διάταξη 6.A.....	72
5.2.12	Διάταξη 6.B.....	73
5.2.13	Διάταξη 7.A.....	74
5.2.14	Διάταξη 7.B.....	75
5.2.15	Διάταξη 8.A.....	76
5.2.16	Διάταξη 8.B.....	77
5.2.17	Διάταξη 9.A.....	78
5.2.18	Διάταξη 9.B.....	79
5.2.19	Διάταξη 10.A.....	80
5.2.20	Διάταξη 10.B.....	81
5.3	Δεδομένα και παράμετροι εφαρμογής της μεθόδου PROMETHEE II.....	81
5.4	Φωτομετρικά αποτελέσματα και χαρακτηριστικά φωτιστικών.....	82
5.5	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	92
5.6	Συμπεράσματα.....	95
	Βιβλιογραφία.....	96
	Παράρτημα Α: Datasheets των υπό μελέτη φωτιστικών.....	98
	Παράρτημα Β: Αποτελέσματα φωτομετρικών μελετών.....	115

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1.	Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	15
Σχήμα 1.2.	Συντελεστής φασματικής ευαισθησίας.....	16
Σχήμα 2.1.	Λαμπτήρας ατμών νατρίου υψηλής πίεσης.....	23
Σχήμα 2.2.	Δομή ενός LED.....	25
Σχήμα 2.3.	Dimming με μείωση του ρεύματος τροφοδοσίας.....	29
Σχήμα 2.4.	Dimming με την τεχνική PWM.....	29
Σχήμα 2.5.	Τύποι φωτιστικών με κριτήριο την κατανομή τους στο οριζόντιο επίπεδο.....	32
Σχήμα 2.6.	Φωτιστικό τύπου non-cutoff.....	32
Σχήμα 2.7.	Φωτιστικό τύπου semi-cutoff.....	33
Σχήμα 2.8.	Φωτιστικό τύπου cutoff.....	33
Σχήμα 2.9.	Φωτιστικό τύπου full-cutoff.....	33
Σχήμα 2.10.	Μονόπλευρη διάταξη φωτιστικών.....	34
Σχήμα 2.11.	Αμφίπλευρη διάταξη φωτιστικών.....	35
Σχήμα 2.12.	Χιαστί διάταξη φωτιστικών.....	35
Σχήμα 2.13.	Κεντρική διάταξη φωτιστικών.....	35
Σχήμα 2.14.	Αξονική διάταξη φωτιστικών.....	35
Σχήμα 4.1.	Στάδια μοντελοποίησης ενός προβλήματος απόφασης.....	50
Σχήμα 4.2.	Πολυκριτήρια αξιολόγηση μιας δράσης.....	52
Σχήμα 4.3.	Μοντελοποίηση της ολικής προτίμησης με χρήση ολικού κριτηρίου.....	55
Σχήμα 4.4.	Ζώνες προτίμησης και αδιαφορίας.....	56
Σχήμα 5.1.A.	Κεντρική διάταξη φωτιστικών σε δρόμο κλάσης οδοφωτισμού M3.....	61
Σχήμα 5.1.B.	Κεντρική διάταξη φωτιστικών σε δρόμο κλάσης οδοφωτισμού C4.....	61
Σχήμα 5.2.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 1 στο δρόμο κλάσης M3.....	62
Σχήμα 5.3.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 1 στο δρόμο κλάσης C4.....	63
Σχήμα 5.4.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 2 στο δρόμο κλάσης M3.....	64
Σχήμα 5.5.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 2 στο δρόμο κλάσης C4.....	65
Σχήμα 5.6.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 3 στο δρόμο κλάσης M3.....	66
Σχήμα 5.7.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 3 στο δρόμο κλάσης C4.....	67
Σχήμα 5.8.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 4 στο δρόμο κλάσης M3.....	68
Σχήμα 5.9.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 4 στο δρόμο κλάσης C4.....	69
Σχήμα 5.10.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 5 στο δρόμο κλάσης M3.....	70
Σχήμα 5.11.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 5 στο δρόμο κλάσης C4.....	71
Σχήμα 5.12.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 6 στο δρόμο κλάσης M3.....	72
Σχήμα 5.13.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 6 στο δρόμο κλάσης C4.....	73
Σχήμα 5.14.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 7 στο δρόμο κλάσης M3.....	74
Σχήμα 5.15.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 7 στο δρόμο κλάσης C4.....	75
Σχήμα 5.16.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 8 στο δρόμο κλάσης M3.....	76

Σχήμα 5.17.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 8 στο δρόμο κλάσης C4.....	77
Σχήμα 5.18.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 9 στο δρόμο κλάσης M3.....	77
Σχήμα 5.19.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 9 στο δρόμο κλάσης C4.....	79
Σχήμα 5.20.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 10 στο δρόμο κλάσης M3.....	80
Σχήμα 5.21.	Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 10 στο δρόμο κλάσης C4.....	81
Σχήμα A.1.1.	Datasheet του φωτιστικού 1.....	98
Σχήμα A.1.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 1.....	99
Σχήμα A.2.1.	Datasheet του φωτιστικού 2.....	100
Σχήμα A.2.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 2.....	102
Σχήμα A.3.1.	Datasheet του φωτιστικού 3.....	103
Σχήμα A.3.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 3.....	104
Σχήμα A.4.1.	Datasheet του φωτιστικού 4.....	105
Σχήμα A.4.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 4.....	106
Σχήμα A.5.1.	Datasheet του φωτιστικού 5.....	107
Σχήμα A.5.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 5.....	108
Σχήμα A.6.1.	Datasheet του φωτιστικού 6.....	109
Σχήμα A.6.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 6.....	110
Σχήμα A.7.1.	Datasheet του φωτιστικού 7.....	111
Σχήμα A.7.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 7.....	111
Σχήμα A.8.1.	Datasheet του φωτιστικού 8.....	112
Σχήμα A.8.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 8.....	112
Σχήμα A.9.1.	Datasheet του φωτιστικού 9.....	113
Σχήμα A.9.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 9.....	113
Σχήμα A.10.1.	Datasheet του φωτιστικού 10.....	114
Σχήμα A.10.2.	Πολικό διάγραμμα του φωτιστικού 10.....	114
Σχήμα B.1.1.1.	Λαμπρότητα οδοστρώματος παρατηρητή #1 για το δρόμο κλάσης M3 με το φωτιστικό 1.....	115
Σχήμα B.1.1.2.	Λαμπρότητα οδοστρώματος παρατηρητή #2 για το δρόμο κλάσης M3 με το φωτιστικό 1.....	115
Σχήμα B.1.2.1.	Λαμπρότητα οδοστρώματος παρατηρητή #1 για το δρόμο κλάσης M3 με το φωτιστικό 2.....	116
Σχήμα B.1.2.2.	Λαμπρότητα οδοστρώματος παρατηρητή #2 για το δρόμο κλάσης M3 με το φωτιστικό 2.....	116
Σχήμα B.1.3.1.	Λαμπρότητα οδοστρώματος παρατηρητή #1 για το δρόμο κλάσης M3 με το φωτιστικό 3.....	117
Σχήμα B.1.3.2.	Λαμπρότητα οδοστρώματος παρατηρητή #2 για το δρόμο κλάσης M3 με το φωτιστικό 3.....	117

Κατάλογος πινάκων

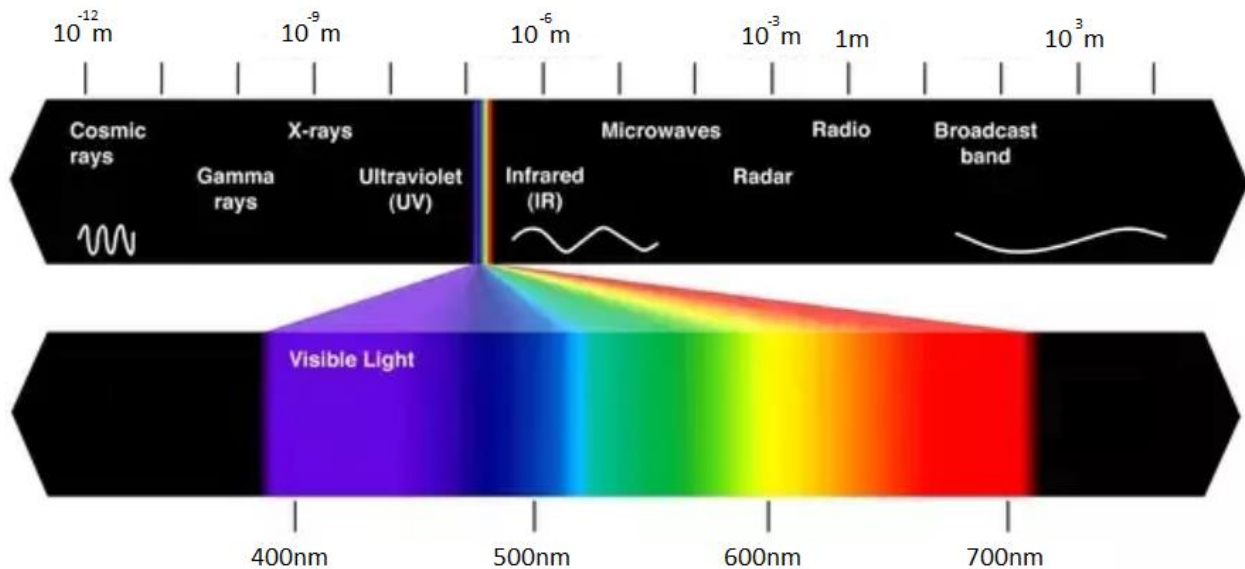
Πίνακας 2.1. Μέσοι όροι κανονικοποιημένων μετρήσεων ενός LED	31
Πίνακας 3.1. Παράμετροι επιλογής κλάσεων φωτισμού M κατά EN13201.1:2015.....	40
Πίνακας 3.2. Αντιστοίχιση κλάσεων M και C συναρτήσει του συντελεστή ανακλαστικότητας του οδοστρώματος Q_0	41
Πίνακας 3.3. Παράμετροι επιλογής κλάσεων φωτισμού C κατά EN13201.1:2015.....	42
Πίνακας 3.4. Παράμετροι επιλογής κλάσεων φωτισμού P κατά EN13201.1:2015.....	43
Πίνακας 3.5. Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού M.....	44
Πίνακας 3.6. Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού C	44
Πίνακας 3.7. Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού P.....	45
Πίνακας 4.1. Πολυκριτήριο πίνακας δράσεων.....	53
Πίνακας 4.2. Είδη γενικευμένων κριτηρίων και οι αντίστοιχες συναρτήσεις προτίμησης P(d). 58	
Πίνακας 5.1. Κριτήρια και βάρη της μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης M3.....	82
Πίνακας 5.2. Κριτήρια και βάρη της μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης C4.....	82
Πίνακας 5.3. Απαιτήσεις προτύπου EN13201 για κλάση οδοφωτισμού M3.....	82
Πίνακας 5.4. Απαιτήσεις προτύπου EN13201 για κλάση οδοφωτισμού C4.....	82
Πίνακας 5.5. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 1 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	83
Πίνακας 5.6. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 2 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	84
Πίνακας 5.7. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 3 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	85
Πίνακας 5.8. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 4 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	86
Πίνακας 5.9. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 5 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	87
Πίνακας 5.10. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 6 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	88
Πίνακας 5.11. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 7 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	89
Πίνακας 5.12. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 8 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	90
Πίνακας 5.13. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 9 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	91
Πίνακας 5.14. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 10 και φωτομετρικά αποτελέσματα.....	92
Πίνακας 5.15. Αποτελέσματα μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης M3.....	93
Πίνακας 5.16. Αποτελέσματα μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης C4.....	93
Πίνακας Β.1.1. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 1 στο δρόμο κλάσης M3.....	115
Πίνακας Β.1.2. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 2 στο δρόμο κλάσης M3.....	116
Πίνακας Β.1.3. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 3 στο δρόμο κλάσης M3.....	117
Πίνακας Β.1.4. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 4 στο δρόμο κλάσης M3.....	118
Πίνακας Β.1.5. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 5 στο δρόμο κλάσης M3.....	119
Πίνακας Β.1.6. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 6 στο δρόμο κλάσης M3.....	120
Πίνακας Β.1.7. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 7 στο δρόμο κλάσης M3.....	121
Πίνακας Β.1.8. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 8 στο δρόμο κλάσης M3.....	122

Πίνακας Β.1.9. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 9 στο δρόμο κλάσης Μ3.....	123
Πίνακας Β.1.10. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 10 στο δρόμο κλάσης Μ3..	124
Πίνακας Β.2.1. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 1 στο δρόμο κλάσης C4.....	125
Πίνακας Β.2.2. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 2 στο δρόμο κλάσης C4.....	125
Πίνακας Β.2.3. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 3 στο δρόμο κλάσης C4.....	126
Πίνακας Β.2.4. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 4 στο δρόμο κλάσης C4.....	126
Πίνακας Β.2.5. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 5 στο δρόμο κλάσης C4.....	127
Πίνακας Β.2.6. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 6 στο δρόμο κλάσης C4.....	127
Πίνακας Β.2.7. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 7 στο δρόμο κλάσης C4.....	128
Πίνακας Β.2.8. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 8 στο δρόμο κλάσης C4.....	128
Πίνακας Β.2.9. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 9 στο δρόμο κλάσης C4.....	129
Πίνακας Β.2.10. Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων φωτιστικού 10 στο δρόμο κλάσης C4...	129

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού

1.1 Φως και όραση

Το ορατό φως είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που γίνεται αντιληπτή από το αισθητήριο όργανο της όρασης, τον οφθαλμό. Καλύπτει ένα πολύ μικρό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συγκεκριμένα το φάσμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που χαρακτηρίζονται από μήκος κύματος από 380 nm έως 780 nm.



Σχήμα 1.1. Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [1]

Η όραση αποτελεί την αίσθηση που καθιστά δυνατή την αντίληψη του φωτός, των αντικειμένων και των χρωμάτων. Η λειτουργία της, παρά το γεγονός ότι δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητή, μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Οι ακτίνες του φωτός εισέρχονται στον οφθαλμό, διέρχονται από τα διαφανή στοιχεία του (τον κερατοειδή, το υδατοειδές υγρό, το φακό και το υαλοειδές σώμα), για να συγκεντρωθούν τελικά στον αμφιβληστροειδή. Εκεί μεταβάλλουν την κατάσταση των φωτοανιχνευτών του οφθαλμού, δηλαδή των κωνίων και των ραβδίων, προκαλώντας φωτοχημικές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό παράγονται ηλεκτρικά σήματα τα οποία εν συνεχεία διαβιβάζονται μέσω του οπτικού νεύρου στον εγκέφαλο [2].

1.2 Φωτοανιχνευτές και τύποι όρασης

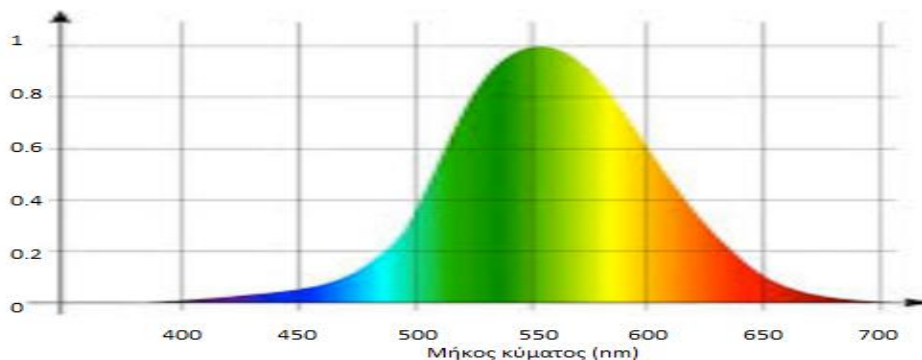
Στον ανθρώπινο οφθαλμό υπάρχουν δύο τύποι φωτοανιχνευτών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα κωνία και τα ραβδία. Παρά το γεγονός ότι η κατασκευή τους είναι παραπλήσια, ο τρόπος λειτουργίας τους και η συνεισφορά τους στην όραση διαφέρει αρκετά. Συγκεκριμένα, τα κωνία είναι περίπου 7 εκατομμύρια σε κάθε οφθαλμό, συγκεντρωμένα στο κέντρο του

αμφιβληστροειδούς. Είναι ευαίσθητα σε υψηλά επίπεδα φωτός και είναι υπεύθυνα για την όραση υπό συνθήκες φωτισμού, έστω και χαμηλού. Τέλος, είναι υπεύθυνα για την αντίληψη των χρωμάτων. Αντιθέτως τα ραβδία είναι πολυπληθέστερα, περίπου 120 εκατομμύρια και είναι συγκεντρωμένα στην περιφέρεια του αμφιβληστροειδούς. Δεν έχουν τη δυνατότητα αντίληψης χρωμάτων, αλλά είναι ευαίσθητα σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα φωτός και γι αυτό το λόγο είναι υπεύθυνα για την όραση υπό σκότος.

Με βάση τον τύπο φωτοανιχνευτών που βρίσκονται σε λειτουργία, η όραση διαχωρίζεται σε 3 διαφορετικά είδη [3].

- Φωτοπική όραση: Σε αυτόν τον τύπο όρασης ενεργά είναι τα κωνία. Η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός είναι σε υψηλά επίπεδα, είναι επομένως συνήθης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό το είδος όρασης εμφανίζεται για λαμπρότητες μεγαλύτερες από 5 cd/m^2 .
- Σκοτοπική όραση: Σε αυτή την περίπτωση, ενεργά είναι τα ραβδία. Η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός είναι σε χαμηλά επίπεδα ενώ δεν υπάρχει η δυνατότητα διάκρισης χρωμάτων. Πρόκειται για τον τύπο όρασης που εφαρμόζεται κατά τη νύχτα. Παρατηρείται για λαμπρότητες μικρότερες από 0.001 cd/m^2 .
- Μεσοπική όραση: Στη μεσοπική όραση παρατηρείται ταυτόχρονη λειτουργία κωνίων και ραβδίων, ενώ τα επίπεδα της λαμπρότητας που αναγνωρίζει ο οφθαλμός βρίσκονται ανάμεσα στις παραπάνω περιπτώσεις, στην περιοχή από 0.001 cd/m^2 έως 5 cd/m^2 . Ο βαθμός στον οποίο ενεργοποιείται κάθε είδος φωτοανιχνευτών μπορεί να μεταβάλλεται και καθορίζει τις διαφορετικές ικανότητες του οφθαλμού, όπως την αντίληψη των χρωμάτων ή της φωτεινότητας και την οπτική οξύτητα. Οι λαμπρότητες που αντιλαμβάνονται οι οδηγοί κατά τη διάρκεια της νύχτας βρίσκονται σε αυτήν την περιοχή και ως αποτέλεσμα ο οδοφωτισμός εντάσσεται σε αυτήν το είδος όρασης.

Εκτός όμως από τη διαφορετική ευαισθησία του οφθαλμού σε σχέση με τα επίπεδα λαμπρότητας, παρατηρείται και διαφορετική ευαισθησία σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ευαισθησία αυτή, ορίζεται ο συντελεστής φασματικής ευαισθησίας $V(\lambda)$. Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2. Συντελεστής φασματικής ευαισθησίας $V(\lambda)$ [2]

1.3 Βασικά φωτομετρικά μεγέθη

Φωτεινή Ενέργεια Q (Luminous Energy): Ως φωτεινή ενέργεια ορίζεται το κλάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στη ζώνη του φάσματος του ορατού φωτός, η οποία γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Προκύπτει από το ολοκλήρωμα στη ζώνη του ορατού φωτός, του γινομένου της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας μιας φωτεινής πηγής $W(\lambda)$ επί τον συντελεστή φασματικής ευαισθησίας $V(\lambda)$.

$$Q = \int_{\lambda=380nm}^{780nm} W(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Φωτεινή Ροή Φ (Luminous Flux): Ως φωτεινή ροή Φ ορίζεται η στοιχειώδης φωτεινή ενέργεια dQ που εκπέμπει μια σημειακή πηγή τοποθετημένη στην κορυφή ενός κώνου, εντός του κώνου αυτού, σε χρόνο dt .

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

Ονομάζεται και φωτεινή ισχύς καθώς εκφράζει την ποσότητα της φωτεινής ενέργειας που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή στη μονάδα του χρόνου προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση που καθορίζεται από τη μορφή της στερεάς γωνίας. Μονάδα μέτρησης είναι το *lumen* (lm). Ακόμη, η φωτεινή ροή μπορεί να οριστεί ακριβέστερα με τη βοήθεια της φασματικής ισχύος ακτινοβολίας $P(\lambda)$, ως:

$$\Phi = K_m \int_{380nm}^{780nm} P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

όπου $K_m = 683 \text{ lm/W}$ (η μέγιστη τιμή της φασματική φωτεινής απόδοσης του ανθρώπινου οφθαλμού για φωτοπική όραση).

Φωτεινή Ένταση I (Luminous Intensity): Ως φωτεινή ένταση I ορίζεται το διανυσματικό μέγεθος που καθορίζει το ποσό της φωτεινής ροής Φ που εκπέμπει η φωτεινή πηγή προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση του στερεού χώρου. Ορίζεται ως ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής $d\Phi$ που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία $d\omega$, προς τη γωνία αυτή.

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

Η μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης είναι το *candela* ($cd = \text{lm/sr}$).

Ένταση Φωτισμού E (Illuminance): Η ένταση φωτισμού E σε ένα σημείο μιας επιφάνειας ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής $d\Phi$ που προσπίπτει σε στοιχειώδη επιφάνεια εμβαδού dA η οποία περιέχει το σημείο αυτό, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής.

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

Μονάδα μέτρησης της έντασης φωτισμού είναι το *Lux* ή *lx*. Σε αντίθεση με τη φωτεινή ροή και την ένταση φωτισμού που αποτελούν ιδιότητες της φωτεινής πηγής, το συγκεκριμένο μέγεθος χρησιμοποιείται για να εκφράσει το αποτέλεσμα λειτουργίας των φωτιστικών σωμάτων.

Λαμπρότητα L (Luminance): Εάν παρατηρηθούν δύο φωτεινές πηγές ή επιφάνειες ίδιας φωτεινής έντασης I , αλλά διαφορετικού εμβαδού, διαπιστώνεται ότι αυτή με τη μικρότερη

επιφάνεια φαίνεται φωτεινότερη της άλλης. Διαπιστώνεται έτσι η αναγκαιότητα ορισμού ενός μεγέθους που εκφράζει αυτό που βλέπει ο παρατηρητής. Το μέγεθος αυτό είναι η λαμπρότητα L και ορίζεται ως η φωτεινή ένταση I στην κατεύθυνση του παρατηρητή προς τη φαινόμενη επιφάνεια S της πηγής από τη θέση του παρατηρητή.

$$L = \frac{I}{S}$$

όπου S το εμβαδόν της γεωμετρικής προβολής της πηγής στην κατεύθυνση παρατήρησης του παρατηρητή. Η λαμπρότητα μετράται σε candela ανά τετραγωνικό μέτρο (cd/m^2) και εκφράζει το πόσο φωτεινή βλέπει ο παρατηρητής μια επιφάνεια, όντας το μόνο βασικό φωτομετρικό μέγεθος που γίνεται άμεσα αντιληπτό από το μάτι. Χαρακτηρίζει την φωτεινότητα της επιφάνειας και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάκλασή της.

Θερμοκρασία Χρώματος (Colour Correlation Temperature): Η θερμοκρασία χρώματος T_c , που μετράται σε βαθμούς Kelvin, αποτελεί το μέτρο που περιγράφει το χρώμα των φωτεινών πηγών. Συγκεκριμένα, εκφράζει τη θερμοκρασία στην οποία, εάν βρεθεί ένα μέλαν σώμα, θα εκπέμπει ακτινοβολία ίδιου χρώματος με αυτό της φωτεινής πηγής. Διακρίνονται 3 κατηγορίες:

- Ζεστό λευκό, με $T_c < 3300 \text{ }^\circ\text{K}$
- Ουδέτερο λευκό, με $3300 \text{ }^\circ\text{K} < T_c < 5000 \text{ }^\circ\text{K}$
- Λευκό ημέρας ή ψυχρό λευκό, με $T_c > 5000 \text{ }^\circ\text{K}$

Δείκτης Χρωματικής Απόδοσης (Colour Rendering Index): Η δυνατότητα μιας φωτεινής πηγής να πραγματοποιήσει μια πραγματική απεικόνιση του χρώματος ενός αντικειμένου περικλείεται στο δείκτη χρωματικής απόδοσης R_a ή CRI. Ο δείκτης εκφράζει το χρωματικό εύρος της φωτεινής πηγής ή διαφορετικά, τη δυνατότητά της να καλύπτει μεγάλο φάσμα μηκών κύματος. Ο δείκτης αυτός παίρνει τιμές στο διάστημα $[0, 100]$ και υψηλές τιμές του υποδηλώνουν καλή ποιότητα χρώματος.

Φωτεινή Απόδοση (Luminous Efficacy)

Η φωτεινή απόδοση, που μετριέται σε lm/W , εκφράζει το ποσό της αποδιδόμενης φωτεινής ροής ενός λαμπτήρα για κάθε Watt καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αύξηση των lumen ανά καταναλισκόμενο Watt σημαίνει υψηλότερη απόδοση και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η μέγιστη θεωρητική φωτεινή απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί μετατρέποντας όλη την ενέργεια σε ορατό φως είναι $683 \text{ lm}/\text{W}$. Στη πράξη επιτυγχάνονται πολύ μικρότερες τιμές. [4]

1.4 Φωτομετρικά μεγέθη που σχετίζονται με τον οδοφωτισμό

Θάμβωση (Glare): Θάμβωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο οι συνθήκες ορατότητας είναι τέτοιες ώστε κάποιος να αισθάνεται ενόχληση και μείωση της ικανότητας να διακρίνει αντικείμενα εξαιτίας της ακατάλληλης κατανομής της λαμπρότητας στο πεδίο παρατήρησής του, λόγω υπερβολικών αντιθέσεων της. Η θάμβωση μπορεί να πάρει δύο μορφές, οι οποίες μπορούν να παρατηρηθούν ξεχωριστά ή και ταυτόχρονα. Οι δύο μορφές είναι γνωστές ως εξής:

- Θάμβωση ανικανότητας (disability glare), η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία εκτέλεσης πράξεων λόγω οπτικής ανικανότητας και

- Θάμβωση δυσφορίας (discomfort glare), η οποία δημιουργεί αίσθημα δυσφορίας αλλά δε μειώνει την οπτική ικανότητα απαραίτητως.

Επίσης, ανεξάρτητα από τη μορφή της, η θάμβωση μπορεί να είναι άμεση ή εξ' ανακλάσεως. Η άμεση θάμβωση μπορεί να προκληθεί από ένα «διαίτερα φωτεινό» φωτιστικό το οποίο θα βρεθεί εντός του οπτικού πεδίου ενός παρατηρητή. Για παράδειγμα, άμεση θάμβωση προκαλείται σε έναν οδηγό από τους προβολείς ενός οχήματος που κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση κυκλοφορίας. Η εξ' ανακλάσεως θάμβωση προκύπτει όταν κάποιο φωτιστικό σώμα φωτίζει εκτός από τον δρόμο και κάποιο άλλο κοντινό σημείο (σπίτι, πινακίδα, τοίχο) έτσι ο φωτισμός ανακλάται και το αποτέλεσμα του οπτικού πεδίου του παρατηρητή αλλοιώνεται.

Μέθοδοι υπολογισμού θάμβωσης

Για την εκτίμηση της θάμβωσης στον φωτισμό δρόμου, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω δύο μέθοδοι [4]:

Η μέθοδος Glare Control Mark (GCM), η οποία χρησιμοποιείται για την περιγραφή και ποσοτικοποίηση της ψυχολογικής θάμβωσης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δε μας ενδιαφέρει και η μέθοδος δε θα αναλυθεί περαιτέρω.

Η μέθοδος της «αύξησης κατωφλίου» (Threshold Increment ή TI), αποτελεί μια άλλη μέθοδο έκφρασης της επίδρασης της θάμβωσης. Γενικά, οι τιμές TI θα πρέπει να συνδεθούν με την ασφάλεια στο δρόμο. Παρά το γεγονός ότι η σχέση μεταξύ TI και οδικής ασφάλειας είναι άγνωστη, υπάρχει μια γνωστή σχέση μεταξύ της ικανότητας οπτικής εκτέλεσης και της οδικής ασφάλειας. Έτσι, ο υπολογισμός της θάμβωσης με τη μέθοδο TI είναι απαραίτητος σε κάθε μελέτη οδοφωτισμού, αφού όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, αποτελεί το μοναδικό κριτήριο σχετικό με τη θάμβωση που πρέπει να πληρείται, με βάση το πρότυπο EN 13201.

Η τιμή του TI δίνεται από την παρακάτω σχέση:

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

Όπου L_v : ισοδύναμη λαμπρότητα σε cd/m^2 για έναν παρατηρητή ο οποίος βλέπει κατά το διαμήκη άξονα του δρόμου υπό κλίση 1° ως προς το οριζόντιο επίπεδο

L_{av} : η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου σε cd/m^2 .

Η λαμπρότητα L_{av} υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$L_{av} = \frac{k \cdot E_{gl}}{\theta^n}$$

Όπου

k : παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από την ηλικία του παρατηρητή. Για παράδειγμα, για παρατηρητή 25 ετών ισχύει $k=9.2$.

E_{gl} : η ένταση φωτισμού στο επίπεδο του οφθαλμού του παρατηρητή προερχόμενη από την πηγή θάμβωσης

θ : η γωνία μεταξύ της γραμμής θέασης του παρατηρητή και της πηγής που προκαλεί θάμβωση

n : σταθερά η οποία εξαρτάται από την γωνία θ

$$n = 2.3 - 0.07 \cdot \log \theta, \text{ για } 0.2^\circ < \theta < 2^\circ$$

$$n = 2, \text{ για } \theta > 2^\circ$$

Πρακτικά η θάμβωση μπορεί να αποφευχθεί όταν μεταξύ των σημείων του οπτικού πεδίου με την μέγιστη και την ελάχιστη λαμπρότητα ισχύει η σχέση [5]:

$$\frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\min}} < 10\%$$

Ομοιομορφία (Uniformity)

Η ορατότητα ενός αντικειμένου επί του οδοστρώματος εξαρτάται από την κατανομή της λαμπρότητας πάνω σε αυτό. Εισάγεται, λοιπόν, η έννοια της ομοιομορφίας της κατανομής της λαμπρότητας, την οποία εκφράζουν οι ακόλουθοι συντελεστές:

Ο γενικός συντελεστής ομοιομορφίας (U_0) ορίζεται ως ο λόγος L_{\min}/L_{mean} , όπου L_{\min} η ελάχιστη λαμπρότητα στο σύνολο της υπό μελέτη επιφάνειας του οδοστρώματος και L_{mean} η μέση τιμή της λαμπρότητας στη συγκεκριμένη περιοχή.

Ο συντελεστής διαμήκους ομοιομορφίας (U_l) ορίζεται ως ο λόγος L_{\min}/L_{\max} σε ευθείες παράλληλες προς τον άξονα του δρόμου κι έτσι αντικατοπτρίζει την ομοιομορφία που αντιλαμβάνεται ο οδηγός κινούμενος κατά τον άξονα του οδοστρώματος. Είναι προφανής, λοιπόν, η επίδραση της διαμήκους ομοιομορφίας στην αρτιότητα του συστήματος φωτισμού καθώς ανεπάρκειά της συνεπάγεται προβλήματα άνεσης και ασφάλειας.

Ο συντελεστής εγκάρσιας ομοιομορφίας (U_v) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος L_{\min}/L_{\max} σε ευθείες κάθετες προς τον άξονα της οδού. Ικανοποιητική τιμή εγκάρσιας ομοιομορφίας επιτρέπει στον οδηγό να διακρίνει την επιφάνεια του οδοστρώματος καθ' όλο του το πλάτος.

Αντίθεση της λαμπρότητας (Contrast): Η αναγνώριση των αντικειμένων βασίζεται στη διαφορά λαμπρότητας των αντικειμένων και του περιβάλλοντος τους. Αυτή η διαφορά αποτελεί την αντίθεση λαμπρότητας και δίνεται από την εξίσωση:

$$C = \frac{L_0 - L_S}{L_S}$$

Όπου L_0 είναι η λαμπρότητα του αντικειμένου και L_S η λαμπρότητα του περιβάλλοντος, δηλαδή του φόντου μέσα στο οποίο επιδιώκεται το αντικείμενο να γίνει ορατό. Η τιμή της αντίθεσης λαμπρότητας κυμαίνεται από -1 έως άπειρο. Στις θετικές τιμές το αντικείμενο εμφανίζεται σαν φωτεινή εικόνα μέσα σε ένα σκοτεινό περιβάλλον. Συνήθως ο οδηγός αναγνωρίζει ένα αντικείμενο σαν σκοτεινή φιγούρα μέσα στο φωτεινό περιβάλλον της επιφάνειας του οδοστρώματος, που αναλογεί σε αρνητικές τιμές αντίθεσης.

Κεφάλαιο 2: Ηλεκτροφωτισμός οδών

2.1 Εισαγωγή

Αποτελεί αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι κατά τις βραδινές ώρες ο οδηγός δε δύναται να ανταποκριθεί στον ίδιο βαθμό όπως κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε καταστάσεις που απαιτούν την εκτέλεση ενεργειών εκ μέρους του. Αυτό συμβαίνει διότι τα χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού συνεπάγονται μειωμένη ικανότητα για έναν οδηγό να διακρίνει το περιβάλλον του. Γίνεται επομένως σαφής η αναγκαιότητα εγκατάστασης τεχνητού ηλεκτροφωτισμού σαν ένα μέσο επίλυσης των προβλημάτων ασφαλείας που προκύπτουν από τις μετακινήσεις κατά τις βραδινές ώρες. Στα πλεονεκτήματα που παρέχει συγκαταλέγεται επίσης η διευκόλυνση των μετακινήσεων των πεζών. Ειδικότερα, οι δυνατότητες που οφείλει να εξασφαλίζει στον οδηγό είναι να μπορεί να καθορίσει την κίνηση του οχήματός και την ίδια τη θέση του, την οριζόντια ή κάθετη σήμανση της οδού, την κατάσταση της οδού στο τμήμα το οποίο έχει σκοπό να διανύσει στα επόμενα 5 έως 10 δευτερόλεπτα, καθώς επίσης και την αντίστοιχη θέση και κίνηση των άλλων οχημάτων και την ύπαρξη πάνω στο οδόστρωμα των τυχόντων εμποδίων [6]. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε σχεδόν όλες τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται οδοφωτισμός, με εξαίρεση ίσως την περίπτωση οδών με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, σε λίγες φορές μόνο υπάρχει οικονομική δικαιολόγηση του, ιδιαίτερα σε τμήματα υπεραστικών οδών. Παρόλα αυτά, ο οδοφωτισμός είναι απαραίτητος καθώς μελέτες έχουν δείξει ότι τα ατυχήματα που συμβαίνουν κατά τις βραδινές ώρες είναι δυσανάλογα περισσότερα σε πλήθος και σοβαρότητα σε σχέση με αυτά που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της ημέρας. [7]

Πέραν όμως από τα προφανή πλεονεκτήματα της χρήσης οδοφωτισμού, δηλαδή της διευκόλυνσης των μετακινήσεων και της εν γένει μείωσης των ατυχημάτων, υπάρχουν επιπλέον πλεονεκτήματα που γίνονται εμφανή με τη σωστή σχεδίαση μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού. Σε αυτά συγκαταλέγονται:

- Η εξοικονόμηση ενέργειας. Όταν μια εγκατάσταση οδοφωτισμού σχεδιάζεται με γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας, τα οφέλη μπορεί να είναι πολύ σημαντικά. Τα έξοδα δήμων και κοινοτήτων για την παροχή αυτής της υπηρεσίας αποτελούν μεγάλο ποσοστό του λογαριασμού της ΔΕΗ. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των LED και των συστημάτων κεντρικής διαχείρισης προσφέρει ιδιαίτερες δυνατότητες σε αυτόν τον τομέα και θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου.
- Η μείωση της εγκληματικότητας. Έρευνες έχουν δείξει ότι η εγκατάσταση οδοφωτισμού αυξάνει το αίσθημα ασφάλειας που αισθάνονται οι διερχόμενοι από μια οδό, ενώ αποθαρρύνει επίδοξους εγκληματίες. [8]
- Η βελτίωση της αισθητικής του τοπίου. Μια εγκατάσταση οδοφωτισμού διαμορφώνει το τοπίο γύρω της. Ιδιαίτερα στην περίπτωση πόλεων κατά τη διάρκεια της νύχτας, επηρεάζει το πόσο άνετα αισθάνονται οι άνθρωποι στο περιβάλλον τους. Παράλληλα, ελκυστικά φωτισμένες πόλεις προσελκύουν επισκέπτες και πελάτες για τις τοπικές επιχειρήσεις.

Βεβαίως δεν πρέπει να παραληφθούν οι αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν από την υλοποίηση μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού. Αρχικά, μια κακή μελέτη οδοφωτισμού μπορεί να επιδεινώσει την κατάσταση για τους οδηγούς. Μια τέτοια περίπτωση μπορεί να παρατηρηθεί για παράδειγμα στην περίπτωση που ο εγκατεστημένος οδοφωτισμός είναι ανεπαρκής ή προκαλεί έντονη θάμβωση.

Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα του οδοφωτισμού είναι η συνεισφορά του στο φαινόμενο της φωτορύπανσης. Φωτορύπανση είναι η ακατάλληλη ή υπερβολική χρήση τεχνητού φωτισμού και η οποία μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στον άνθρωπο, σε όλα τα έμβια όντα αλλά και στο περιβάλλον [9]. Εκφράζεται με μορφές όπως:

- Η θάμβωση
- Η αύξηση της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού, ιδιαίτερα στην περίπτωση αστικών κέντρων
- Η ακούσια διάχυση φωτός σε περιοχές που δεν είναι επιθυμητή (light trespass), π.χ. ένα φωτιστικό εκπέμπει φως μέσω του παραθύρου στο υπνοδωμάτιο ενός παρακείμενου σπιτιού
- Clutter, δηλαδή σύγχυση, που προκαλείται από τη συγκέντρωση έντονων και πολυπληθών φωτεινών πηγών σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση παρατήρησης.

Το φαινόμενο της φωτορύπανσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό, έτσι η μελέτη μιας εγκατάστασης οδοφωτισμού οφείλει να το λαμβάνει υπ' όψιν και να το περιορίζει όσο το δυνατόν περισσότερο. Αυτή η μείωση μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση της φωτεινής ροής της εγκατάστασης μέσω dimming, εφόσον βεβαίως το επιτρέπουν οι συνθήκες και με την επιλογή φωτιστικών σωμάτων που όλη τη φωτεινή ροή τους συγκεντρώνεται κάτω από τις 90°.

2.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά λαμπτήρων

2.2.1 Κατηγορίες λαμπτήρων

Ο ηλεκτρικός φωτισμός εμφανίστηκε το 1879 με την παρουσίαση του λαμπτήρα πυρακτώσεως από τον Thomas Edison. Έκτοτε αναπτύσσεται διαρκώς, με τη συνεχή βελτίωση των λαμπτήρων που ήδη υπάρχουν και την παρουσίαση νέων τύπων λαμπτήρων μέσω της χρήσης νέων τεχνολογιών.

Στον προηγούμενο αιώνα παρουσιάστηκε μια τεράστια ανάπτυξη της τεχνολογίας των λαμπτήρων που διατέθηκαν στην αγορά. Η αρχή έγινε με την βελτίωση του λαμπτήρα του Edison και εν συνεχεία αναπτύχθηκαν οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου κατά τη δεκαετία του 1930, ενώ ακολούθησαν οι λαμπτήρες φθορισμού το 1939. Οι λαμπτήρες αλογόνου εισήχθησαν κατά τη δεκαετία του 1950 και των μεταλλικών αλογονιδίων και του νατρίου υψηλής πίεσης στη δεκαετία του 1960. Τέλος, η τεχνολογία φωτισμού στερεής κατάστασης (Solid State Lighting-SSL) πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1970.

Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται επομένως βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες και κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

A) Λαμπτήρες πυρακτώσεως

A.1 Κοινοί

A.2 Αλογόνου

B) Λαμπτήρες φθορισμού

Γ) Λαμπτήρες επαγωγής

Δ) Λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης

Δ.1 Λαμπτήρες Μεταλλικών Αλογονιδίων

Δ.2 Λαμπτήρες Ατμών Υδραργύρου Υψηλής Πίεσης

Δ.3 Λαμπτήρες Μεικτού Φωτισμού ή Βολφραμίου

Δ.4 Λαμπτήρες Ατμών Νατρίου Χαμηλής Πίεσης

Δ.5 Λαμπτήρες Ατμών Νατρίου Υψηλής πίεσης

E) Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (LED)

Από όλες τις παραπάνω κατηγορίες λαμπτήρων, αυτοί που κατ' εξοχήν χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις οδοφωτισμού είναι οι λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης και οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι, που θα περιγραφούν παρακάτω.

2.2.2 Λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (HPS)



Σχήμα 2.1. Λαμπτήρας ατμών νατρίου υψηλής πίεσης

Οι λάμπες ατμών υψηλής πίεσης οφείλουν το φως τους στην ηλεκτρική εκκένωση που εκδηλώνεται σε ένα σωλήνα που περιέχει ατμούς νατρίου σε συνθήκες υψηλής πίεσης. Οι λαμπτήρες αυτοί είναι κατασκευασμένοι με δυο σωλήνες, ο ένας μέσα στον άλλο. Ο εσωτερικός σωλήνας είναι κατασκευασμένος από πολυκρυσταλλική αλουμίνα, που είναι ανθεκτική στο νάτριο σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει υψηλό σημείο τήξης. Μια ακόμη ιδιότητα του

συγκεκριμένου υλικού είναι ότι είναι διαφανές, επιτυγχάνοντας γι αυτό το λόγο μεγάλη απόδοση εκπεμπομένου φωτός.

Η πολυκρυσταλλική αλουμίνα δεν μπορεί να λιώσει χωρίς να σπάσει. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο κράμα, κατασκευασμένο συνήθως από γυαλί ή ασάλι. Αυτά τα υλικά προσδίδουν στην αλουμίνα μεγάλη αντοχή στο νάτριο υψηλής θερμοκρασίας. Ο σωλήνας περιέχει ξένο ως αέριο έναυσης, καθώς και μια μικρή ποσότητα μίγματος νατρίου και υδραργύρου, το οποίο είναι μερικώς ατμοποιημένο όταν ο λαμπτήρας βρεθεί σε θερμοκρασία λειτουργίας. Ο υδράργυρος λειτουργεί ως αέριο απομόνωσης και αυξάνει την πίεση και την τάση λειτουργίας του λαμπτήρα. Το εξωτερικό γυάλινο κάλυμμα είναι κενό και ο ρόλος του είναι να αποτρέπει αντίδραση των μεταλλικών μερών του εσωτερικού σωλήνα αλλά και να διατηρεί τη θερμοκρασία του απομονώνοντας τον από τις περιβαλλοντικές θερμοκρασίες. Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης εκπέμπουν ακτινοβολία σε όλο το ορατό φάσμα, σε αντίθεση με της χαμηλής πίεσης που εκπέμπουν κυρίως στα 589nm. Αυξάνοντας την πίεση του νατρίου, πρακτικά αυξάνεται το ποσοστό της ακτινοβολίας σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Όμως, η διάρκεια ζωής και η απόδοση μειώνονται.

Λόγω της μικρής διαμέτρου των σωλήνων των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης, δεν μπορεί να τοποθετηθεί ηλεκτρόδιο έναυσης μέσα στο σωλήνα. Αντ' αυτού, τροφοδοτείται από παλμό υψηλής συχνότητας. Μερικοί ειδικοί λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης χρησιμοποιούν ένα ειδικό μίγμα αερίων έναυσης (ένα μίγμα αργού και νέον που απαιτεί χαμηλότερη τάση έναυσης απ' ότι κάθε αέριο χωριστά). Εφόσον ο λαμπτήρας ατμών νατρίου υψηλής πίεσης δεν περιέχει ηλεκτρόδιο έναυσης, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται ένας παλμός υψηλής τάσης και συχνότητας που ιονίζει το αέριο έναυσης. Μόλις λειτουργήσει, ο λαμπτήρας ζεσταίνεται μέχρι να αποκτήσει τη μέγιστη απόδοση του σε περίπου δέκα λεπτά, κατά την διάρκεια των οποίων το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός μεταβάλλεται έως ότου σταθεροποιηθεί.

Το βασικότερο πλεονέκτημα των λαμπτήρων ατμών νατρίου υψηλής πίεσης είναι η υψηλή απόδοσή τους, που μπορεί να φτάσει έως και 150lm/W.

Στα μειονεκτήματά τους εντάσσεται η χαμηλή απόδοση χρωμάτων καθώς και η δυσκολία εφαρμογής προγραμμάτων προσαρμοστικού φωτισμού για λόγους που αφορούν:

- Την απόδοση: Η σχέση της μείωσης της κατανάλωσης του φωτιστικού και της μείωσης της φωτεινής ροής δεν είναι γραμμική και μάλιστα η φωτεινή ροή μειώνεται ταχύτερα από την ισχύ.
- Dimming κάτω από το 50%: Το dimming κάτω από το 50% της ονομαστικής ισχύος αποφεύγεται στους HPS λαμπτήρες καθώς μπορεί να επιδεινώσει τη διάρκεια ζωής και την απόδοση τους και να μεταβάλλει την θερμοκρασία χρώματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.
- Την εμφάνιση φωτεινής μαρμαρυγής: Η φωτεινή μαρμαρυγή (flicker) αποτελεί την ταχεία μεταβολή του φωτισμού μιας φωτεινής πηγής και αποτελεί ανεπιθύμητο φαινόμενο, καθώς η ύπαρξη του προκαλεί οπτική δυσφορία. Η ρύθμιση της φωτεινής ροής των λαμπτήρων εκκενώσεως μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση φωτεινής μαρμαρυγής.

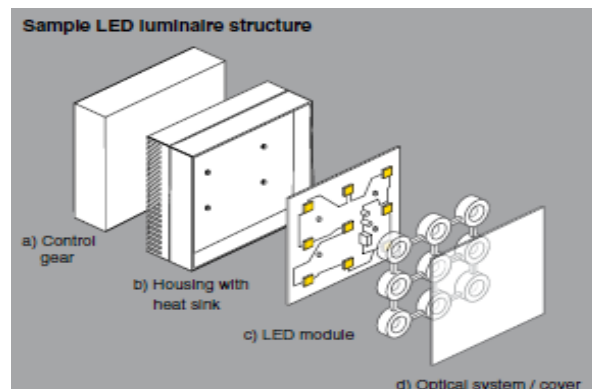
- Χρώμα: Οι λαμπτήρες εκκένωσης μπορεί να παρουσιάσουν αλλαγή στην θερμοκρασία χρώματος αλλά και στον δείκτη χρωματικής απόδοσης με το dimming. [2]

2.2.3 Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι(LED)

2.2.3.1 Αρχή λειτουργίας και δομή των LED

Μία φωτοεκπέμπουσα δίοδος, κοινώς αναφερόμενη με την αγγλική της ονομασία LED (Light Emitting Diode), αποτελεί ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα κύρια χρήση του οποίου είναι η παραγωγή φωτός. Πρόκειται για μια σύνδεση δύο ημιαγωγών p και n που εκπέμπει ακτινοβολία όταν τεθεί υπό σωστά προσανατολισμένη τάση, καθώς εφαρμόζοντας κατάλληλο ρεύμα στη σύνδεση, ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι σε θέση να ανασυνδυαστούν με οπές μέσα στην ηλεκτρονική διάταξη, απελευθερώνοντας ενέργεια με τη μορφή φωτονίων. Το φαινόμενο ονομάζεται ηλεκτροφωταύγεια και το χρώμα του φωτός (που αντιστοιχεί στην ενέργεια του φωτονίου που απελευθερώνεται) καθορίζεται από το χάσμα της ενεργειακής ζώνης του ημιαγωγού [10].

Το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που παράγεται απευθείας από την ψηφίδα ενός LED είναι πολύ μικρότερου εύρους από το εύρος του φάσματος της ανθρώπινης όρασης. Ως αποτέλεσμα το φως μιας ψηφίδας προσεγγίζει περισσότερο την ακτινοβολία μιας γραμμικής φωτεινής πηγής (μονοχρωματικό φως) παρά αυτήν μιας πηγής συνεχούς ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα. Το τελικό επιθυμητό χρωματικό αποτέλεσμα προκύπτει από τον συνδυασμό του υλικού των ημιαγωγικών υλικών, των χημικών προσθέτων και του περιβλήματος του φωτιστικού σώματος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως ημιαγωγοί είναι συνήθως ενώσεις φωσφόρου, αργιλίου, γαλλίου και ινδίου ή ενώσεις αργιλίου, γαλλίου και αρσενίου. Οι λυχνίες LED είναι συνήθως μικρές (μικρότερες του 1mm^2) ενώ ενσωματωμένα οπτικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του εκπεμπόμενου φωτός.



Σχήμα 2.2. Δομή ενός LED [10]

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύγχρονο LED και είναι:

- Ο εξοπλισμός ελέγχου (control gear), που περιλαμβάνει τους ακροδέκτες στους οποίους εφαρμόζεται η τάση, καθώς και το κύκλωμα ελέγχου της τάσης και του ρεύματος με τα οποία τροφοδοτείται η μονάδα των LED. Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι πολύ μεγάλης σημασίας καθώς έχει παρατηρηθεί ότι τα σφάλματα λειτουργίας των LED σπανίως βασίζονται σε πρόβλημα που εμφανίζεται στη δίοδο, ενώ πολύ συχνά το σφάλμα παρουσιάζεται λόγω ελαττωματικού εξοπλισμού ελέγχου της διάταξης. Έτσι είναι σημαντικό να επιλέγεται εξοπλισμός ελέγχου ο οποίος είναι υψηλής ποιότητας και έχει δοκιμαστεί και πιστοποιηθεί από τον κατασκευαστή. Τέλος, είναι σημαντικό το φωτιστικό που χρησιμοποιείται να έχει επαρκή χώρο για την τοποθέτηση του εξοπλισμού ελέγχου, αλλά και να είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών.
- Το περίβλημα με σύστημα απαγωγής θερμότητας (housing with heat sink). Η διάταξη των LED παράγει θερμότητα κατά τη λειτουργία της. Όμως η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών είναι ο κυριότερος παράγοντας που ευθύνεται για τη μείωση του χρόνου ζωής των LED έτσι είναι απαραίτητο η κατασκευή του να είναι τέτοια ώστε να αποτρέπει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών.
- Η μονάδα LED, η οποία αποτελείται από ένα σύνολο λυχνιών τυπωμένων σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Έτσι εξασφαλίζεται η ηλεκτρική σύνδεση των LED και η δυνατότητα ελέγχου τους, ενώ η επίπεδη μορφή της πλακέτας του ολοκληρωμένου κυκλώματος προσφέρει ευελιξία και απόδοση όσον αφορά τον παραγόμενο φωτισμό και βέλτιστη απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας.
- Το οπτικό σύστημα ή κάλυμμα (optical system/cover), ρόλος του οποίου είναι η διαμόρφωση του παραγομένου φωτός στο ορατό φάσμα, συνήθως μέσω ενός φακού κατασκευασμένου από ενώσεις φωσφόρου και η οδήγηση του στην επιθυμητή κατεύθυνση, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας LED είναι ραγδαία. Ενδεικτικά, η φωτεινή απόδοση τους έχει αυξηθεί από 5-20lm/W όταν αρχικά παρουσιάστηκαν, σε 80-120lm/W το 2013, ενώ πλέον φωτιστικά LED που διατίθενται στην αγορά μπορεί να φτάνουν τα 150lm/W, με ορισμένες συγκεκριμένες εφαρμογές να έχουν επιτύχει αποδόσεις μεταξύ 250-300lm/W. Επιπλέον, τα τελευταία ειδικά χρόνια έχει δοθεί έμφαση και στη βελτίωση άλλων χαρακτηριστικών πέραν της απόδοσης, όπως η ποιότητα χρώματος και η ομοιομορφία. Πλέον, φωτεινές πηγές LED είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν σε κάθε εφαρμογή φωτισμού λόγω των πολυπληθών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα τους παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.2.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα LED

- **Απόδοση:** Τα LED παράγουν περισσότερα Lm/W συγκριτικά με όλους τους άλλους τύπους φωτεινών πηγών. Έτσι η εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν αποτελεί και το σημαντικότερο λόγο προτίμησης τους έναντι όλων των υπολοίπων εναλλακτικών.
- **Χρώμα:** Τα LED μπορούν να παράξουν φωτεινή ακτινοβολία συγκεκριμένου χρώματος χωρίς τη χρήση φίλτρων τα οποία απαιτούνται σε άλλους τύπους φωτεινών πηγών.
- **Μέγεθος:** Τα LED είναι πολύ μικρά (μικρότερα από 2 mm²).
- **Χρόνος έναυσης:** Τα LED έχουν πάρα πολύ γρήγορη απόκριση. Ένα συνηθισμένο LED μπορεί για παράδειγμα να έρθει σε κατάσταση πλήρους φωτεινότητας σε χρόνο της τάξης του ενός microsecond. Τα LED που χρησιμοποιούνται ως συσκευές επικοινωνίας έχουν ακόμα μικρότερους χρόνους απόκρισης.
- **Κύκλοι λειτουργίας:** Τα LED είναι ιδανικά για χρήσεις που υπόκεινται σε υψηλή συχνότητα κύκλων λειτουργίας, σε συχνό δηλαδή άνοιγμα και κλείσιμο. Συγκριτικά, η διάρκεια ζωής στους λαμπτήρες πυρακτώσεως και τους λαμπτήρες φθορισμού όταν λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα κύκλων λειτουργίας μειώνεται αισθητά ενώ στην περίπτωση των λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής έντασης (HID) απαιτείται ένα σοβαρό χρονικό διάστημα πριν την επανεκκίνηση.
- **Ψυχρό φως:** Σε αντίθεση με τις κοινές πηγές φωτός, τα LED εκπέμπουν πολύ λίγη θερμότητα σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας που μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε ευαίσθητα αντικείμενα ή κατασκευές. Η ενέργεια που χάνεται, διαχέεται ως θερμότητα μέσω της βάσης του LED.
- **Χρόνος ζωής:** Τα LED έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι ώρες λειτουργίας τους κυμαίνονται από 35.000 έως 50.000 ώρες, ενώ σε πολλές περιπτώσεις προβλέπεται διάρκεια ζωής της τάξης των 80.000-100.000 ωρών, αριθμός τεράστιος συγκριτικά με αυτόν των λαμπτήρων πυράκτωσης που κυμαίνεται από 1.000 έως 2.000 ώρες και των λαμπτήρων φθορισμού που κυμαίνεται από 10.000 έως 15.000 ώρες.
- **Συντήρηση:** Ακριβώς λόγω του πολύ μεγάλου χρόνου ζωής τους, η συντήρηση που απαιτούν συστήματα φωτισμού που αποτελούνται από φωτεινές πηγές LED είναι από ελάχιστη έως μηδαμινή. Αυτός είναι και πολύ συχνά ο λόγος για τον οποίο προτιμούνται έναντι των εναλλακτικών.
- **Έλεγχος φωτισμού (dimming):** Είναι εύκολο να προσαρμοστεί το επίπεδο φωτισμού φωτεινών πηγών LED είτε με διαμόρφωση εύρους παλμών είτε με ελάττωση του ρεύματος οδήγησης.
- **Αντίσταση σε κραδασμούς:** Τα LED, όντας στοιχεία στερεάς κατάστασης, είναι δύσκολο να υποστούν ζημιά από κραδασμούς όπως συμβαίνει με τις λάμπες πυράκτωσης και φθορισμού.

- *Εστίαση:* Τα LED μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να εστιάζουν το φως σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή περιοχή. Οι λάμπες πυράκτωσης και φθορισμού απαιτούν ένα εξωτερικό ανακλαστήρα για να συλλέγει το φως και να το κατευθύνει με ένα χρήσιμο τρόπο.
- *Τοξικότητα:* Τα LED δεν περιέχουν υδράργυρο όπως οι λάμπες φθορισμού ή οι λαμπτήρες νατρίου.

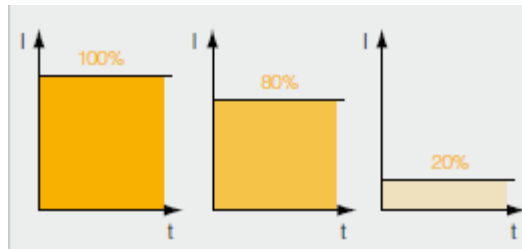
Μειονεκτήματα LED

- *Εξάρτηση από την θερμοκρασία:* Η απόδοση των LED εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ικανότητα θερμικής διαχείρισης τους. Η υπερθέρμανση των LED λόγω λειτουργίας και/ή υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος ενδέχεται να οδηγήσει σε καταστροφή τμημάτων του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των LED στοιχείων. Για την διατήρηση της μακράς διάρκειας ζωής τους απαιτείται σωστός θερμικός σχεδιασμός για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών.
- *Ευαισθησία στην τροφοδοσία:* Οι λυχνίες LED πρέπει να τροφοδοτούνται με τάση πάνω από το κατώφλι λειτουργίας τους και με ρεύμα κάτω από την ονομαστικό. Η απόδοση και η διάρκεια ζωής επηρεάζονται σημαντικά από την ηλεκτρική παροχή και επομένως απαιτούν σταθερή τροφοδοσία.

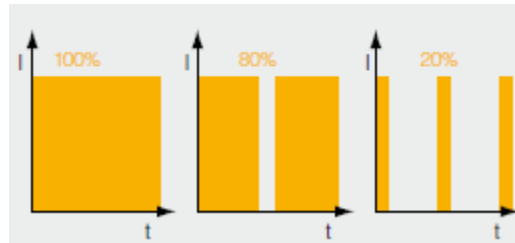
2.2.3.3 Ρύθμιση φωτεινής ροής LED (dimming)

Για τη ρύθμιση της στάθμης της φωτεινής ροής των φωτεινών πηγών LED έχουν επικρατήσει δύο τεχνικές, η ρύθμιση με μείωση του ρεύματος οδήγησής τους (constant current reduction dimming) και με διαμόρφωση διάρκειας παλμού (pulse width modulation – PWM) [10].

Στην πρώτη περίπτωση το επίπεδο της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής διαμορφώνεται με αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος οδήγησης, υπάρχει δηλαδή ηλεκτρολογικός εξοπλισμός ο οποίος ρυθμίζει την τιμή του συνεχούς ρεύματος με το οποίο τροφοδοτείται το LED, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Στη δεύτερη περίπτωση η στάθμη φωτισμού του LED ρυθμίζεται μέσω μεταβολής της μέσης τιμής του ρεύματος τροφοδοσίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός παλμού υψηλής συχνότητας όπως στο Σχήμα 2.4. Όταν ο παλμός έχει τιμή 0 το LED δεν τροφοδοτείται με ρεύμα, έτσι ανάλογα με τη διάρκεια του παλμού επιτυγχάνεται διαμόρφωση της μέσης τιμής του ρεύματος τροφοδοσίας που εν συνεχεία οδηγεί σε μεταβολή της φωτεινότητάς του. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Γενικά όμως η τεχνική μείωσης του ρεύματος οδήγησης δε σχετίζεται με την εμφάνιση φωτεινής μαρμαρυγής, αλλά μέσω της τεχνικής αυτής δε δύναται να επιτευχθεί ρύθμιση της στάθμης φωτισμού σε τόσο χαμηλό ποσοστό όσο στην τεχνική PWM. Η τεχνική PWM από την άλλη, έχει μεν τη δυνατότητα dimming σε χαμηλότερα επίπεδα στάθμης φωτισμού, αλλά συνήθως συνδέεται με την εμφάνιση φωτεινής μαρμαρυγής, ειδικότερα σε χαμηλές στάθμες φωτισμού.



Σχήμα 2.3. Dimming με μείωση του ρεύματος οδήγησης [10]



Σχήμα 2.4. Dimming με την τεχνική PWM [10]

2.2.3.4 Υπολογισμός διάρκεια ζωής

Όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των φωτεινών πηγών LED, έχουν δημοσιευτεί δύο πρότυπα που καθορίζουν τον τρόπο υπολογισμού της. Είναι κρίσιμο να τονιστεί ότι η αναφορά σε διάρκεια ζωής των LED είναι μάλλον παραπλανητική, καθώς οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται κάνουν προβλέψεις που αφορούν τη διατήρηση ποσοστού της φωτεινής ροής τους. Ως αποτέλεσμα, η αναφορά στη διάρκεια ζωής ενός LED ισοδυναμεί με το χρονικό διάστημα στο οποίο διατηρείται ένα ποσοστό της αρχικής φωτεινής ροής του, με συνηθέστερα ποσοστά που συναντώνται να είναι 70%, 80%, ή 90% και που συμβολίζονται με L70, L80 και L90 αντίστοιχα. Επιπλέον, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας LED, οι μέτρησεις σε εργαστηριακές συνθήκες για το σύνολο του χρόνου ζωής ενός LED δεν είναι πρακτική (Ένα LED με διάρκεια ζωής 35000 ώρες, δηλαδή περίπου 4 έτη θα είναι πλέον τεχνολογικά ξεπερασμένο σε ένα βαθμό, αν απαιτηθεί να δοκιμαστεί για όλο το διάστημα πριν βγει στην αγορά). Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται τεχνικές προβλέψεων που κάνουν εκτίμηση του χρόνου ζωής ενός LED με βάση εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιούνται συνήθως εντός των πρώτων 10000 ωρών της ζωής του.

Για αυτό το λόγο έχουν εκδοθεί από την IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) τα πρότυπα LM-80-2008 και TM-21-2011. Τα πρότυπα αυτά αναπτύχθηκαν με σκοπό να παρέχουν καθορισμένο τρόπο συλλογής δεδομένων και εκτέλεσης μακροπρόθεσμων προβλέψεων που αφορούν τη διατήρηση της φωτεινής ροής των LED αντίστοιχα. Η επικράτησή τους καλύπτει το κενό μεθοδολογίας προβλέψεων που προϋπήρχε, αποτελεί τον κοινό παρονομαστή για τις συγκρίσεις διαφορετικών προϊόντων από την πλευρά των καταναλωτών

και περιορίζει τους ακραίους ισχυρισμούς ορισμένων κατασκευαστών, όπως διάρκεια ζωής 100000 ωρών.

Το LM-80-2008 καθορίζει τον τρόπο συλλογής δεδομένων που αφορούν τη διατήρηση της φωτεινής ροής των LED, χωρίς να παρέχει όμως να καθοδήγηση ή συστάσεις σε σχέση με την πρόβλεψη της διατήρησης της φωτεινής ροής μακροπρόθεσμα. Οι συνθήκες που καθορίζονται αφορούν το περιβάλλον των μετρήσεων (υγρασία, θερμοκρασία κατά τη λειτουργία, που καθορίζεται σε τρία επίπεδα, 55 °C, 85 °C και μια θερμοκρασία που επιλέγεται από τον κατασκευαστή), την ηλεκτρική τροφοδοσία (ανοχές τάσης και ρεύματος σε σχέση με τις ονομαστικές) και τον τρόπο εκτέλεσης των μετρήσεων (τα LED επιτρέπεται να κρυώσουν στους 25 °C πριν εκτελεστούν μετρήσεις, προτείνεται η χρήση σπεκτροραδιομέτρου ώστε να γίνουν μετρήσεις του χρώματος των LED). Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ανά 1000 ώρες για ελάχιστο χρονικό διάστημα 6000 ωρών έως τις 10000 ώρες, ενώ προτείνεται και η λήψη μετρήσεων σε πιο τακτά διαστήματα ή και πέραν του διαστήματος των 10000 ωρών. Τέλος, οι μετρήσεις σε καθένα χρονικό σημείο γίνονται πολλές φορές, ώστε να προκύψει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα, το μέγεθος του οποίου προτείνεται να είναι άνω του 20 για να μπορούν να γίνουν ακριβέστερες προβλέψεις μέσω του αλγορίθμου TM-21. [11]

Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τον αλγόριθμο TM-21-2011. Ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης είναι 6 φορές μεγαλύτερος από το χρονικό διάστημα συλλογής δεδομένων, εάν το μέγεθος του δείγματος των μετρήσεων είναι άνω του 20, ενώ είναι 5,5 φορές μεγαλύτερος για μέγεθος δείγματος από 10 έως 19. Δείγματα μετρήσεων μικρότερα του 10 δεν είναι αποδεκτά για να γίνουν προβλέψεις. Τα στάδια εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι:

- Κανονικοποίηση της αρχικής μέτρησης (στις 0 ώρες) στη μονάδα.
- Υπολογισμός του μέσου όρου των κανονικοποιημένων δεδομένων σε κάθε χρονικό σημείο που λήφθηκαν μετρήσεις
- Για τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται ισχύουν:
 - A) Δε χρησιμοποιούνται δεδομένα που λήφθηκαν πριν τις 1000 ώρες.
 - B) Για δεδομένα που λήφθηκαν μέσω εργαστηριακών μετρήσεων διάρκειας 6000 έως 10000 ωρών, χρησιμοποιούνται οι τελευταίες 5000 ώρες μόνο.
 - Γ) Για διάρκεια μετρήσεων άνω των 10000 ωρών χρησιμοποιούνται μόνο αυτά του τελευταίου 50% της διάρκειας μετρήσεων. (Αν δεν υπάρχει μέτρηση στο 50%, λαμβάνεται υπόψη η αμέσως προηγούμενη μέτρηση, πχ. για διάρκεια μετρήσεων 13000 ώρες ανά 1000 ώρες, δεν υπάρχει μέτρηση στις 6500 ώρες και λαμβάνεται υπόψη η μέτρηση στις 6000 ώρες)
- Η κανονικοποιημένη τιμή της φωτεινής ροής Φ σε χρόνο t δίνεται από τη σχέση

$$\Phi(t) = B \cdot e^{-A \cdot t}$$

Όπου B , A συντελεστές που υπολογίζονται από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$a = \frac{\sum_1^n \ln y_i \cdot \sum_1^n x_i^2 - \sum_1^n x_i \cdot \sum_1^n x_i \cdot \ln y_i}{n \cdot \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2}$$

$$b = \frac{n \cdot \sum_1^n x_i \cdot \ln y_i - \sum_1^n x_i \cdot \sum_1^n \ln y_i}{n \cdot \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2}$$

Από όπου προκύπτει τελικά $A = \exp(a)$, $B = b$, όπου x_i είναι τα χρονικά σημεία που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και y_i οι κανονικοποιημένοι μέσοι όροι των δειγμάτων αυτών των μετρήσεων.

- Η πρόβλεψη γίνεται μέσω της εξίσωσης

$$Lp(D) = \frac{\ln(100 \cdot B/p)}{A}$$

Όπου p το ποσοστό της αρχικής φωτεινής ροής που διατηρείται και D η χρονική διάρκεια λήψης δεδομένων, διαιρεμένη με το 1000.

- Τελικά, η πρόβλεψη για τη διατήρηση της φωτεινής ροής του LED είναι η μικρότερη τιμή ανάμεσα στον χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης (5,5 φορές η χρονική διάρκεια μετρήσεων για μέγεθος δείγματος ανάμεσα σε 10 και 19 και 6 φορές για μέγεθος δείγματος άνω του 20) και την τιμή που υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση.

Παράδειγμα: Για ένα LED έχουν γίνει μετρήσεις για διάστημα 6000 ωρών, με 20 δείγματα ανά μέτρηση. Οι μέσοι όροι των 20 μετρήσεων που έγιναν κάθε 1000 ώρες και έχουν κανονικοποιηθεί στη μονάδα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Μέσοι όροι κανονικοποιημένων μετρήσεων ενός LED

Χρόνος (ώρες)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000
Μέσος όρος δειγμάτων	1	1,0032	0,9924	0,9919	0,9677	0,9493	0,9258

Με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται $B = 1,023$ και $a = 1,042 \cdot 10^{-5}$. Έτσι τελικά υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση $L_{70}(6k) = 36392$ ώρες. Η λύση αυτή οριακά δεν είναι αποδεκτή, αφού η πλέον μακροπρόθεσμη πρόβλεψη που μπορεί να γίνει είναι 6 φορές μεγαλύτερη του διαστήματος μετρήσεων, δηλαδή τις 36000 ώρες. Σε αυτή την περίπτωση η διάρκεια ζωής εκφράζεται με χρήση του συμβόλου της ανισότητας, ως $L_{70}(6k) > 36000$ ώρες. [12]

2.3 Εγκατάσταση συστήματος οδοφωτισμού

2.3.1 Χαρακτηριστικά φωτιστικών σωμάτων

Ως φωτιστικό σώμα αποκαλείται η διάταξη που παρέχει μηχανική στήριξη και ηλεκτρική τροφοδοσία των φωτεινών πηγών που περιλαμβάνει. Επιπλέον, ο ρόλος του επεκτείνεται και

στη διαμόρφωση της φωτεινής ροής των φωτεινών πηγών που περιλαμβάνει. Όπως έχει αναφερθεί, στις μέρες μας γίνεται χρήση ποικίλων τύπων φωτεινών πηγών στον οδοφωτισμό. Πέραν όμως από τις φωτεινές πηγές, ένα φωτιστικό περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

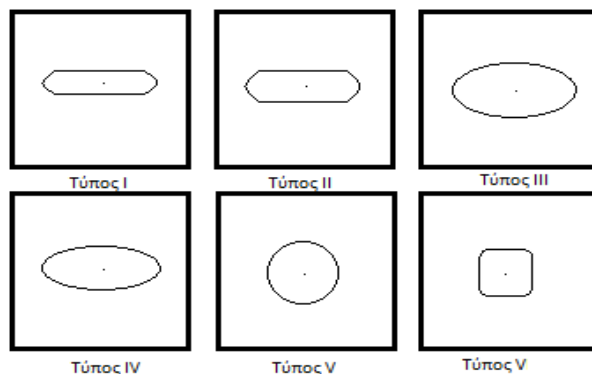
A) Το διαχύτη. Αυτός ενδέχεται να είναι ημιεξέχουσας, επίπεδης ή εξέχουσας μορφής και τα υλικά κατασκευής του συνήθως είναι το αλουμίνιο και το γυαλί. Πιο αναλυτικά, το είδος του διαχυτή επιλέγεται σύμφωνα με το αν είναι επιθυμητή η διάδοση του φωτός πάνω από τη γωνία των 90 μοιρών. Σε περίπτωση που δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις διαχύτης εξέχοντος τύπου.

B) Τον ανακλαστήρα, που κατασκευάζεται από αλουμίνιο και χρησιμεύει για να διοχετευθεί το φως σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις.

Γ) Το κέλυφος, το οποίο μπορεί να είναι κατακόρυφης ή οριζόντιας μορφής και η κατασκευή του είναι από αλουμίνιο το οποίο καλύπτεται από ηλεκτροστατική βαφή.

Τα φωτιστικά που χρησιμοποιούνται για φωτισμό εξωτερικών χώρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση δύο κυρίως κριτήρια, την κατανομή φωτός στο οριζόντιο επίπεδο και τον έλεγχο της διανομής του φωτός.

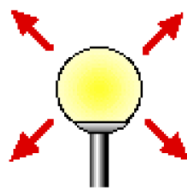
Με βάση το πρώτο κριτήριο διακρίνονται 5 διαφορετικές περιπτώσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Οι τύποι I και II χρησιμοποιούνται κυρίως σε μακριούς, στενούς δρόμους, οι III και IV για δρόμους με μεγάλο πλάτος (πχ. στην περίπτωση δρόμου με πολλές λωρίδες ανά κατεύθυνση κυκλοφορίας), ενώ τέλος ο τύπος V χρησιμοποιείται σε χώρους στάθμευσης.



Σχήμα 2.5. Τύποι φωτιστικών με κριτήριο την κατανομή τους στο οριζόντιο επίπεδο [2]

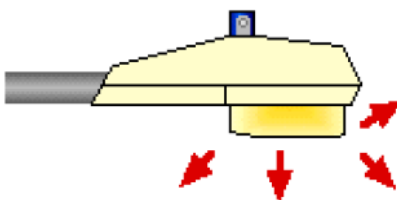
Όσον αφορά στον έλεγχο της διανομής του φωτός, διακρίνονται οι εξής 4 περιπτώσεις:

A) Μη αποκοπής (non-cutoff): Τα φωτιστικά μη αποκοπής επιτρέπουν την διάχυση του φωτός προς όλες τις κατευθύνσεις και έτσι αποτελούν το λιγότερο αποδοτικό τρόπο για να φωτιστεί το έδαφος. Χρησιμοποιούνται για το φωτισμό εξωτερικών χώρων όπως πλατείες, πάρκα κλπ, και προκαλούν έντονη φωτορύπανση. Αυτά τα φωτιστικά δεν χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό γιατί αποτελούν το λιγότερο αποδοτικό τρόπο φωτισμού του οδοστρώματος σε σχέση με τις επόμενες κατηγορίες.



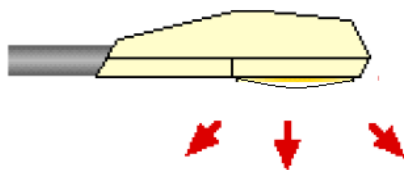
Σχήμα 2.6. Φωτιστικό τύπου non-cutoff[2]

Β) Ημιαποκοπής (semi-cutoff): Τα φωτιστικά ημιαποκοπής διαχέουν το μεγαλύτερο ποσοστό του φωτός κάτω από τις 90°. Παρόλα αυτά, ένα ποσοστό έως 5 % κατευθύνεται πάνω από τις 90°. Είναι αρκετά αποδοτικά επομένως στην κατεύθυνση του φωτός προς την κατεύθυνση του εδάφους, αλλά προκαλούν έντονη θάμβωση και ως αποτέλεσμα συνίσταται η εγκατάστασή τους σε ιστούς μεγάλου ύψους.



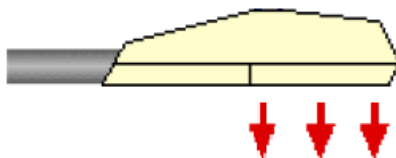
Σχήμα 2.7. Φωτιστικό τύπου semi-cutoff [2]

Γ) Αποκοπής (cutoff): Τα φωτιστικά αυτού του τύπου διαχέουν ακόμη λιγότερο φως στην κατεύθυνση πάνω από τις 90°, το πολύ έως 2,5%. Ο τύπος αυτός προσφέρει ευρύτερη διάδοση φωτός από την επόμενη κατηγορία (της πλήρους αποκοπής) και ως αποτέλεσμα χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που επιδιώκεται μεγάλη απόσταση μεταξύ των τοποθετούμενων ιστών, για παράδειγμα σε χώρους στάθμευσης.



Σχήμα 2.8. Φωτιστικό τύπου cutoff [2]

Δ) Πλήρους αποκοπής (full-cutoff): Τα φωτιστικά πλήρους αποκοπής κατευθύνουν όλο το φως στην κατεύθυνση κάτω από το φωτιστικό, ενώ δεν εκπέμπουν καθόλου φως πάνω από τις 90°. Ως αποτέλεσμα μειώνεται η θάμβωση και η φωτορύπανση, αλλά λόγω της στενής κατανομής φωτός που παράγεται, απαιτείται η εγκατάσταση περισσότερων ιστών και φωτιστικών σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις ή εγκατάστασή τους σε ιστούς μεγαλύτερου ύψους.



Σχήμα 2.9. Φωτιστικό τύπου full-cutoff [2]

2.3.2 Χαρακτηριστικά ιστών

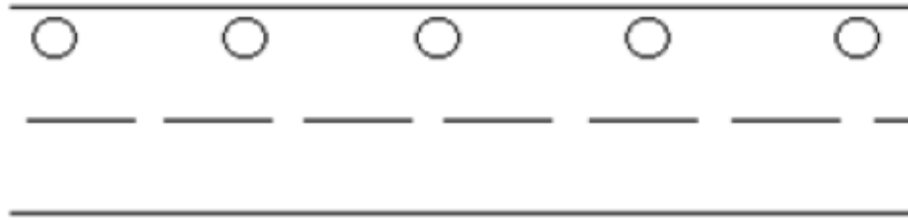
Για την τοποθέτηση του φωτιστικού σώματος στο επιθυμητό σημείο χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις πρόσθετες διατάξεις στήριξης, η συνηθέστερη από τις οποίες στην περίπτωση του οδοφωτισμού είναι οι στύλοι ή ιστοί. Τα υλικά κατασκευής ενός συνήθους ιστού ηλεκτροφωτισμού είναι το αλουμίνιο και ο γαλβανισμένος ή ο ανοξείδωτος χάλυβας. Για την προστασία του υλικού πολλές φορές ο ιστός βάφεται ή επικαλύπτεται από πλαστικό. Επίσης, πολλές φορές χρησιμοποιείται και το σπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο όμως, αντιμετωπίζει προβλήματα διάβρωσης, ειδικά σε παραθαλάσσιες περιοχές.

Οι διατομές των ιστών μπορεί να είναι κυκλικές, σταθερής ή μεταβλητής διαμέτρου, ή πολυγωνικές, εκτός των ιστών από σκυρόδεμα που είναι πάντα κυκλικής διατομής. Για την στήριξή τους, οι ιστοί από σκυρόδεμα εμπύγνυνται στο έδαφος, ενώ οι μεταλλικοί κοχλιώνονται σε βάση από σκυρόδεμα.

Το ύψος τοποθέτησης του φωτιστικού σώματος και κατά επέκταση το ύψος του ιστού, επηρεάζει τα φωτεινά χαρακτηριστικά του παραγόμενου φωτισμού, καθώς και το εύρος της φωτιζόμενης περιοχής. Μεγαλύτερα ύψη προσφέρουν μεγαλύτερη ομοιομορφία, καθώς και μείωση της θάμβωσης, αλλά χαμηλότερη λαμπρότητα. Χαμηλότερα ύψη οδηγούν σε μεγαλύτερο πλήθος φωτιστικών σωμάτων και σε τοποθέτηση πιο κοντά στο οδόστρωμα. Το σύνηθες ύψος των ιστών ηλεκτροφωτισμού κυμαίνεται στα 9-15 m, ενώ για υψηλούς ιστούς εφαρμόζονται πολύ μεγάλα ύψη, της τάξης των 30 m και άνω. Παράγοντες που μπορεί να περιορίζουν το ύψος είναι η ύπαρξη υπέργειων γραμμών κοινής ωφελείας, παράπλευρα αεροδρόμια και η τοποθέτηση μέσα σε κατοικημένες περιοχές, λόγω της ενόχλησης που προκαλούν. Ο βραχίονας στήριξης του φωτιστικού σώματος αποτελεί συνήθως ξεχωριστό τεμάχιο από τον ιστό και στηρίζεται στην κορυφή του. Μπορεί να είναι ευθύγραμμος ή με καμπύλη, οριζόντιος ή ελαφρά κεκλιμένος. Το μήκος του κυμαίνεται από 0.5 έως 4.5 m, ανάλογα με την απόσταση του ιστού από το οδόστρωμα και την επιθυμητή θέση του φωτιστικού σώματος σε σχέση με αυτό.

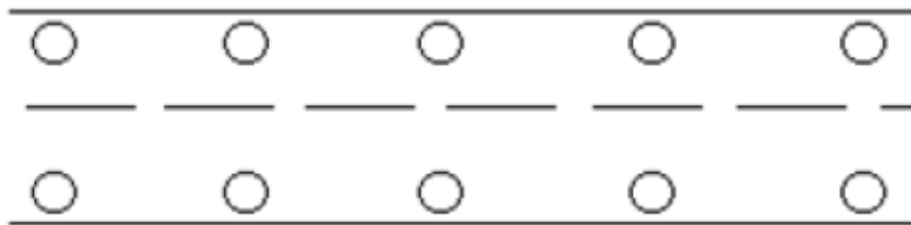
Η θέση των ιστών και των φωτιστικών σε σχέση με το οδόστρωμα εξαρτάται από την εκάστοτε εγκατάσταση, αλλά διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

A) Μονόπλευρη Διάταξη (Σχήμα 2.10): Στη μονόπλευρη διάταξη τα φωτιστικά τοποθετούνται στην μία πλευρά του δρόμου και εφαρμόζεται συνήθως όταν το πλάτος του δρόμου είναι κατά προσέγγιση ίσο με το ύψος του φωτιστικού.



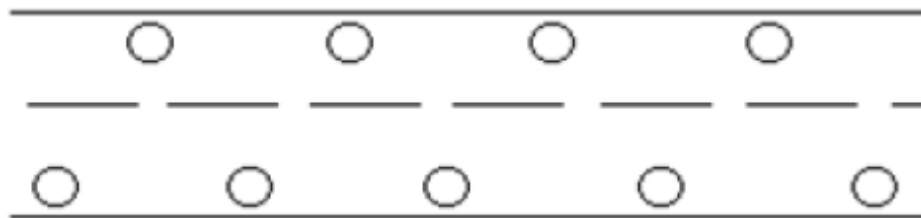
Σχήμα 2.10. Μονόπλευρη διάταξη φωτιστικών [2]

Β) Αμφίπλευρη Διάταξη (Σχήμα 2.11): Στη αμφίπλευρη διάταξη τα φωτιστικά τοποθετούνται το ένα απέναντι από το άλλο και εφαρμόζεται σε δρόμους με υψηλότερες απαιτήσεις φωτισμού.



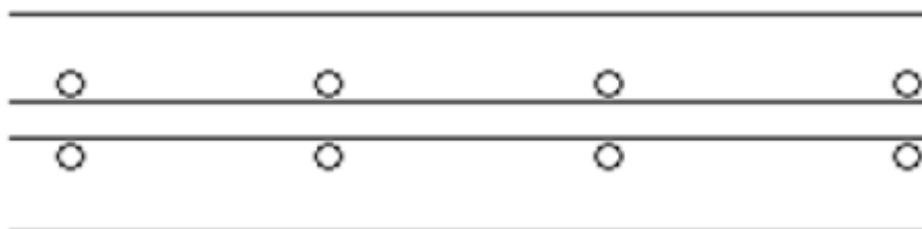
Σχήμα 2.11. Αμφίπλευρη διάταξη φωτιστικών [2]

Γ) Χιαστί Διάταξη (Σχήμα 2.12): Στη χιαστί διάταξη κάθε φωτιστικό τοποθετείται απέναντι από το μέσο της απόστασης των δύο πλησιέστερων φωτιστικών που βρίσκονται στην απέναντι πλευρά του δρόμου και εφαρμόζεται σε δρόμους με υψηλές απαιτήσεις φωτισμού έτσι ώστε να φωτίζεται όλο το πλάτος του δρόμου.



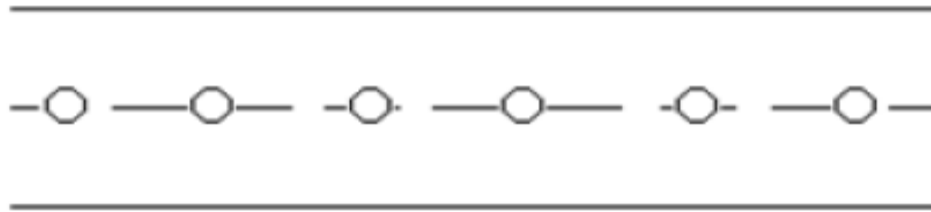
Σχήμα 2.12. Χιαστί διάταξη φωτιστικών [2]

Δ) Κεντρική Διάταξη (Σχήμα 2.13): Η κεντρική διάταξη εφαρμόζεται κυρίως σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας και σε δρόμους με νησίδα.



Σχήμα 2.13. Κεντρική διάταξη φωτιστικών [2]

Ε) Αξονική Διάταξη (Σχήμα 2.14): Στην αξονική διάταξη τα φωτιστικά τοποθετούνται στο κέντρο του δρόμου εξασφαλίζοντας υψηλές τιμές ομοιομορφίας.



Σχήμα 2.14. Αξονική διάταξη φωτιστικών [2]

2.4 Συστήματα διαχείρισης φωτισμού

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στα συστήματα διαχείρισης του οδοφωτισμού. Με τον όρο αυτό εννοείται ένα σύστημα το οποίο προσφέρει την ευκαιρία για απομονωμένη επίβλεψη της λειτουργίας του φωτισμού που παρέχεται αλλά και για απευθείας δυναμική ρύθμιση των φωτεινών χαρακτηριστικών των φωτιστικών που απαρτίζουν μια εγκατάσταση οδοφωτισμού. Έχοντας ως βάση συγκεκριμένα δεδομένα, ένα σύστημα το οποίο διαχειρίζεται τον φωτισμό προσφέρει την ικανότητα της επιτόπιας προσαρμογής του επιπέδου φωτισμού της εγκατάστασης από την κεντρική διάταξη ελέγχου.

Στο παρελθόν, η ρύθμιση της στάθμης φωτισμού σε εγκαταστάσεις οδοφωτισμού γινόταν με το σβήσιμο κάποιων φωτεινών πηγών (σε τεχνολογίες λαμπτήρων που το dimming δεν ήταν αποδοτικό), είτε απλά με dimming που εφαρμοζόταν συνολικά στην εγκατάσταση, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτό συνέβαινε καθώς το υποχρεωτικό επίπεδο φωτεινότητας μιας συνηθισμένης εγκατάστασης οδοφωτισμού καθορίζεται λαμβάνοντας υπ'όψιν συνθήκες σε ώρες δηλαδή αιχμής, οπότε και είναι κρίσιμο το οπτικό έργο του οδηγού. Σε περίπτωση όμως, που ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι πιο χαμηλός, η στάθμη φωτισμού μπορεί να κριθεί ως υπερβολική με αρκετά υψηλές περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες, χωρίς να αντικατοπτρίζεται αυτό στην πρακτικότητα και την ασφάλεια του δρόμου.

Επομένως, ανάλογα με τον κυκλοφοριακό φόρτο και τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, ένα σύστημα διαχείρισης οδοφωτισμού δύναται να ελαττώσει σε μεγάλο ποσοστό το επίπεδο φωτισμού, εξοικονομώντας ενέργεια και προσαρμόζοντας τα επίπεδα φωτισμού στις ανάγκες της οδού. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι είναι εφικτό το να διατηρηθεί η φωτεινότητα σε χαμηλά επίπεδα τις πρώτες πρωινές ή τις τριταίες απογευματινές ώρες και επίσης να πραγματοποιηθεί η ενεργοποίηση του φωτισμού σε δύσκολες συνθήκες λόγω παραγόντων οι οποίοι δύναται να ορίσουν αυτή την προσαρμογή. Συνήθως, τέτοιοι παράγοντες είναι το επίπεδο φωτισμού του περιβάλλοντος και οι καιρικές συνθήκες [13].

Άλλα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων μπορεί να είναι:

A) Η ευκολότερη συντήρηση της εγκατάστασης και η άμεση αντιμετώπιση προβλημάτων λειτουργίας. Ένας λαμπτήρας που παρουσιάζει σφάλμα γίνεται άμεσα αντιληπτός από το σύστημα και η αντικατάστασή του είναι άμεση. Σε αντίθετη περίπτωση το σφάλμα διαπιστώνεται κατά την επιθεώρηση της εγκατάστασης και επομένως ο ελαττωματικός

λαμπτήρας παραμένει στην εγκατάσταση από τη στιγμή του σφάλματος έως τον εντοπισμό του, χρονικό διάστημα το οποίο μπορεί να είναι σημαντικό.

Β) Η δυνατότητα προσαρμογής του επιπέδου φωτισμού κάθε φωτιστικού της εγκατάστασης (ή μιας ομάδας που αποτελείται από μικρό πλήθος φωτιστικών) σε διαφορετικό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται γιατί υπάρχει η δυνατότητα dimming κάθε φωτιστικού ξεχωριστά. Ένα παράδειγμα της αναγκαιότητας για ανεξάρτητη ρύθμιση του επιπέδου φωτισμού είναι τα άκρα μιας σήραγγας, όπου είναι επιθυμητό οι μεταβολές στο φωτισμό που αντιλαμβάνεται ένας οδηγός να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.

Γ) Η δυνατότητα μεταφοράς καιρικών και κυκλοφοριακών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Δ) Η διατήρηση βάσεων δεδομένων λειτουργίας και συντήρησης για κάθε στοιχείο της εγκατάστασης.

Ε) Η ευκολότερη εποπτεία της εγκατάστασης οδοφωτισμού, καθώς είναι δυνατή η επίβλεψη των επιπέδων τάσης, ρεύματος και κατανάλωσης κάθε φωτιστικού ξεχωριστά, αλλά και της εγκατάστασης ως σύνολο.

Κεφάλαιο 3: Φωτισμός δρόμων με βάση το πρότυπο EN13201 και την Τεχνική Οδηγία του ΤΕΕ(TOTEE)

3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε σαφής η αναγκαιότητα και τα οφέλη που προκύπτουν από την εγκατάσταση οδοφωτισμού. Βεβαίως, οι προϋποθέσεις εγκατάστασης, οι επικρατούσες συνθήκες και τα χαρακτηριστικά μιας οδού, άρα και οι απαιτήσεις από το σύστημα οδοφωτισμού μεταβάλλονται ανάλογα με την περίπτωση. Γίνεται έτσι εμφανής η ανάγκη προσδιορισμού του ακριβή τρόπου διεξαγωγής μιας μελέτης οδοφωτισμού και εν συνεχεία της διαδικασίας υλοποίησης του αντίστοιχου έργου. Ως αποτέλεσμα δημιουργήθηκε το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13201/2015, ως αναθεώρηση του προηγούμενου ΕΛΟΤ EN 13201/2004 που αποτελείται από 5 μέρη:

- Το ΕΛΟΤ CEN/TR 13201.01.2015: Επιλογή κατηγοριών φωτισμού [14]
- Το ΕΛΟΤ EN 13201.02/2015: Απαιτήσεις επιδόσεων [15]
- Το ΕΛΟΤ EN 13201.03/2015: Υπολογισμός επιδόσεων [16]
- Το ΕΛΟΤ EN 13201.04/2015: Μέθοδοι μέτρησης επιδόσεων φωτισμού [17]
- Το ΕΛΟΤ EN 13201.05/2015: Απαιτήσεις ενεργειακής επίδοσης [18]

Το πρώτο μέρος αποτελεί οδηγία, δηλαδή η εφαρμογή δεν είναι υποχρεωτική. Αντιθέτως τα 4 τελευταία εφαρμόζονται υποχρεωτικά.

Με την απόφαση Δ13/β/οικ.16522 (ΦΕΚ Β'1792 3.12.2004) του Υπουργού ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. ορίσθηκε ότι οι κανόνες, τα στοιχεία, τα μεγέθη και οι προδιαγραφές υλικών για τη σύνταξη μελετών και την εκτέλεση έργων είναι σύμφωνα με τα πρότυπα του ΕΛΟΤ ή μέχρι την έκδοσή τους, σύμφωνα με τα πρότυπα (EN), τις οδηγίες και τα κείμενα εναρμόνισης που εκδίδονται και ισχύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και όπου δεν υπάρχουν με τα αναφερόμενα στις τελευταίες εκδόσεις της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού (CIE). Τέλος, το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ) συνέταξε Τεχνική Οδηγία, σύμφωνα με την σχετική Απόφαση Α30/Σ10/2017 της συνεδρίασης της Διοικούσας Επιτροπής την 07.04.2017. Σκοπός της συγκεκριμένης οδηγίας είναι να καλύψει το κενό που προκύπτει από την έλλειψη μιας συνεπούς μεθοδολογίας υλοποίησης έργων οδοφωτισμού, να δώσει συστάσεις σχετικές με το σχεδιασμό και έλεγχο εγκαταστάσεων, ώστε να καθορισθούν οι κανονισμοί καθ' όλα τα στάδια της εκτέλεσης ενός έργου οδοφωτισμού. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας η συγκεκριμένη Τεχνική Οδηγία θα αναφέρεται ως TOTEE [19].

3.2 Σχεδιασμός οδοφωτισμού

Ο σχεδιασμός οδοφωτισμού περιλαμβάνει ένα σύνολο βημάτων, δράσεων και ενεργειών που πρέπει να εκτελεί ο μελετητής από την αρχή του έργου μέχρι και πριν την υλοποίηση αυτού. Τα βήματα αυτά μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, στα υποχρεωτικά και στα προαιρετικά βήματα, τα οποία αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

Υποχρεωτικά βήματα σχεδιασμού οδοφωτισμού

Τα βήματα αυτά είναι υποχρεωτικά για την ορθό και ολοκληρωμένο σχεδιασμό έργων οδοφωτισμού και περιλαμβάνουν

- Την επιλογή κλάσεων οδοφωτισμού
- Την εκπόνηση μελέτης οδοφωτισμού
- Τον υπολογισμό δεικτών ενεργειακής επίδοσης

Προαιρετικά βήματα σχεδιασμού οδοφωτισμού

Τα βήματα αυτά εκτελούνται εφόσον απαιτείται από τις προδιαγραφές του έργου και εφόσον κρίνεται απαραίτητο από τον φορέα υλοποίησης του έργου και αφορούν

- Τεχνοοικονομικούς υπολογισμούς
- Λοιπές προδιαγραφές χρηματοδότησης του έργου

3.2.1 Επιλογή κλάσεων οδοφωτισμού

Η κατηγοριοποίηση των οδών με βάση τις απαιτήσεις σε φωτισμό καθορίζονται από την τεχνική οδηγία CEN/TR 13201.1 και αφορά όλες τις περιοχές όπου υπάρχει κυκλοφορία οχημάτων, ποδηλάτων, πεζών ή και συνδυασμούς όλων των παραπάνω. Οι κατηγορίες απαιτήσεων φωτισμού όπως καθορίζονται από την οδηγία ονομάζονται *κλάσεις φωτισμού (Lighting Classes)*. Αυτές δεν είναι απαραίτητο να αφορούν και σε συγκεκριμένες κατηγορίες οδών, αλλά έχουν οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η κάθε κλάση φωτισμού να εξαρτάται κυρίως από τα λειτουργικά και ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού. Οι κλάσεις ομαδοποιούνται στις τρεις ακόλουθες καταστάσεις φωτισμού (lighting situations):

Class M – Motorised traffic – Αυτοκινητόδρομοι / οδοί μηχανοκίνητων οχημάτων

Η κλάση **M** αφορά δρόμους όπου οι κύριοι χρήστες είναι μηχανοκίνητα οχήματα τα οποία κινούνται χαμηλές, μέσες ή υψηλές ταχύτητες. Το μέγεθος με βάση το οποίο γίνεται ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση του φωτισμού κλάσεων **M** είναι η λαμπρότητα (luminance) οδοστρώματος σε cd/m^2 . Η κλάση καθορίζεται με βάση γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της οδού ή τμήματος αυτής. Η επιλογή της κλάσης βασίζεται στα κριτήρια που αναγράφονται στον Πίνακα 3.1 και η τελική επιλογή της κλάσης φωτισμού σε κάθε περίπτωση πραγματοποιείται με το άθροισμα των βαρών κάθε κριτηρίου και με την εφαρμογή της παρακάτω σχέσης:

$$M = 6 - VWS$$

$$\text{με } VWS = 0, \text{ αν } VWS < 0 \text{ και } M=1, \text{ αν } M \leq 0 \text{ [15]}$$

όπου M η προκύπτουσα κλάση φωτισμού και VWS το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων του Πίνακα 3.1. Με αυτόν τον τρόπο ορίζονται οι κλάσεις φωτισμού $M1, M2, M3, M4, M5$ και $M6$.

Πίνακας 3.1. Παράμετροι επιλογής κλάσεων φωτισμού M κατά EN 13201.1:2015 [15]

Κριτήριο	Επιλογές	Περιγραφή	Βάρος
Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας	Πολύ υψηλή	$V > 100\text{km/h}$	2
	Υψηλή	$70 < V < 100\text{km/h}$	1
	Μέση	$40 < V < 70\text{km/h}$	-1
	Χαμηλή	$V < 40\text{km/h}$	-2
Κυκλοφοριακός φόρτος		Αυτοκινητόδρομοι, κατευθύνσεις πολλών λωρίδων	
	Υψηλός	>65% επί της	>45% επί της
	Μέσος	35-65% μέγιστης	15-45% μέγιστης
	Χαμηλός	<35% χωρητικότητας	<15% χωρητικότητας
Σύνθεση χρηστών		Μεικτή, μεγάλο ποσοστό μη μηχανοκίνητων	2
		Μεικτή	1
		Μόνο μηχανοκίνητα	0
Διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας	Όχι		1
	Ναι		0
Πυκνότητα κόμβων		Διασταυρώσεις/km	Απόσταση κόμβων, km
	Υψηλή	>3	>3
	Μέση	≤3	≤3
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα		1
	Απόντα		0
Φωτισμός περιβάλλοντος	Υψηλός	Εμπορικές οδοί	1
	Μέσος	Συνήθεις καταστάσεις	0
	Χαμηλός	Επαρχιακές οδοί	-1
Δυσκολία οδήγησης	Πολύ υψηλή		2
	Υψηλή		1
	Χαμηλή		0

Τα τμήματα των οδών, όπου εφαρμόζονται οι κλάσεις φωτισμού **M**, είναι τα τμήματα μεταξύ των περιοχών κινδύνου (conflict areas) οι οποίες ορίζονται στη συνέχεια. Στην περίπτωση όμως που το μήκος της οδού ανάμεσα σε δύο περιοχές κινδύνου είναι μικρότερο από την απόσταση ασφαλούς πέδησης των οχημάτων που τη χρησιμοποιούν, η TOTEE συνιστά την επιλογή κλάσης φωτισμού **C** για όλο το μήκος της.

Class C – Conflict areas – Περιοχές κινδύνου

Οι κλάσεις **C** χρησιμοποιούνται σε περιοχές αυξημένου κινδύνου εμπλοκής οδικών ρευμάτων και οδών με κύρια σύνθεση χρηστών τα μηχανοκίνητα οχήματα. Ως περιοχές κινδύνου ορίζονται οι περιοχές στις οποίες ροές οχημάτων εμπλέκονται μεταξύ τους ή συναντώνται με περιοχές που χρησιμοποιούνται συχνά από πεζούς, ποδηλάτες ή άλλους χρήστες των οδών, όπως για παράδειγμα σε κόμβους ή διασταυρώσεις. Ακόμη, περιοχές κινδύνου θεωρούνται περιοχές στις

οποίες μειώνεται ο αριθμός των λωρίδων κυκλοφορίας ή το πλάτος λωρίδων ή το συνολικό πλάτος της οδού. Παρατηρούμε επομένως ότι στις περιοχές κινδύνου συγκαταλέγονται όλες οι περιπτώσεις στις οποίες η πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ διαφορετικών οχημάτων, οχημάτων και πεζών, ποδηλατών με άλλους χρήστες ή αυτοκινήτων με σταθερά εμπόδια είναι αυξημένη. Το μέγεθος σχεδιασμού και αξιολόγησης του φωτισμού κλάσεων **C** είναι η ένταση φωτισμού (Illuminance) μετρημένη σε lux. Η αντιστοίχιση των κλάσεων φωτισμού **M** και **C** (λαμπρότητας και έντασης φωτισμού) μπορεί να επιτευχθεί με τη γνώση του συνολικού συντελεστή ανακλαστικότητας του οδοστρώματος Q_0 όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2. Αντιστοίχιση κλάσεων M και C συναρτήσει του συντελεστή ανακλαστικότητας του οδοστρώματος Q_0 [15]

Κλάση φωτισμού M			M1	M2	M3	M4	M5	M6
Κλάση φωτισμού C για $Q_0 \leq 0.05$			C0	C1	C2	C3	C4	C5
Κλάση φωτισμού C για $0.05 < Q_0 \leq 0.08$		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C5
Κλάση φωτισμού C για $Q_0 > 0.09$	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C5	C5

Επειδή οι κλάσεις φωτισμού **C** έχουν σχεδιαστεί για τους ίδιους χρήστες με αυτούς των κλάσεων **M**, ο Πίνακας 3.2 θα πρέπει κυρίως να χρησιμοποιείται για τον ορισμό κλάσεων στις περιοχές κινδύνου που ανήκουν σε οδούς για τις οποίες έχει ήδη προηγηθεί ο ορισμός κλάσεων **M**. Οι περιοχές κινδύνου θα πρέπει να έχουν κλάση όχι μικρότερη από τη μέγιστη κλάση των οδών που συναντώνται, ενώ η ΤΟΤΕΕ προτείνει την επιλογή κλάσης φωτισμού της περιοχής κινδύνου κατά ένα βήμα ανώτερη από την μέγιστη κλάση των οδών που συναντώνται. Η πρώτη γραμμή του Πίνακα 2 περιέχει τις κλάσεις φωτισμού **M** από τις οποίες επιλέγεται η μέγιστη κλάση που έχει οριστεί για συνερχόμενη οδό στην περιοχή κινδύνου. Η ισοδύναμη κλάση **C** επιλέγεται από την ίδια στήλη ανάλογα με το Q_0 του οδοστρώματος. Για λόγους επαύξησης της ασφάλειας προτείνεται η χρήση κλάσης φωτισμού κατά ένα βήμα ανώτερη από αυτή που προκύπτει από την αντιστοίχιση αυτή. Στην περίπτωση που οι οδοί που συνέρχονται σε μία περιοχή κινδύνου δεν φωτίζονται και ως εκ τούτου δεν έχει οριστεί κλάση φωτισμού **M**, τότε για την επιλογή της κλάσης φωτισμού **C** μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Πίνακας 3.3. Με τη χρήση του πίνακα αυτού η επιλογή της κλάσης **C** προκύπτει με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στην περίπτωση των κλάσεων **M**, δηλαδή:

$$C = 6 - VWS$$

$$\text{με } VWS = 0, \text{ αν } VWS < 0 \text{ και } C=0, \text{ αν } C < 0 \text{ [15]}$$

Με αυτή τη διαδικασία προκύπτουν οι κλάσεις C0, C1, C2, C3, C4, C5.

Πίνακας 3.3. Παράμετροι επιλογής κλάσεων φωτισμού C κατά EN 13201.1:2015 [15]

Κριτήριο	Επιλογές	Περιγραφή	Βάρος
Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας	Πολύ υψηλή	$V > 100\text{km/h}$	3
	Υψηλή	$70 < V < 100\text{km/h}$	2
	Μέση	$40 < V < 70\text{km/h}$	0
	Χαμηλή	$V < 40\text{km/h}$	-1
Κυκλοφοριακός φόρτος	Υψηλός		1
	Μέσος		0
	Χαμηλός		-1
Σύνθεση χρηστών		Μεικτή, μεγάλο ποσοστό μη μηχανοκίνητων	2
		Μεικτή	1
		Μόνο μηχανοκίνητα	0
Διαχωρισμός κατευθύνσεων κυκλοφορίας	Όχι		1
	Ναι		0
Σταθμευμένα οχήματα	Παρόντα		1
	Απόντα		0
Φωτισμός περιβάλλοντος	Υψηλός	Εμπορικές οδοί	1
	Μέσος	Συνήθεις καταστάσεις	0
	Χαμηλός	Επαρχιακές οδοί	-1
Δυσκολία οδήγησης	Πολύ υψηλή		2
	Υψηλή		1
	Χαμηλή		0

Class P – Pedestrian and low speed areas – Πεζόδρομοι και οδοί ήπιας κυκλοφορίας

Αφορά στο φωτισμό περιοχών κυκλοφορίας κυρίως πεζών, ποδηλάτων ή οδών μεικτής χρήσης αλλά ήπιας κυκλοφορίας. Ο ορισμός των κλάσεων φωτισμού **P** πραγματοποιείται μέσω των κριτηρίων του Πίνακα 4.4. Η τελική επιλογή της κλάσης φωτισμού σε κάθε περίπτωση πραγματοποιείται με το άθροισμα των βαρών κάθε κριτηρίου και με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$P = 6 - VWS$$

$$\text{με } VWS = 0, \text{ αν } VWS < 0 \text{ και } P = 1, \text{ αν } P \leq 0 \text{ [15]}$$

Ως αποτέλεσμα προκύπτουν οι κλάσεις P1, P2, P3, P4, P5 P6, P7.

Πίνακας 3.4. Παράμετροι επιλογής κλάσεων φωτισμού P κατά EN 13201.1:2015 [15]

Κριτήριο	Επιλογές	Περιγραφή	Βάρος
Ταχύτητα σχεδιασμού ή όριο ταχύτητας	Χαμηλή	$V \leq 40$ km/h Ταχύτητα βαδίσματος	1
	Πολύ χαμηλή(βαδισμα)		0
Κυκλοφοριακός φόρτος		Υψηλός	1
		Μέσος	0
		Χαμηλός	-1
Σύνθεση χρηστών		Πεζοί, ποδηλάτες και μηχανοκίνητα	2
		Πεζοί και μηχανοκίνητα	1
		Πεζοί και ποδηλάτες	1
		Πεζοί	0
		Ποδηλάτες	0
Σταθμευμένα οχήματα		Παρόντα	1
		Απόντα	0
Φωτισμός περιβάλλοντος	Υψηλός	Εμπορικές οδοί, διαφημιστικές πινακίδες κλπ	1
	Μέσος	Συνήθεις καταστάσεις	0
	Χαμηλός	Επαρχιακές οδοί	-1

3.2.2 Επιλογή κλάσεων προσαρμοστικού οδοφωτισμού

Σύμφωνα με την TOTEE η κλάση φωτισμού μίας οδού ενδέχεται να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός συστήματος οδοφωτισμού στην περίπτωση που ένα ή περισσότερα από τα κριτήρια που τη χαρακτηρίζουν, μεταβάλουν το βάρος τους. Στην περίπτωση αυτή, και για το χρονικό διάστημα που ισχύουν οι μεταβολές αυτές, η οδός αντιστοιχεί σε διαφορετική κλάση φωτισμού. Δίνεται έτσι η δυνατότητα σχεδιασμού ενός ευέλικτου συστήματος προσαρμοστικού φωτισμού, το οποίο, βασιζόμενο σε κατάλληλη υποδομή και εξοπλισμό επιτρέπει τη ρύθμιση της φωτεινής ροής των φωτιστικών σωμάτων. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να επιτευχθούν διαφορετικά επίπεδα φωτισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας. Έτσι, εξυπηρετούνται από τη μία οι συγκεκριμένες ανάγκες φωτισμού των οδών, συναρτήσει των συνθηκών που επικρατούν το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ενώ από την άλλη η κατανάλωση ενέργειας παραμένει σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα. Η μέγιστη κλάση φωτισμού που προκύπτει μέσω της διαδικασίας ορισμού με βάρη, αποτελεί την *ονομαστική κλάση φωτισμού* – *normal lighting class* ενώ οι κατώτερες κλάσεις που επιλέγονται για ορισμένα χρονικά διαστήματα ονομάζονται *κλάσεις προσαρμοστικού φωτισμού* – *adaptive lighting classes*. Σε κάθε οδό που φωτίζεται ή πρόκειται να φωτιστεί ορίζεται υποχρεωτικά μία ονομαστική κλάση φωτισμού και προαιρετικά μία ή περισσότερες κλάσεις προσαρμοστικού φωτισμού. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί εδώ το γεγονός ότι οι μελέτες οδοφωτισμού θα πρέπει να πραγματοποιούνται με βάση τις ονομαστικές κλάσεις ενώ συμπληρωματικοί υπολογισμοί θα πρέπει να εκτελούνται για τον ορισμό της ελάχιστης παραγόμενης φωτεινής ροής από τα φωτιστικά στην κάθε κλάση προσαρμοστικού φωτισμού.

3.2.3 Ποσοτικές και ποιοτικές απαιτήσεις οδοφωτισμού

Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13021.2 αφορά στα ποιοτικές και ποσοτικές απαιτήσεις της κάθε κλάσης φωτισμού όπως αυτή επιλέχθηκε με βάση την προηγούμενη ενότητα. Οι πίνακες 3.5, 3.6, 3.7 που ακολουθούν δείχνουν τις απαιτήσεις φωτισμού που οφείλουν να καλυφθούν στην περίπτωση που έχει επιλεγεί κλάση **M**, **C** ή **P** αντίστοιχα.

Πίνακας 3.5. Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού M κατά EN 13201.2 [15]

Κλάση	Λαμπρότητα οδοστρώματος για στεγνό και βρεγμένο οδόστρωμα			Δείκτης Θάμβωσης	Φωτισμός όμορων περιοχών	
	Στεγνό		Βρεγμένο	Στεγνό	Στεγνό	
	L_{av} (cd/m^2)	U_o	U_i	U_{ow}	f_{TI}	R_{EI}
M1	2.00	0.40	0.70	0.15	10	0.35
M2	1.50	0.40	0.70	0.15	10	0.35
M3	1.00	0.40	0.60	0.15	15	0.30
M4	0.75	0.40	0.60	0.15	15	0.30
M5	0.50	0.35	0.40	0.15	15	0.30
M6	0.30	0.35	0.40	0.15	20	0.30

Όπου L_{av} η μέση τιμή της λαμπρότητας του οδοστρώματος σε cd/m^2 , U_o η ομοιομορφία της λαμπρότητας, U_i η διαμήκης ομοιομορφία της λαμπρότητας, U_{ow} η ομοιομορφία λαμπρότητας υπό βρεγμένο οδόστρωμα, f_{TI} ο δείκτης θάμβωσης και R_{EI} ο δείκτης φωτισμού των όμορων περιοχών της οδού.

Πίνακας 3.6. Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού C κατά EN 13201.2 [15]

Κλάση	Ένταση φωτισμού	
	E (lux)	U_o
C0	50.0	0.40
C1	30.0	0.40
C2	20.0	0.40
C3	15.0	0.40
C4	10.0	0.40
C5	7.50	0.40

Όπου E η μέση τιμή της έντασης φωτισμού στο οδόστρωμα σε lux και U_o η ομοιομορφία της έντασης φωτισμού.

Πίνακας 3.7. Απαιτήσεις κλάσεων φωτισμού P κατά EN 13201.2 [15]

Κλάση	Ένταση φωτισμού		Πρόσθετες απαιτήσεις όταν είναι απαραίτητη η αναγνώριση προσώπων	
	E (lux)	U _o	E _v (lux)	E _{sc} (lux)
P1	15.0	3.00	5.00	5.00
P2	10.0	2.00	3.00	2.00
P3	7.50	1.50	2.50	1.50
P4	5.00	1.00	1.50	1.00
P5	3.00	0.60	1.00	0.60
P6	2.00	0.40	0.60	0.20
P7	Δεν έχει οριστεί			

Όπου E η μέση τιμή της έντασης φωτισμού στο οδόστρωμα, U_o η ομοιομορφία της έντασης φωτισμού, E_v η μέση τιμή της έντασης κατακόρυφου φωτισμού στο οδόστρωμα και E_{sc} η μέση τιμή της έντασης ημικυλινδρικού φωτισμού στο οδόστρωμα. Για τη διασφάλιση της ομοιομορφίας στις κλάσεις P η τιμή της μέσης έντασης φωτισμού που υπολογίζεται ή μετράται σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να είναι πάνω από 1.5 φορές μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή της έντασης φωτισμού. Επίσης, όλες οι παραπάνω τιμές αποτελούν τις ελάχιστες απαιτήσεις που καθορίζει το EN 13201.2, εκτός από το δείκτη θάμβωσης f_{ti} στις κλάσεις φωτισμού M, όπου οι τιμές που αναγράφονται είναι οι μέγιστες επιτρεπτές. Τέλος, όσον αφορά τις ποιοτικές απαιτήσεις ενός συστήματος οδοφωτισμού, γίνονται οι εξής υποδείξεις:

Για τον περιορισμό του παράσιτου φωτισμού σε όμορες περιοχές καθώς και την πρόκληση φωτορύπανσης τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό θα πρέπει να έχουν μηδενική φωτεινή εκπομπή στο άνω νοητό ημισφαίριο. Σε περίπτωση που κατά το σχεδιασμό φωτισμού είναι αναγκαία η κλίση του φωτιστικού σώματος, προτείνεται η μέγιστη κλίση να μην ξεπερνά τις 5 μοίρες σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Για την μείωση της επίδρασης της υψηλής θερμοκρασίας χρώματος στον κερκαδικό ρυθμό του ανθρώπου και την καταστολή έκκρισης της μελατονίνης καθώς και για τον περιορισμό των επιπτώσεων στα έμβια όντα, η θερμοκρασία χρώματος των πηγών φωτισμού δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 4000K ενώ συνίσταται η χρήση πηγών με θερμοκρασία χρώματος περί τους 3000K.

3.3 Εκπόνηση μελέτης οδοφωτισμού

Στο στάδιο αυτό ο μελετητής του έργου καλείται αρχικά να εισάγει δεδομένα απαραίτητα για τον υπολογισμό των κρίσιμων μεγεθών της κλάσης οδοφωτισμού που έχει επιλεγεί και εν συνεχεία να εκτελέσει φωτοτεχνικούς υπολογισμούς με σκοπό την κάλυψη των απαιτήσεων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα για οδούς κλάσης M απαιτείται ο

υπολογισμός των L_{av} , U_o , U_i , U_{ow} , f_{Ti} , για οδούς κλάσης **C** των E, U_o και για οδούς κλάσης **P** των E, U_o , E_v , E_{sc} . Επιπροσθέτως, τα δεδομένα που καλείται να εισάγει ο μελετητής εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, όπως το πλάτος της οδού, το πλήθος και πλάτος των πεζοδρομίων, ο αριθμός των ρευμάτων κυκλοφορίας, η ύπαρξη και οι διαστάσεις διαχωριστικής νησίδας και τα χαρακτηριστικά οδοφωτισμού, όπως το ύψος και η διάσταση των ιστών, η απόσταση τους μεταξύ τους και από το ρείθρο, το μήκος και η κλίση των βραχιόνων. Όλοι οι υπολογισμοί μεγεθών οφείλουν να γίνουν με τη διαδικασία που περιγράφεται στα EN 13201.3 και EN 13201.4. Τέλος, με σκοπό τη μείωση του φαινομένου της φωτορύπανσης και τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων η TOTEE ορίζει ότι οι μελέτες οδοφωτισμού πρέπει να εκτελούνται με τέτοιο τρόπο ώστε τα ποσοτικά αποτελέσματα της εκάστοτε κλάσης φωτισμού (μέση λαμπρότητα ή μέση ένταση φωτισμού) να μην υπερβαίνουν το 10% των ελάχιστων από την κλάση απαιτούμενων.

3.4 Υπολογισμός δεικτών ενεργειακής επίδοσης

Το πρότυπο EN 13201.5 καθορίζει τους δείκτες ενεργειακής επίδοσης μίας εγκατάστασης οδοφωτισμού. Οι δείκτες αυτοί είναι δύο, ο δείκτης πυκνότητας ισχύος και ο ετήσιος δείκτης ενεργειακής κατανάλωσης και καθορίζουν το πόσο αποδοτική είναι μία εγκατάσταση φωτισμού λαμβάνοντας υπόψη τόσο την συνολική ισχύ του συστήματος όσο και την συνολική επιφάνεια της φωτιζόμενης περιοχής. Ο μελετητής θα πρέπει να υπολογίζει του δύο αυτούς δείκτες κατά το σχεδιασμό φωτισμού μίας νέας εγκατάστασης ή κατά το σχεδιασμό της αναβάθμισης υφιστάμενου συστήματος φωτισμού. Προτείνεται επίσης ο υπολογισμός των δεικτών αυτών για μία υφιστάμενη εγκατάσταση για λόγους σύγκρισης της αποδοτικότητας με μία νέα προτεινόμενη εγκατάσταση. Ο υπολογισμός τους γίνεται ως εξής:

A) Δείκτης πυκνότητας ισχύος – Power density indicator

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i} \text{ σε } \frac{W}{lx \cdot m^2} [18]$$

D_p : δείκτης πυκνότητας ισχύος

P: συνολική ισχύς της εγκατάστασης

E_i : η μέση ένταση κάθετου φωτισμού της υποπεριοχής i

A_i : το εμβαδόν της υποπεριοχής i

n: ο αριθμός των φωτιζόμενων υποπεριοχών

Ο δείκτης αυτός υπολογίζει την επίδοση του συστήματος φωτισμού στην εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος (οδόστρωμα, πεζοδρόμια, κ.λπ) φανερώνοντας το ποσό της απορροφούμενης ενέργειας που αξιοποιείται για το σκοπό του οδοφωτισμού.

B) Ετήσιος δείκτης ενεργειακής κατανάλωσης – Annual energy consumption indicator

$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^m P_i \cdot T_i}{A} \text{ σε } \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \quad [18]$$

D_e : ετήσιος δείκτης ενεργειακής κατανάλωσης

P_i : συνολική ισχύς της εγκατάστασης φωτισμού το χρονικό διάστημα λειτουργίας i

T_i : διάρκεια της περιόδου λειτουργίας i

A : εμβαδόν της περιοχής που φωτίζεται από το σύστημα φωτισμού

m : πλήθος χρονικών διαστημάτων λειτουργίας

Ο δείκτης αυτός υπολογίζει την επίδοση του συστήματος φωτισμού κατά τη διάρκεια του έτους στην περιοχή ενδιαφέροντος. Με το δείκτη αυτό γίνεται σαφές το ποσό της καταναλισκόμενης ενέργειας που αξιοποιείται για το σκοπό του οδοφωτισμού.

3.5 Συντελεστής συντήρησης

Ένα πολύ σημαντικό μέγεθος το οποίο ο μελετητής ενός έργου πρέπει να καθορίσει προκειμένου να πραγματοποιήσει τους παραπάνω υπολογισμούς είναι ο συντελεστής συντήρησης (maintenance factor, MF) [20]. Ο συντελεστής συντήρησης ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης έντασης φωτισμού μετά από μια χρονική περίοδο προς την αρχική ένταση φωτισμού ενός συστήματος φωτισμού. Συνεπώς υπολογίζει το ποσοστό της αρχικής έντασης φωτισμού ενός συστήματος που διατηρείται μετά από ένα εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

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

MF: συντελεστής συντήρησης

E_m : Ένταση φωτισμού που διατηρείται στο χρονικό διάστημα μελέτης (maintained illuminance)

E_{in} : Αρχική ένταση φωτισμού (initial illuminance)

Ο συντελεστής συντήρησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες με αποτέλεσμα να μπορεί να εκφραστεί σαν το επακόλουθο γινόμενο:

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot LSF \cdot RSMF$$

- LLMF (Lamp Lumen Maintenance Factor). Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την σχετική απόδοση φωτός ενός λαμπτήρα κατά τη διάρκεια της ζωής του σε σχέση με την αρχική του απόδοση. Ο παράγοντας LLMF εξαρτάται από τον τύπο του λαμπτήρα ως προς την κατασκευή, την ποιότητα και την θερμική διαχείριση του. Για τους συμβατικούς λαμπτήρες τον παράγοντα αυτόν επιβαρύνει επιπλέον και το σύστημα έναυσης του λαμπτήρα. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η περιοδική αντικατάσταση των φωτιστικών

- LMF (Luminaire Maintenance Factor). Ο συντελεστής LMF κάνει μια εκτίμηση της μείωσης της σχετικής απόδοσης του φωτιστικού σώματος λόγω της σκόνης και των ακαθαρσιών που εγκαθίστανται σε αυτό σε μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Εξαρτάται από τον τύπο και το σχεδιασμό του φωτιστικού σώματος καθώς και από το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίσταται.

Επομένως για την μείωση της επίδρασης του προτείνεται ο σχεδιασμός ενός κύκλου καθαρισμού και συντήρησης των φωτιστικών σωμάτων.

- LSF (Lamp Survival Factor). Ο συντελεστής αυτός αντικατοπτρίζει την πιθανότητα ενός αντιπροσωπευτικού αριθμού λαμπτήρων του ίδιου τύπου να παραμείνουν λειτουργικοί μετά από μια χρονική περίοδο. Εκφράζει τα καταστροφικά σφάλματα των φωτιστικών, δηλαδή τα σφάλματα τα οποία δεν μπορούν να αποφευχθούν. Στους συμβατικούς λαμπτήρες το πλήθος αυτό είναι σημαντικό και επηρεάζει την λειτουργία του δικτύου φωτισμού αφού προκαλείται μείωση της λαμπρότητας, της έντασης φωτισμού και της ομοιομορφίας. Ενδεδειγμένη λύση είναι η άμεση αντικατάσταση των φωτιστικών αυτών, η οποία αποτελεί ωστόσο μια ακριβή και πολύπλοκη διαδικασία που δύσκολα εφαρμόζεται στον οδοφωτισμό (μέτρα ασφαλείας, ανάγκη παρακολούθησης, απαραίτητος και εξειδικευμένος εξοπλισμός). Τα LED φωτιστικά από την άλλη πλευρά, έχουν πολύ μικρό ποσοστό καταστροφικών σφαλμάτων (μικρότερο του 1%) και στην πράξη ο λόγος για μια αναπάντεχη αστοχία του φωτιστικού σώματος οφείλεται στο driver.

- RSMF (Room Surface Maintenance Factor) Ο συντελεστής αυτός εκτιμά τη σχετική αναλογία της εσωτερικής ανάκλασης του εξεταζόμενου χώρου που διατηρείται σε σχέση με την αρχική μετά από μια χρονική περίοδο λόγω της μη καθαρότητας των επιφανειών. Ο παράγοντας αυτός στην περίπτωση του οδοφωτισμού αμελείται καθώς δεν υπάρχουν πρακτικά επιφάνειες ανάκλασης οι οποίες συμβάλλουν στο φωτισμό πέραν του οδοστρώματος, η επίδραση του οποίου όμως συνυπολογίζεται στην επιλογή κατάλληλης κλάσης φωτισμού, καθώς έχει μεγάλη σημασία στη λαμπρότητα που αντιλαμβάνονται οι χρήστες του δρόμου.

Στον οδοφωτισμό ο σωστός υπολογισμός του συντελεστή συντήρησης διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο καθώς η λανθασμένη εκτίμηση του οδηγεί στην εκπόνηση μελέτης η οποία είτε θα έχει μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ και έτσι σπατάλη ενέργειας και χρημάτων, σε περίπτωση επιλογής συντελεστή συντήρησης μικρότερου από όσο πρέπει, είτε στην αντίθετη περίπτωση οδηγεί σε εγκατάσταση η οποία με την πάροδο του χρόνου δεν θα παρέχει το κατάλληλο επίπεδο φωτισμού ώστε να εναρμονίζεται με τις απαιτήσεις του προτύπου.

Κεφάλαιο 4: Πολυκριτήρια συστήματα αποφάσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα αποφάσεων, καθώς και στην πολυκριτήρια ανάλυση. Επακολούθως, γίνεται εκτεταμένη περιγραφή και ανάλυση της πολυκριτήριας μεθόδου που ονομάζεται PROMETHEE II, η οποία στην παρούσα εργασία, αποτελεί το βασικό εργαλείο απόφασης για την επιλογή των κατάλληλων φωτιστικών.

4.1 Η έννοια της απόφασης

Η λήψη αποφάσεων αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα και σημαντικότερα φαινόμενα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Αυτή συναντάται σε κάθε επίπεδο, από τις αποφάσεις που λαμβάνονται σε επίπεδο έθνους, τοπικής αυτοδιοίκησης ή διοικητικού συμβουλίου μιας πολυεθνικής επιχείρησης έως αυτές που λαμβάνονται από κάθε μεμονωμένο άτομο στα πλαίσια της προσωπικής ζωής, της καριέρας του ή των καταναλωτικών του προτιμήσεων. Η έννοια της απόφασης υποδηλώνει πάντα την ύπαρξη μιας οντότητας που είναι υπεύθυνη για τη λήψη της και που ονομάζεται «αποφασίζων» και που μπορεί να είναι είτε ένα άτομο είτε ένα συλλογικό όργανο (διοικητικό συμβούλιο, επιτροπή).

Η λήψη μιάς απόφασης σπάνια εκδηλώνεται σαν άμεση εκδήλωση των προτιμήσεων του αποφασίζοντος, αντ' αυτού αποτελεί αντικείμενο μιας διεργασίας που ονομάζεται διαδικασία της απόφασης (decision process). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με το πρόβλημα, αναζητούνται οι πιθανές λύσεις, ανταλλάσσονται απόψεις ανάμεσα στα ενδιαφερόμενα μέρη και ενδεχομένως το πρόβλημα χωρίζεται σε μικρότερα υποπροβλήματα το καθένα από τα οποία επιλύεται ανεξαρτητα από τα υπόλοιπα. Γίνεται επομένως σαφές ότι η απόφαση και η διαδικασία λήψης της είναι δύο διεργασίες άρρηκτα συνδεδεμένες [21].

Η πολυπλοκότητα ενός προβλήματος απόφασης οφείλεται κυρίως σε δύο αιτίες, στην πολυδιάστατη φύση των δράσεων που μπορούν να ληφθούν και στη βεβαιότητα ή αβεβαιότητα που διέπει τα δεδομένα του προβλήματος. Υπό αυτό το πρίσμα, διαπιστώνεται ότι είναι περιττό να μιλάμε για βέλτιστη απόφαση στην περίπτωση προβλημάτων που εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους και η έννοια της βέλτιστης απόφασης περιορίζεται στην βελτιστοποίηση ενός και μοναδικού κριτηρίου. Έτσι, η βελτιστοποίηση, λόγω της χρήσης ενός και μοναδικού κριτηρίου ισοδυναμεί με μονοκριτήρια ανάλυση του προβλήματος. Η γενικότερη διαδικασία προσέγγισης αυτού του είδους προβλημάτων ονομάζεται *πολυκριτήρια ανάλυση*.

Η επιχειρησιακή έρευνα (operational research) αποτελεί την επιστήμη που αντικείμενο έχει τη δόμηση και υποστήριξη των αποφάσεων και βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα απόφασης (decision models). Η διαδικασία που ακολουθεί ο μελετητής ενός προβλήματος προκειμένου να κατασκευάσει ένα μοντέλο αυτού, ονομάζεται μοντελοποίηση του προβλήματος.

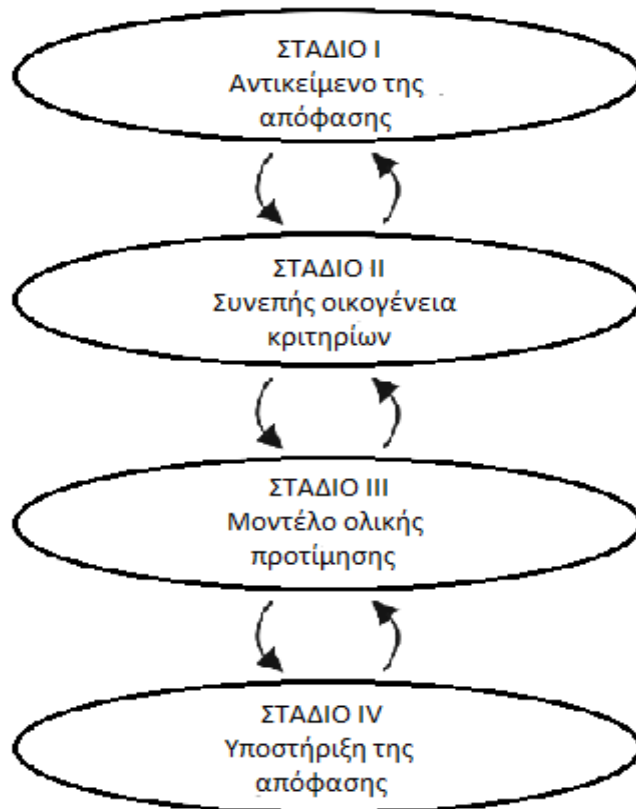
Οι αποφάσεις χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [22]:

- A) Δομημένες αποφάσεις: Λαμβάνονται αυτόματα, συνήθως μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών, χωρίς τη συμμετοχή του αποφασίζοντος.
- B) Ημιδομημένες αποφάσεις: Λαμβάνονται στο πλαίσιο ενός συστήματος «ανθρώπου-μηχανής», όπου ο αποφασίζων έχει τον κυριότερο ρόλο.
- Γ) Αδόμητες αποφάσεις: Αποτελούν τις αποφάσεις που δεν είναι δυνατόν να δομηθούν ή δεν έχει εξερευνηθεί η δυνατότητα δόμησης τους και συνήθως σημαντικό ρόλο στη λήψη τους παίζει η ανθρώπινη διαίσθηση.

4.2 Μοντελοποίηση προβλημάτων απόφασης

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο μελετητής ενός προβλήματος είναι υπεύθυνος για τη μοντελοποίησή του. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από 4 διαδοχικά αλλά αλληλεπιδρώντα στάδια. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία δεν είναι σειριακή και αποτελούμενη από τη μετάβαση από το ένα σταδιο στο επόμενο, αντιθέτως ο μελετητής μπορεί να διαπιστώσει σφάλματα ή έλλειψη απαραίτητων πληροφοριών, κάτι που μπορεί να διορθώσει ανατρέχοντας σε προηγούμενα στάδια. [23]

Τα στάδια αυτά φαίνονται στο Σχήμα 4.1 και θα αναλυθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 4.1. Στάδια μοντελοποίησης ενός προβλήματος απόφασης [24]

1) *Αντικείμενο της απόφασης*: Στο στάδιο αυτό εκτελούνται απαραίτητως 2 ενέργειες, ο ορισμός του συνόλου A των δράσεων και ο καθορισμός της προβληματικής. Το αντικείμενο της απόφασης αναλύεται σε ένα συνεχές ή διακριτό σύνολο που ονομάζεται σύνολο A των δράσεων και περιλαμβάνει όλες τις πιθανές αποφάσεις που μπορούν να ληφθούν. Στην περίπτωση μας, το σύνολο είναι διακριτό και αποτελείται από το σύνολο των φωτιστικών που μελετήσαμε. Ο καθορισμός της προβληματικής αφορά το σκοπό του αναλυτή και έχουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Προβληματική α : επιλογή (choice) μιας και μόνο δράσης από το σύνολο A .
- Προβληματική β : ταξινόμηση (sorting) των δράσεων σε προκαθορισμένες κατηγορίες, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος.
- Προβληματική γ : κατάταξη (ranking) των δράσεων του συνόλου A από την καλύτερη μέχρι τη χειρότερη.
- Προβληματική δ : περιγραφή (description) των δράσεων και των συνεπειών τους στους εμπλεκόμενους στη διαδικασία απόφασης.

Η συγκεκριμένη εργασία σκοπό έχει την κατάταξη των φωτιστικών από το καλύτερο στο χειρότερο, έτσι το πρόβλημα προφανώς υπάγεται στην προβληματική γ .

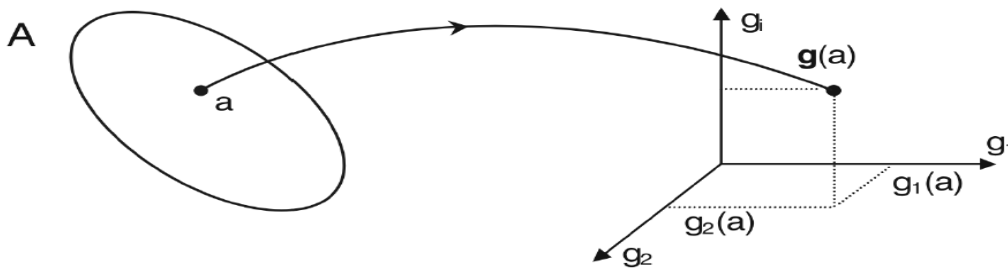
II) *Συνεπής οικογένεια κριτηρίων*: Αρχικά, ο μαθηματικός ορισμός του κριτηρίου είναι:

$$g : A \rightarrow R / a \rightarrow g(a),$$

όπου $g(a)$ είναι η τιμή της δράσης a πάνω στο κριτήριο g . Τα κριτήρια πρέπει να πληρούν την ιδιότητα της συνέπειας ή μονοτονίας, δηλαδή αν a, b δύο δράσεις του συνόλου A , ισχύει $g(a) > g(b) \leftrightarrow aSb$, που σημαίνει «η δράση a υπερέχει της δράσης b ». Ως συνέπεια του παραπάνω ορισμού, ένα σύστημα αξιολόγησης των δράσεων μοντελοποιείται μέσω μιας συνεπούς οικογένειας κριτηρίων $F = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ που περιλαμβάνει n κριτήρια τα οποία πρέπει να πληρούν 3 συνθήκες.

- Συνέπεια ή μονοτονία: Εάν για ένα ζεύγος δράσεων a, b ισχύει $g_i(a) = g_i(b)$, $\forall i \neq j$ και $g_j(a) > g_j(b)$, τότε η δράση a υπερέχει της δράσης b (ή aSb).
- Επάρκεια: Εάν για ένα ζεύγος δράσεων a, b ισχύει $g_i(a) = g_i(b)$, $\forall i \in \{1, n\}$, αυτό συνεπάγεται ότι η δράση a είναι αδιάφορη της δράσης b , δηλαδή δεν απουσιάζει κανένα κριτήριο απόφασης από την οικογένεια F .
- Μη πλεονασμός: Η διαγραφή ενός κριτηρίου από την οικογένεια F παραβιάζει κάποια από τις παραπάνω δύο συνθήκες για κάποια ζεύγη δράσεων.

Τέλος, ως *πολυκριτήρια αξιολόγηση* της δράσης a ορίζεται το διάνυσμα των τιμών της δράσης a πάνω στα n κριτήρια $g(a) = (g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a))$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2. Πολυκριτήρια αξιολόγηση μιας δράσης [22]

III) Μοντέλο ολικής προτίμησης: Στο στάδιο αυτό ο αναλυτής καλείται να επιλέξει μια μέθοδο (μοντέλο) πολυκριτήριας σύνθεσης, η οποία θα επιτρέψει τη σύγκριση των δράσεων του συνόλου A , λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις τιμές των δράσεων A επί των κριτηρίων της F . Επομένως, ένα μοντέλο ολικής προτίμησης αποτελεί έναν κανόνα σύνθεσης των κριτηρίων, που αποτελούν μοντέλα μερικής προτίμησης. Αυτά γενικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

- Αντισταθμιστικά μοντέλα: Πρόκειται για μοντέλα όπου η μείωση της τιμής μιας δράσης για ένα κριτήριο μπορεί να αντισταθμιστεί από την αύξηση της τιμής της ίδιας δράσης για κάποιο άλλο κριτήριο.
- Μη αντισταθμιστικά μοντέλα: Στην περίπτωση αυτή η αντιστάθμιση της μεταβολής της τιμής ενός κριτηρίου με τη μεταβολή ενός άλλου δεν είναι επιτρεπτή.

Εδώ αξίζει να αναφερθούν επίσης οι κυριότερες κατηγορίες πολυκριτήριων μεθόδων σύνθεσης κριτηρίων.

- Συναρτησιακές μέθοδοι: Η σύνθεση των κριτηρίων επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας ή περισσότερων συναρτήσεων αξίας.
- Σχεσιακές μέθοδοι: Η σύνθεση των κριτηρίων επιτυγχάνεται μέσω μιας ή περισσότερων σχέσεων υπεροχής.
- Αναλυτικές μέθοδοι: Το μοντέλο σύνθεσης των κριτηρίων συμπεραίνεται έμμεσα, χρησιμοποιώντας δεδομένα ολικής προτίμησης του αποφασίζοντος.

IV) Υποστήριξη της απόφασης: Το στάδιο αυτό είναι συμπληρωματικό του προηγούμενου και η ύπαρξή του οφείλεται στο γεγονός ότι μια λύση ενός μοντέλου μπορεί να μην είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη. Έτσι, ο αναλυτής καλείται να οργανώσει τη λύση σε συνάρτηση με ερωτήματα που μπορεί να τεθούν, κυρίως από τον αποφασίζοντα. Σημαντικό ρόλο παίζει το μοντέλο ολικής προτίμησης που έχει επιλεγεί στο προηγούμενο στάδιο και το οποίο υποδεικνύει τις τεχνικές που συμβάλλουν στη αρτιότερη τεκμηρίωση των επιλογών που έχουν γίνει.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να οριστεί ο πολυκριτήριος πίνακας δράσεων. Δεδομένων n εναλλακτικών δράσεων και m κριτηρίων, ο πίνακας αυτός κατασκευάζεται με την απόδοση τιμής για κάθε δράση πάνω σε κάθε κριτήριο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Η διαδικασία αυτή

γίνεται είτε από τον αποφασίζοντα, είτε από τον αναλυτή του προβλήματος σε επικοινωνία με τον αποφασίζοντα. Στο στάδιο αυτό γίνεται η σύνθεση των κριτηρίων με την βοήθεια ενός μοντέλου ολικής προτίμησης, Με βάση το μοντέλο και λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την επιλεγείσα προβληματική, συγκρίνονται όλες οι εναλλακτικές ενέργειες-πράξεις του συνόλου A.

Πίνακας 4.1. Πολυκριτήριο πίνακας δράσεων [24]

Εναλλακτικές	Κριτήρια			
	g1	g2	...	gm
a ₁	g1(a ₁)	g2(a ₁)	...	gm(a ₁)
a ₂	g1(a ₂)	g2(a ₂)	...	gm(a ₂)
...
a _n	g1(a _n)	g2(a _n)	...	gm(a _n)

4.3 Πολυκριτήρια ανάλυση και σχετικές έννοιες

Στην πολυκριτήρια ανάλυση χρησιμοποιούνται τέσσερις τύποι κριτηρίων, οι οποίοι είναι [24]:

- Το μετρήσιμο κριτήριο (Measurable criterion), το οποίο διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες:

A) Τα πραγματικά κριτήρια (true criterion). Αποτελούν την απλούστερη μορφή κριτηρίων. Τα πραγματικά κριτήρια χρησιμοποιούνται σε αυτό που ονομάζεται «παραδοσιακή» δομή προτιμήσεων και όπου δεν υπάρχουν κατώφλια. Η διαφορά μεταξύ των τιμών των κριτηρίων χρησιμοποιείται για να καθορισθεί μια επιλογή προτιμάται. Από άποψη εφαρμογής, είναι τα πιο εύκολα σε χρήση λόγω της σαφήνειας που ορίζει τα μετρήσιμα μεγέθη.

B) Τα ημι-κριτήρια (semi-criterion). Χρησιμοποιούνται στα μοντέλα «κατωφλίου» ή δομής προτιμήσεων, όπου η σταθερά της «απλώς αξιοσημείωτης διαφοράς» (just noticeable difference) υπάρχει για κάποιο δεδομένο κριτήριο. Η διαφορά μεταξύ των τιμών των δυο επιλογών, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της τιμής αυτής της σταθεράς, ώστε να θεωρείται ότι η μια είναι καλύτερη της άλλης.

Γ) Ψευδοκριτήρια (pseudo-criteria). Τα ψευδοκριτήρια επιτρέπουν την προσέγγιση προβλημάτων με χρήση κατωφλίων δύο επιπέδων, προτίμησης και αδιαφορίας.

Δ) Κριτήρια διαστημάτων (interval criterion). Αυτά χρησιμοποιούνται στο ονομαζόμενο μοντέλο μεταβλητού κατωφλίου. Στην περίπτωση αυτή τα κατώφλια προτίμησης και αδιαφορίας συμπίπτουν σε όλα τα σημεία της κλίμακας.

- Το κριτήριο της μονοτονίας (ordinal criteria).
- Το κριτήριο αβεβαιότητας (probabilistic criterion), στο οποίο η αξιολόγηση κάθε δράσης είναι κατά πιθανότητα γνωστή στην κλίμακα του κριτηρίου. Για την εφαρμογή της δεδομένης κατηγορίας αξιοποιούνται τα εργαλεία της θεωρίας πιθανοτήτων και κυρίως τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας.

- Ασαφές κριτήριο (fuzzy criterion), τα οποία δεν ακολουθούν στατιστικούς νόμους. Σε αυτές τις περιπτώσεις κάθε δράση αξιολογείται από μια συνάρτηση δυνατότητας που δείχνει κατά πόσο δυνατή είναι κάθε τιμή του κριτηρίου.

Ο σαφής ορισμός των κριτηρίων είναι σημαντικός. Γενικότερα υπάρχει η ανάγκη για σωστή μοντελοποίηση των προτιμήσεων έτσι ώστε να οδηγείται ο αποφασίζων σε ορθά συμπεράσματα. Η επίτευξη αυτής της μοντελοποίησης γίνεται με την χρήση δυο βασικών εννοιών, της *διμερούς σχέσης* και της *συνάρτησης*.

Η έννοια της διμερούς σχέσης καλύπτεται σε μεγάλο ποσοστό από την έννοια της σχέσης υπεροχής η οποία υποδηλώνεται με το γράμμα S . Ο συμβολισμός aSb μεταξύ δυο δράσεων a και b δηλώνει ότι η a είναι τουλάχιστον εξίσου καλή επιλογή όσο η b . Με την χρήση αυτής της σχέσης μπορούν να αναλυθούν τρεις θεμελιώδεις καταστάσεις.

- aSb και bSa (όχι bSa) που δηλώνει ότι η δράση a προτιμάται από την b . Εναλλακτικά η σχέση γράφεται και ως aPb με το P να δείχνει ισχυρή προτίμηση. Αναλυτικότερα βάση των αρχικών διμερών σχέσεων φαίνεται ότι η δράση a υπερέχει της b , αλλά δεν συμβαίνει το αντίστροφο.
- aSb και bSa που δείχνει ότι υπάρχει αδιαφορία ως προς την επιλογή μεταξύ των δράσεων. Ισοδύναμα μπορεί να αναπαρασταθεί και ως aIb . Εδώ προφανώς καμία δράση δεν υπερέχει έναντι της άλλης και χαρακτηρίζονται ισοδύναμες, αφού γίνεται αυτόματη μετάβαση από την μια στην άλλη.
- $a\#b$ και $b\#a$ που αναφέρεται σε δυο ασύγκριτες μεταξύ τους δράσεις και ο αντίστοιχος συμβολισμός είναι aRb . Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει σχέση που να συνδέει τις a και b . Ο Bernard Roy εκτός από τις παραπάνω βασικές σχέσεις έθεσε και την έννοια της ασθενούς προτίμησης που συμβόλισε με το γράμμα Q .

Ομαδοποιώντας τις τέσσερις θεμελιώδεις σχέσεις P, Q, I, R εισήχθησαν όλες οι πιθανές καταστάσεις σύγκυσης ή δισταγμού που είναι οι ακόλουθες.

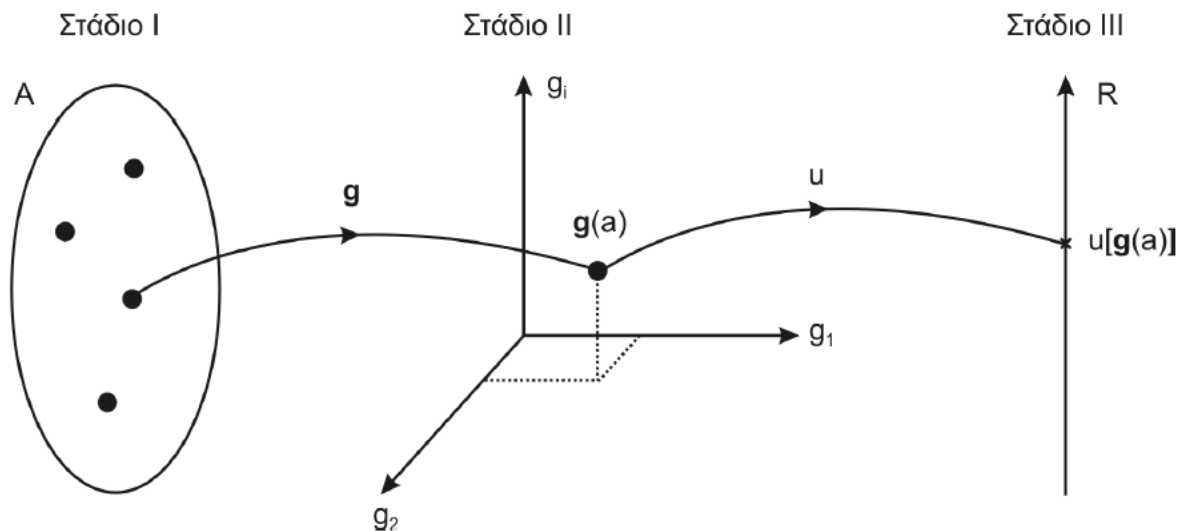
- $a\sim b$: Μη προτίμηση: aIb ή aRb
- $a>b$: Προτίμηση: aPb ή aQb
- aJb : Προδιάθεση προτίμησης: aQb ή aIb
- aKb : Κ-Προτίμηση: aPb ή aIb
- aSb : Υπεροχή: aPb ή aQb ή aIb [23]

Η διάζευξη δηλώνει την ισχύ οποιασδήποτε εκ των σχέσεων χωρίς διάκριση. Η υπεροχή ισοδυναμεί με ισχυρή προτίμηση, ασθενή προτίμηση ή αδιαφορία μεταξύ των δράσεων a και b . Αντίστοιχα η έννοια της συνάρτησης είναι χρήσιμη για να οριστούν τα συναρτησιακά μοντέλα αποφάσεων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας μια *συνάρτηση αξίας* (value function) επιτυγχάνεται η σύνθεση του συνόλου των κριτηρίων g_1, g_2, \dots, g_n σε ένα μοναδικό κριτήριο. Έτσι, αυτού του είδους η μοντελοποίηση των προτιμήσεων αποκαλείται μέθοδος του ολικού κριτηρίου (method of global criterion).

Η συνάρτηση αξίας είναι μια πραγματική συνάρτηση που ορίζεται στο καρτεσιανό γινόμενο των κριτηρίων και δείχνει την συνολική αξία μιας δράσης, δηλαδή $U[g_1(a_i), g_2(a_i), \dots, g_n(a_i)] \rightarrow R$, τέτοια

ώστε $g(a) \rightarrow u[g(a)]$. Η τιμή της συνάρτησης για μια δράση a ονομάζεται ολική αξία της δράσης a .

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, η συνάρτηση αξίας αποτυπώνει τις προτιμήσεις σε μια ενιαία κλίμακα και όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο καλύτερη θεωρείται η επιλογή της ανάλογης δράσης.



Σχήμα 4.3. Μοντελοποίηση της ολικής προτίμησης με χρήση ολικού κριτηρίου [24]

Βεβαίως, είναι δυνατόν να μην υπάρχει ξεκάθαρη ιεραρχία μεταξύ δυο πολύ κοντινών τιμών ή η διαφορά τους να μην αφορά τον μελετητή ιδιαίτερα. Προκειμένου να διασφαλιστεί αυτή η ευαισθησία χρησιμοποιείται ο όρος του ψευδοκριτηρίου. Μια συνάρτηση κριτηρίου g ονομάζεται ψευδοκριτήριο όταν περιέχει δυο συναρτήσεις-κατώφλια, ένα κατώφλι αδιαφορίας q και ένα κατώφλι προτίμησης p . Τα κατώφλια έχουν κάποιες συγκεκριμένες τιμές που καθορίζονται από τον αποφασίζοντα και δείχνουν την πρόθεση αλλαγής διάθεσης προς μια κατάσταση. Οι διμερείς σχέσεις που οριστήκαν παραπάνω μπορούν να οριστούν ακριβέστερα συναρτησιακά με τις σχέσεις που ακολουθούν:

$g(a) > g(b) + p[g(b)] \Leftrightarrow aPb$. Το κριτήριο για την επιλογή a έχει μεγαλύτερη τιμή από το άθροισμα του κριτηρίου για την επιλογή b και το αντίστοιχο κατώφλι προτίμησης.

$g(b) + q[g(b)] < g(a) \leq g(b) + p[g(b)] \Leftrightarrow aQb$ Η τιμή του κριτηρίου για την επιλογή a βρίσκεται μεταξύ των δυο κατωφλίων και επομένως εκφράζεται ασθενής προτίμηση για την a .

$g(b) \leq g(a) \leq g(b) + q[g(b)] \Leftrightarrow aIb$. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά των τιμών του κριτηρίου για κάθε δράση είναι μικρότερη του κατωφλίου αδιαφορίας και επομένως ο αναλυτής δεν μπορεί να εκφράσει προτίμηση για κάποια από τις δυο.

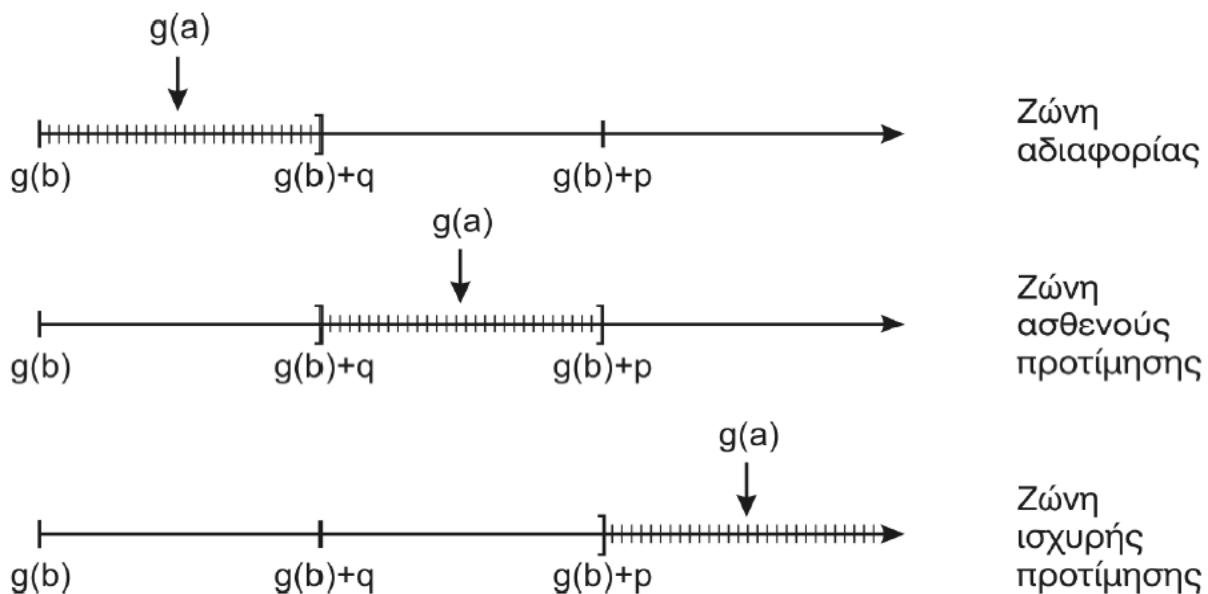
Το Σχήμα 4.4 αποτυπώνει τις διάφορες ζώνες προτίμησης. Όσο οι τιμές βρίσκονται στην ζώνη αδιαφορίας ο αποφασίζων δεν είναι σε θέση να ξεχωρίσει αν υπάρχει έννοια υπεροχής και

βλέπει τις δυο δράσεις σαν ισοδύναμες. Όταν αυξηθεί η τιμή για το ένα κριτήριο πέρα από την συγκεκριμένη τιμή $g(b) + q$, η κατάσταση αλλάζει και το πρόσωπο που καλείται να αποφασίσει εκφράζει μια ασθενή προτίμηση. Επομένως σε αυτό το σημείο ισχύει aQb . Σε περίπτωση που η τιμή του κριτηρίου αυξηθεί αρκετά ξεπερνώντας και την τιμή $g(b) + p$ πλέον εκφράζεται ισχυρή προτίμηση και ισχύει aPb . Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι συναρτήσεις $g + q(g)$, $g + p(g)$ πρέπει να είναι συναρτήσεις μονότονες και μη φθίνουσες.

Στην περίπτωση όπου $p(g)=q(g)>0$ τα δυο κατώφλια ταυτίζονται και πρόκειται για ημικριτήριο, προφανώς δεν υπάρχει ζώνη ασθενούς προτίμησης.

Αν $q(g)=0$ η περίπτωση αποτελεί ένα προκριτήριο και δεν υπάρχει ζώνη αδιαφορίας.

Τέλος, αν $p(g)=q(g)=0$ υπάρχει μόνο η ζώνη ισχυρής προτίμησης και το κριτήριο σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται πραγματικό.



Σχήμα 4.4. Ζώνες προτίμησης και αδιαφορίας [24]

Το αντικείμενο της εργασίας σχετίζεται με πραγματικά κριτήρια επομένως δεν θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση ζώνη αδιαφορίας ή ασθενούς προτίμησης. Αυτό είναι λογικό γιατί όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι τεχνικά χαρακτηριστικά και οποιαδήποτε διαφορά στην τιμή τους γίνεται αναγκαστικά αντιληπτή χωρίς να υπάρχει υποκειμενικός παράγοντας. Τέλος, θα οριστεί η γραμμική συνάρτηση αξίας. Πρόκειται για το συνηθέστερο και πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο σύνθεσης κριτηρίων. Η αξία μιας δράσης a υπολογίζεται ως εξής:

$$U[g(a)] = W_1 \cdot g_1(a) + W_2 \cdot g_2(a) + \dots + W_n \cdot g_n(a)$$

όπου οι συντελεστές W_1, W_2, \dots, W_n αποτελούν τους συντελεστές βαρύτητας των αντιστοίχων κριτηρίων. Οι συντελεστές βαρύτητας υποδηλώνουν τις παραχωρήσεις που είναι διατεθειμένος

να κάνει ο αποφασίζων στην τιμή ενός κριτηρίου για τη συγκεκριμένη δράση, προκειμένου να αυξήσει την τιμή ενός άλλου κριτηρίου κατά μια μονάδα, αφήνοντας τη συνολική αξία της δράσης αναλλοίωτη.

4.4 Η μέθοδος PROMETHEE II

Οι μέθοδοι PROMETHEE αναπτύχθηκαν από τους Brans, Mareschal και Vincke και αποτελούν μεθόδους διμερούς σύγκρισης των δράσεων. Συγκεκριμένα, οι δράσεις οδηγούνται σε μερική κατάταξη μέσω του αλγορίθμου PROMETHEE I ή σε ολική κατάταξη μέσω του PROMETHEE II, όπως γίνεται στην παρούσα εργασία. Η PROMETHEE III καταλήγει σε διάταξη των δράσεων σε διαστήματα (προβληματική β), η PROMETHEE IV γενικεύει την PROMETHEE II στην περίπτωση που το σύνολο A δεν είναι πεπερασμένο, ενώ τέλος, η PROMETHEE V επιδιώκει την κατασκευή ενός υποσυνόλου δράσεων του συνόλου A, υπό την παρουσία επιπρόσθετων περιορισμών (απόδοση, προϋπολογισμός, ρίσκο κλπ).

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται ο ορισμός των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων και η κανονικοποίησή τους, έτσι ώστε το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα, δηλαδή:

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1.$$

Οι μέθοδοι PROMETHEE, για ένα ζεύγος δράσεων a και b και ένα κριτήριο g_j , δίνει μια τιμή στη διαφορά $g_j(a) - g_j(b)$. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας συνάρτησης προτίμησης P_j (preference function), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$P_j(a, b) = F[d_j(a, b)], \forall a, b$$

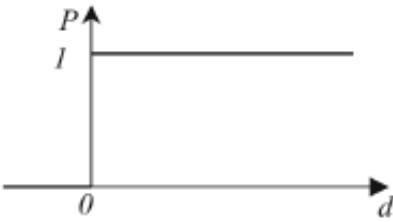
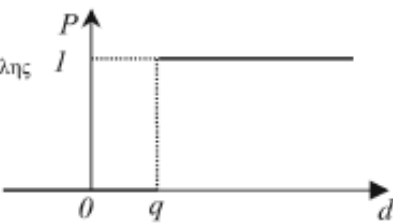
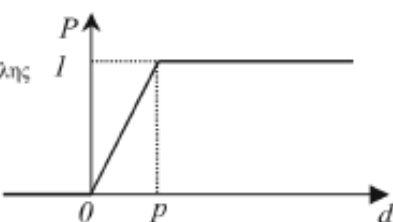
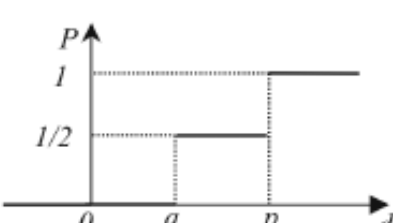
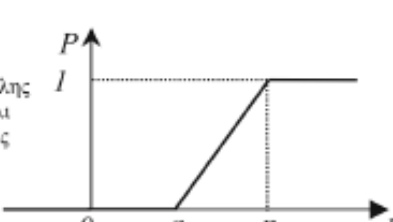
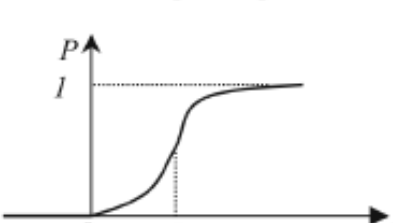
όπου: $d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$,

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1,$$

Και $P_j(a, b) = 0$ όταν $g_j(a) - g_j(b) < 0$

Όταν $g_j(a) - g_j(b) > 0$, η P_j παίρνει τιμές ανάλογα με την επιλογή του αναλυτή από 6 προκαθορισμένες καμπύλες που φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Σε συγκεκριμένες από αυτές απαιτείται επιπλέον ο ορισμός των q (κατώφλι αδιαφορίας), p (κατώφλι προτίμησης), s (ενδιάμεσο κατώφλι μεταξύ q, p). [25]

Πίνακας 4.2. Είδη γενικευμένων κριτηρίων και αντίστοιχες συναρτήσεις προτίμησης P(d) [24]

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

Εν συνεχεία, ορίζεται ο σταθμισμένος δείκτης προτίμησης:

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

που υποδηλώνει το βαθμό ολικής προτίμησης της δράσης a έναντι της δράσης b για το σύνολο των n κριτηρίων. Προφανώς ισχύει εξ ορισμού

$$0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \rightarrow 0 \leq W_j \cdot P_j(a, b) \leq W_j \rightarrow 0 \leq \sum_{j=1}^n W_j \cdot P_j(a, b) \leq \sum_{j=1}^n W_j$$

Όμως το δεξιό μέρος της τελευταίας ανίσωσης αποτελεί το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας που έχει κανονικοποιηθεί στη μονάδα, άρα τελικά

$$0 \leq \pi(a, b) \leq 1$$

Αφού προσδιοριστεί ο τύπος γενικευμένου κριτηρίου, η αντίστοιχη συνάρτηση προτίμησης καθώς και τα απαιτούμενα κατώφλια, για κάθε δράση a του συνόλου A υπολογίζονται οι ακόλουθοι τρεις δείκτες.

A) *Θετική ροή υπεροχής (positive outranking flow):*

$$\Phi_{pos}(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$$

B) *Αρνητική ροή υπεροχής (negative outranking flow):*

$$\Phi_{neg}(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$$

C) *Καθαρή ροή υπεροχής (net outranking flow):*

$$\Phi(a) = \Phi_{pos}(a) - \Phi_{neg}(a)$$

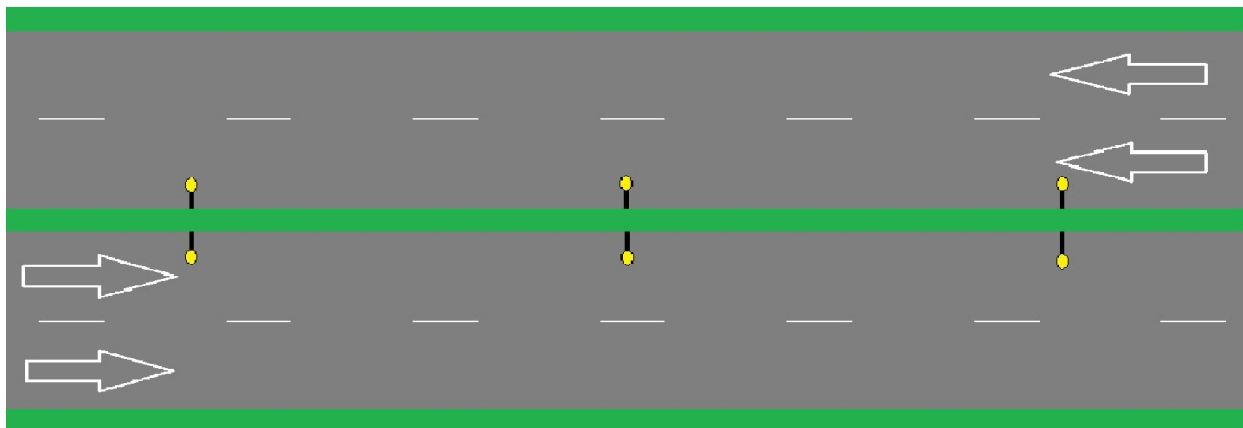
Για τους δύο πρώτους δείκτες μπορεί να παρατηρηθεί ότι αποτελούν το άθροισμα των σταθμισμένων δεικτών προτίμησης των δράσεων έναντι των οποίων υπερέχει η a και των δράσεων οι οποίες υπερέχουν της a αντίστοιχα, κανονικοποιημένων στη μονάδα μέσω του διαιρέτη $(n-1)$, που αποτελεί το μέγιστο πλήθος δράσεων που μπορεί να υπερέχονται μιας δράσης. Ως αποτέλεσμα ισχύει ότι $0 \leq \Phi_{pos}(a) \leq 1$ και $0 \leq \Phi_{neg}(a) \leq 1$. Έτσι, η καθαρή ροή υπεροχής $\Phi(a) \in [-1, 1]$ και δείχνει την ολική αξία της δράσης a . Τελικά ο αλγόριθμος PROMETHEE II καταλήγει σε κατάταξη του συνόλου των δράσεων A , από την καλύτερη (αυτή με τη μεγαλύτερη καθαρή ροή υπεροχής) στη χειρότερη (αυτή με τη μικρότερη καθαρή ροή υπεροχής).

Κεφάλαιο 5: Μελέτη οδοφωτισμού και κατάταξη φωτιστικών με πολυκριτήρια ανάλυση

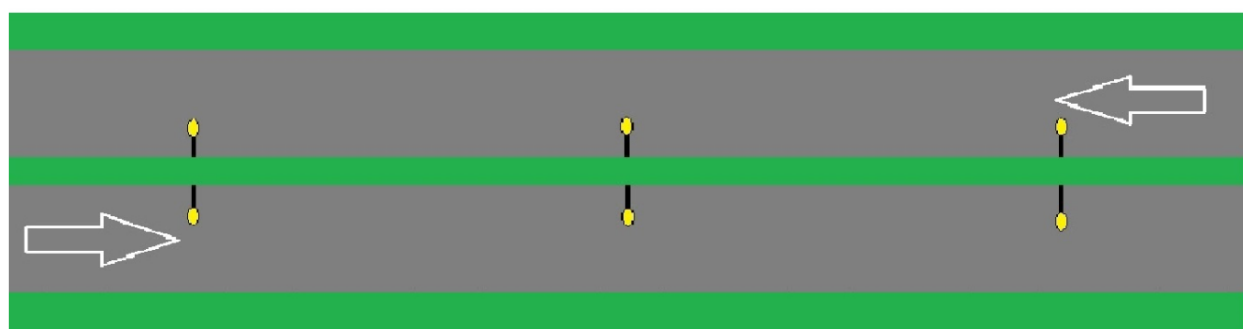
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των οδών που μελετήθηκαν, τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν. Εν συνεχεία θα οριστούν τα κριτήρια και τα αντίστοιχα βάρη με σκοπό την εφαρμογή της πολυκριτήριας μεθόδου PROMETHEE II για την κατάταξη των φωτιστικών που μελετήθηκαν. Περισσότερες πληροφορίες για τα φωτιστικά αλλά και τα αποτελέσματα των μελετών υπάρχουν στα Παραρτήματα Α και Β.

5.1 Περιγραφή γεωγραφικών στοιχείων οδού και χαρακτηριστικών οδοφωτισμού

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη οδοφωτισμού για δύο διαφορετικούς δρόμους, ένα δρόμο κλάσης οδοφωτισμού M3 και ένα δρόμο κλάσης οδοφωτισμού C4. Ο δρόμος κλάσης M3 αποτελείται από δύο ρεύματα κυκλοφορίας με δύο λωρίδες ανά κατεύθυνση και διαχωριστική νησίδα πλάτους 1 m. Ο δρόμος κλάσης C4 αποτελείται επίσης από δύο ρεύματα κυκλοφορίας με ίδια διαχωριστική νησίδα, αλλά με μία λωρίδα ανά κατεύθυνση. Το πλάτος κάθε λωρίδας θεωρήθηκε ίσο με 3.75 m. Και στις δύο περιπτώσεις οι ιστοί όπου αναρτήθηκαν τα φωτιστικά έχουν τοποθετηθεί στη διαχωριστική νησίδα (κεντρική διάταξη) και έχουν ύψος 9 m στο δρόμο κλάσης M3 και 6 m στο δρόμο κλάσης C4. Επιπλέον, στην κορυφή κάθε ιστού έχει τοποθετηθεί βραχίονας με συνολικό μήκος 2 m, κάθετα στη νησίδα, στο άκρο του οποίου αναρτούνται τα φωτιστικά. Έχουμε δηλαδή δύο φωτιστικά αναρτημένα σε κάθε ιστό. Απαιτήθηκε η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών να είναι τουλάχιστον 25 m, αλλά οι ιστοί σε κάθε μελέτη τοποθετούνται στη μέγιστη δυνατή απόσταση, ώστε να καλύπτονται όλες οι απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201. Τα φωτιστικά τοποθετήθηκαν με κλίση από 0° έως 10° με βήμα 5° κατά τη διαδικασία εξεύρεσης της μέγιστης απόστασης τοποθέτησης των ιστών. Μεγαλύτερες κλίσεις αποφεύχθηκαν σκόπιμα καθώς η εφαρμογή τους στον οδοφωτισμό οδηγεί σε θάμβωση και φωτορύπανση και αντενδείκνυται από την TOTEE. Τέλος, ο συντελεστής συντήρησης MF επιλέχθηκε ίσος με 0.8 και ο συντελεστής ανακλαστικότητας του οδοστρώματος $Q_o = 0.07$. Η κεντρική διάταξη των φωτιστικών φαίνεται στα Σχήματα 5.1.A και 5.1.B για τις κλάσεις οδοφωτισμού M3 και C4 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1.A Κεντρική διάταξη φωτιστικών στο δρόμο κλάσης οδοφωτισμού M3



Σχήμα 5.1.B Κεντρική διάταξη φωτιστικών στο δρόμο κλάσης οδοφωτισμού C4

Τα φωτιστικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες οδοφωτισμού είναι τύπου LED, καθώς αποτελούν ίσως την καλύτερη λύση για λόγους που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες (διάρκεια ζωής, δυνατότητα απουσίας εκτεταμένου πλάνου συντήρησης, κατανάλωση ενέργειας). Πρόκειται για φωτιστικά 3 εταιριών και τα αποτελέσματα των μελετών που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στη συνέχεια. Συνολικά έγιναν 10 μελέτες για τις δύο κλάσεις οδοφωτισμού, με 10 φωτιστικά, τα οποία όμως έχουν επιλεγεί ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις του προτύπου και τον περιορισμό η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ιστών να είναι τουλάχιστον 25 m και στις δύο περιπτώσεις. Σκοπός των μελετών αυτών αποτελεί άλλωστε η συλλογή δεδομένων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, ώστε με την εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE II να προκύψει κατάταξη των φωτιστικών. Προφανώς η κατάταξη που θα προκύψει δεν είναι υποχρεωτικά η ίδια για τις δύο κλάσεις οδοφωτισμού, αλλά το γεγονός ότι έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια φωτιστικά παρέχει τη δυνατότητα συγκρισης και σχολιασμού των αποτελεσμάτων.

5.2 Μελέτες οδοφωτισμού στους δρόμους κλάσης M3 και C4

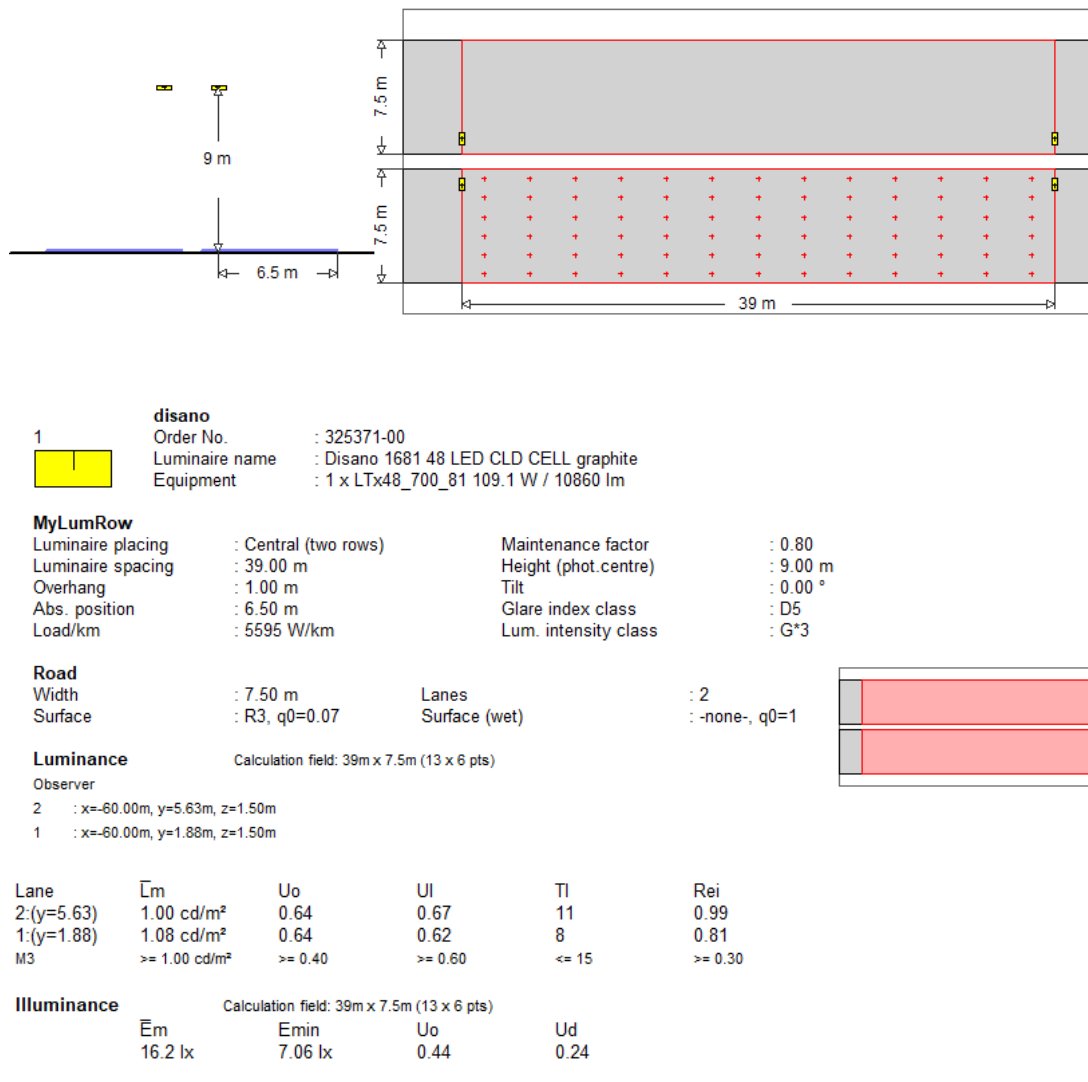
Στις επόμενες ενότητες παρατίθενται οι μελέτες οδοφωτισμού που έγιναν. Για την εκπόνησή τους προτιμήθηκε το λογισμικό Relux και τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών καθώς και τα

αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ και στα Παραρτήματα Α και Β προέρχονται από τη χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου λογισμικού.

5.2.1 Διάταξη 1.Α

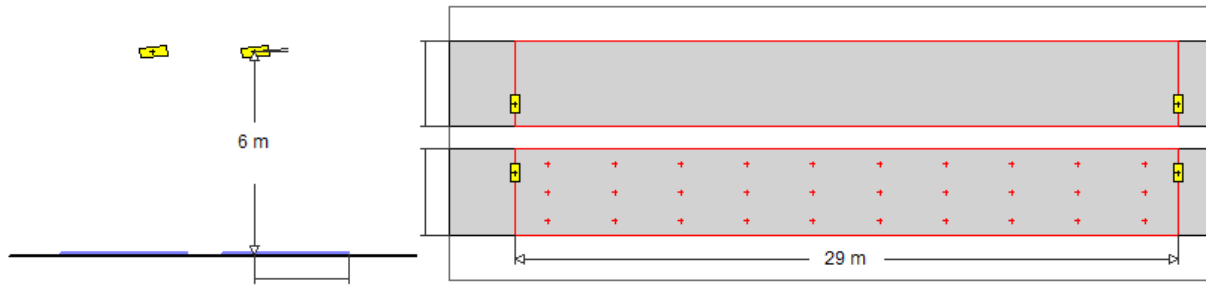
Το φωτιστικό 1 είναι της εταιρίας Disano και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι 1681 Brega 1 (109.1 Watt). Στο παράρτημα Α.1 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.


Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 39 m στο δρόμο κλάσης M3 και 29 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 1 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.2 Διάταξη 1.B



1	disano	Order No.	: 325371-00
	Luminaire name	: Disano 1681 48 LED CLD CELL graphite	
	Equipment	: 1 x LTx48_700_81 109.1 W / 10860 lm	

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 29.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 5.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D4
Load/km	: 7524 W/km	Lum. intensity class	: G*2

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1



Illuminance

Calculation field: 29m x 3.75m (10 x 3 pts)

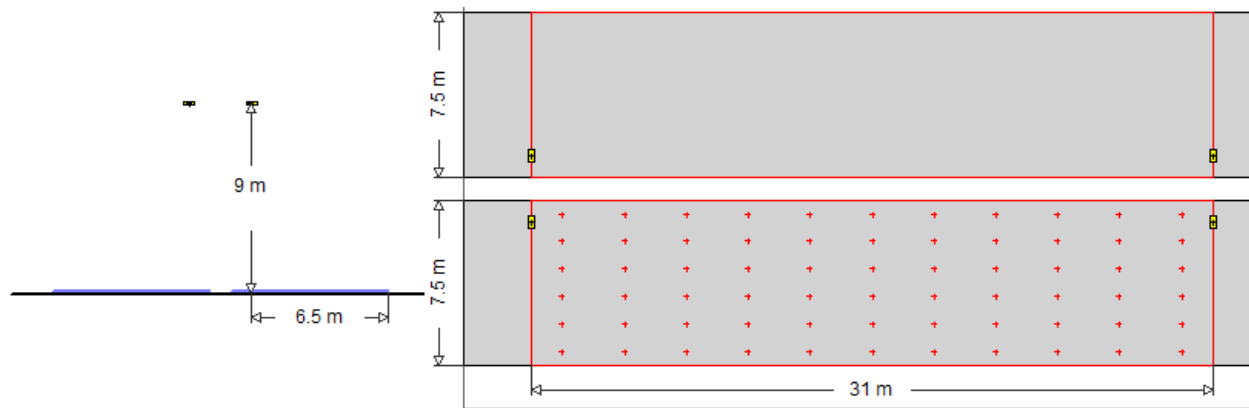
	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
C4	26 lx	10.7 lx	0.41	0.19
	≥ 10.0 lx		≥ 0.40	


Σχήμα 5.3. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 1 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.3 Διάταξη 2.A

Το φωτιστικό 2 είναι της εταιρίας Disano και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι 3275 Mini Stelvio (82.4 Watt). Στο παράρτημα A.2 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 31 m στο δρόμο κλάσης M3 και 29 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



1	disano	Order No.	: 330475-00
		Luminaire name	: Disano 3275 48 led - 530mA CLD CELL anthracite
		Equipment	: 1 x LTx48_530_75 82.4 W / 8635 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 31.00 m	Height (phot. centre)	: 9.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 6.50 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 5316 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road

Width	: 7.50 m	Lanes	: 2
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Luminance

Calculation field: 31m x 7.5m (11 x 6 pts)

Observer

2	: x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m
1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m

Lane	\bar{L}_m	U_o	UI	TI	Rei
2:(y=5.63)	1.00 cd/m ²	0.76	0.81	9	0.99
1:(y=1.88)	1.08 cd/m ²	0.76	0.83	7	0.81
M3	≥ 1.00 cd/m ²	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.30

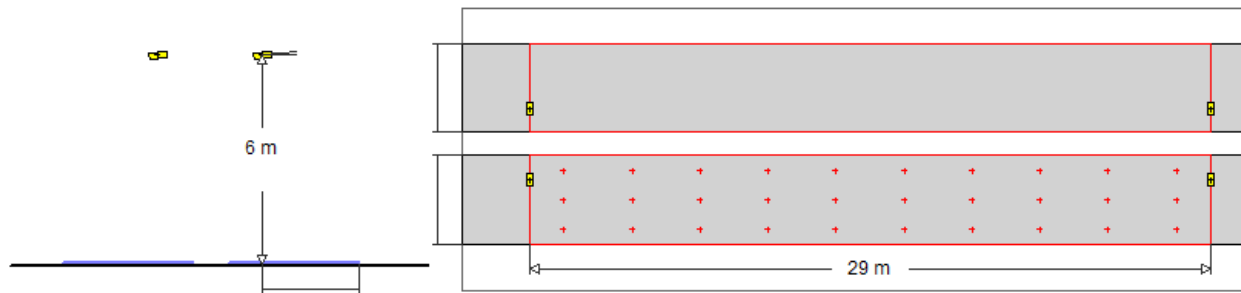
Illuminance


Calculation field: 31m x 7.5m (11 x 6 pts)

\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
16.2 lx	8.76 lx	0.54	0.36

Σχήμα 5.4. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 2 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.4 Διάταξη 2.B



1	disano	Order No.	: 330475-00
		Luminaire name	: Disano 3275 48 led - 530mA CLD CELL anthracite
		Equipment	: 1 x LTx48_530_75 82.4 W / 8635 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 29.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 5.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 5683 W/km	Lum. intensity class	: G*2

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

	Calculation field: 29m x 3.75m (10 x 3 pts)			
	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	21 lx	8.50 lx	0.41	0.19
C4	≥ 10.0 lx		≥ 0.40	

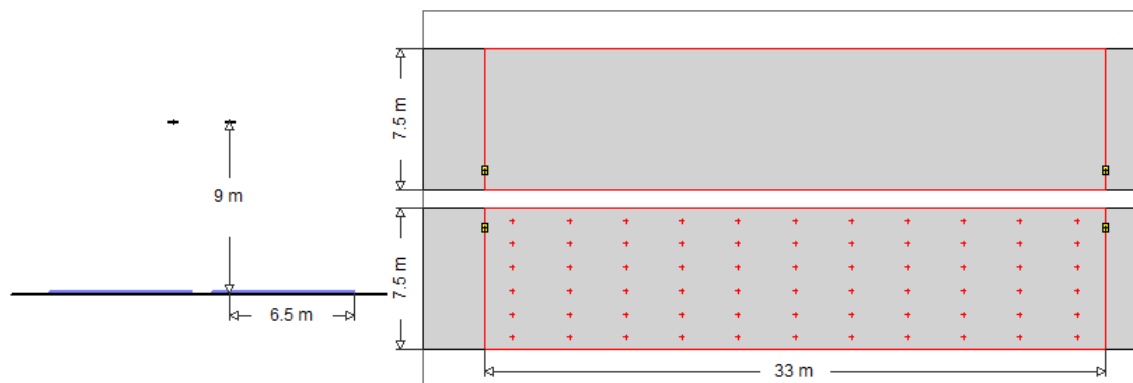



Σχήμα 5.5. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 2 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.5 Διάταξη 3.A

Το φωτιστικό 3 είναι της εταιρίας Disano και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι 3284 Rolle (84.7 Watt). Στο παράρτημα A.3 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

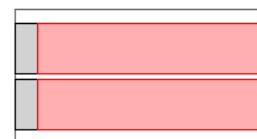
Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 33 m στο δρόμο κλάσης M3 και 28 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.7 και 5.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



1		disano Order No. : 330441-00 Luminaire name : Disano 3284 10 LED - T5 -700mA CLD CELL grey Equipment : 1 x LMu10_700_84 84.7 W / 9320 lm	
MyLumRow			
Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 33.00 m	Height (phot. centre)	: 9.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 6.50 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 5133 W/km	Lum. intensity class	: G*6

Road	Width	: 7.50 m	Lanes	: 2
	Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Luminance	Calculation field: 33m x 7.5m (11 x 6 pts)
Observer	
2	: x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m
1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m

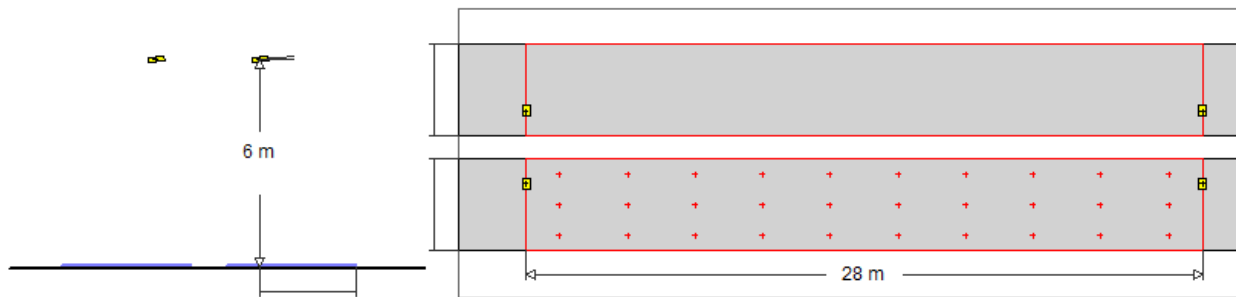



Lane	\bar{L}_m	U_o	U_I	T_I	Re_i
2:(y=5.63)	1.25 cd/m ²	0.46	0.62	9	1.03
1:(y=1.88)	1.33 cd/m ²	0.46	0.75	5	0.45
M3	≥ 1.00 cd/m ²	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.30

Illuminance	Calculation field: 33m x 7.5m (11 x 6 pts)		
\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
22 lx	10.6 lx	0.49	0.25

Σχήμα 5.6. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 3 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.3 Διάταξη 3.Β



1	disano	Order No.	: 330441-00
		Luminaire name	: Disano 3284 10 LED - T5 -700mA CLD CELL grey
		Equipment	: 1 x LMu10_700_84 84.7 W / 9320 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 28.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 5.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 6050 W/km	Lum. intensity class	: G*4

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

Calculation field: 28m x 3.75m (10 x 3 pts)

	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
C4	34 lx	13.8 lx	0.41	0.20
	≥ 10.0 lx		≥ 0.40	

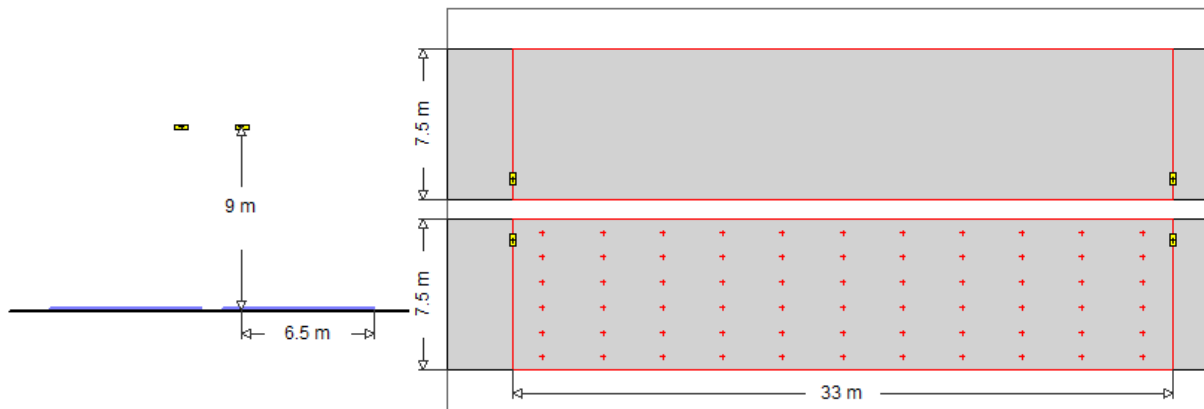



Σχήμα 5.7. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 3 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.7 Διάταξη 4.A

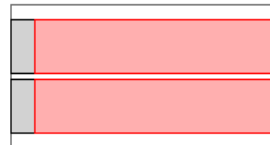
Το φωτιστικό 4 είναι της εταιρίας Disano και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι 3290 Sella 1 (84.9 Watt). Στο παράρτημα A.4 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 33 m στο δρόμο κλάσης M3 και 28 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



<p>1</p> 	<p>disano Order No. : 330601-00 Luminaire name : Disano 3290 16 LED 78w CLD CELL graphite Equipment : 1 x LuxM+LuxTX78_3290 84.9 W / 9401 lm</p>
MyLumRow	
<p>Luminaire placing : Central (two rows) Luminaire spacing : 33.00 m Overhang : 1.00 m Abs. position : 6.50 m Load/km : 5145 W/km</p>	<p>Maintenance factor : 0.80 Height (phot. centre) : 9.00 m Tilt : 0.00 ° Glare index class : D4 Lum. intensity class : G*4</p>

Road	
<p>Width : 7.50 m Surface : R3, q0=0.07</p>	<p>Lanes : 2 Surface (wet) : -none-, q0=1</p>



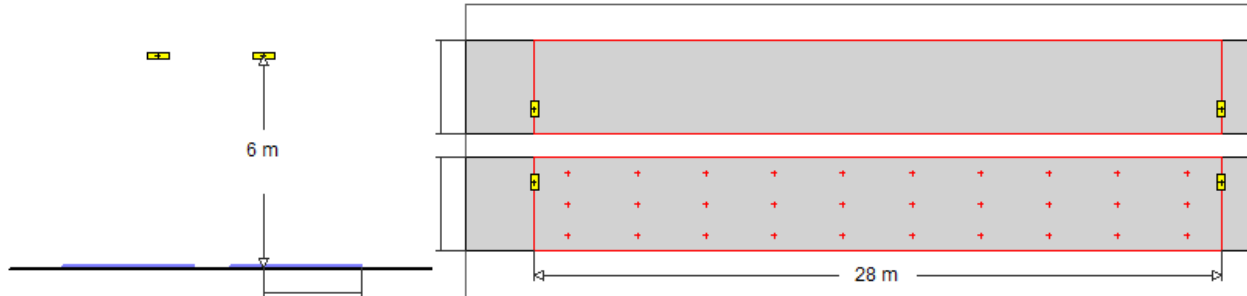
Luminance	
Calculation field: 33m x 7.5m (11 x 6 pts)	
Observer	
2	: x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m
1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m


Lane	\bar{L}_m	U_o	U_l	T_l	Re_i
2:(y=5.63)	1.24 cd/m ²	0.49	0.60	9	1.07
1:(y=1.88)	1.32 cd/m ²	0.50	0.84	7	0.62
M3	≥ 1.00 cd/m ²	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.30

Illuminance			
Calculation field: 33m x 7.5m (11 x 6 pts)			
\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
19.4 lx	9.62 lx	0.50	0.28

Σχήμα 5.8. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 4 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.8 Διάταξη 4.Β



1	disano	Order No.	: 330601-00
		Luminaire name	: Disano 3290 16 LED 78w CLD CELL graphite
		Equipment	: 1 x LuxM+LuxTX78_3290 84.9 W / 9401 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 28.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D4
Load/km	: 6064 W/km	Lum. intensity class	: G*4

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

	Calculation field: 28m x 3.75m (10 x 3 pts)			
	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
C4	33 lx	13.8 lx	0.41	0.22
	≥ 10.0 lx		≥ 0.40	

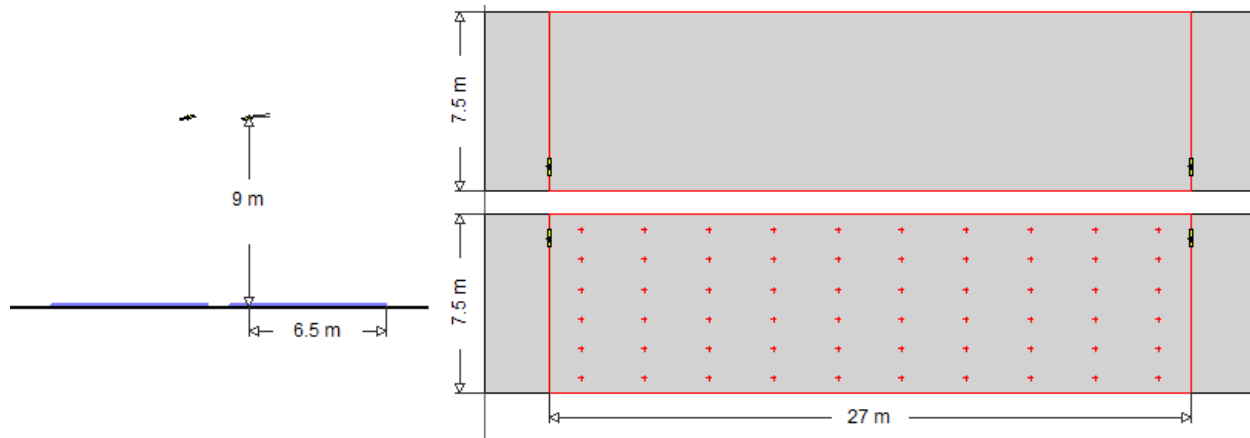


Σχήμα 5.9. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 4 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.9 Διάταξη 5.A

Το φωτιστικό 5 είναι της εταιρίας OSRAM και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι Streetlight 11 mini LED (65.3 Watt). Στο παράρτημα A.5 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 27 m στο δρόμο κλάσης M3 και 30m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



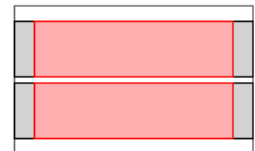
1	OSRAM	
	Order No.	: 5XC2G41C08HA/
	Luminaire name	: Streetlight 11 mini LED ST1.2P1.0
	Equipment	: 1 x LED 4000K / CRI >= 70 65 W / 7000 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 27.00 m	Height (phot. centre)	: 9.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 10.00 °
Abs. position	: 6.50 m	Glare index class	: D0
Load/km	: 4837 W/km	Lum. intensity class	: n/a

Road

Width	: 7.50 m	Lanes	: 2
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1



Luminance

Calculation field: 27m x 7.5m (10 x 6 pts)

Observer

2	: x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m
1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m

Lane	\bar{L}_m	U_o	U_l	T_l	Re_i
2:(y=5.63)	1.03 cd/m ²	0.49	0.74	15	1.00
1:(y=1.88)	1.15 cd/m ²	0.48	0.76	10	0.74
M3	>= 1.00 cd/m ²	>= 0.40	>= 0.60	<= 15	>= 0.30

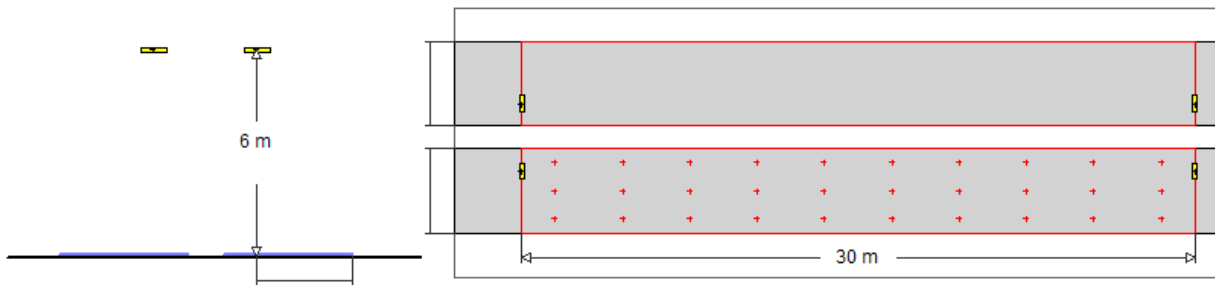
Illuminance

Calculation field: 27m x 7.5m (10 x 6 pts)

\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
13.7 lx	10.2 lx	0.74	0.52

Σχήμα 5.10. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 5 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.10 Διάταξη 5.B



1	OSRAM	
	Order No.	: 5XC2G41C08HA/
	Luminaire name	: Streetlight 11 mini LED ST1.2P1.0
	Equipment	: 1 x LED 4000K / CRI >= 70 65 W / 7000 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 30.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D1
Load/km	: 4353 W/km	Lum. intensity class	: G*1

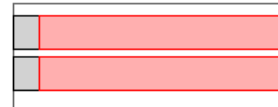
Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

Calculation field: 30m x 3.75m (10 x 3 pts)

	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	21 lx	8.67 lx	0.40	0.22
C4	>= 10.0 lx		>= 0.40	

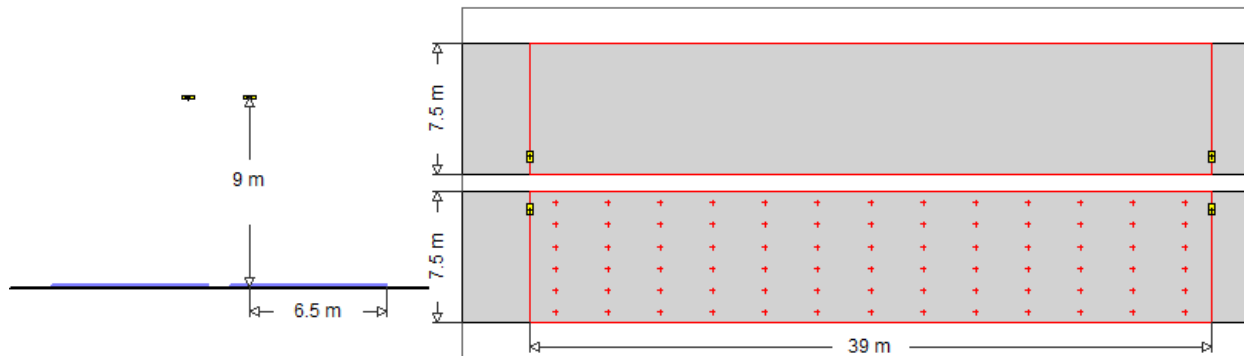



Σχήμα 5.11. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 5 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.11 Διάταξη 6.A

Το φωτιστικό 6 είναι της εταιρίας OSRAM και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι Streetlight 20 midi LED (95.4 Watt). Στο παράρτημα Α.6 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 39 m στο δρόμο κλάσης M3 και 29 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



1	OSRAM	Order No. : 5XB33K2C408A/
	Luminaire name : Streetlight 20 midi LED ST1.3a	Equipment : 2 x LED 4000K / CRI >= 70 47 W / 5350 lm

MyLumRow		Maintenance factor : 0.80
Luminaire placing : Central (two rows)	Luminaire spacing : 39.00 m	Height (phot. centre) : 9.00 m
Overhang : 1.00 m	Abs. position : 6.50 m	Tilt : 0.00 °
Load/km : 4892 W/km		Glare index class : D4
		Lum. intensity class : G*3

Road		Lanes : 2
Width : 7.50 m	Surface : R3, q0=0.07	Surface (wet) : -none-, q0=1

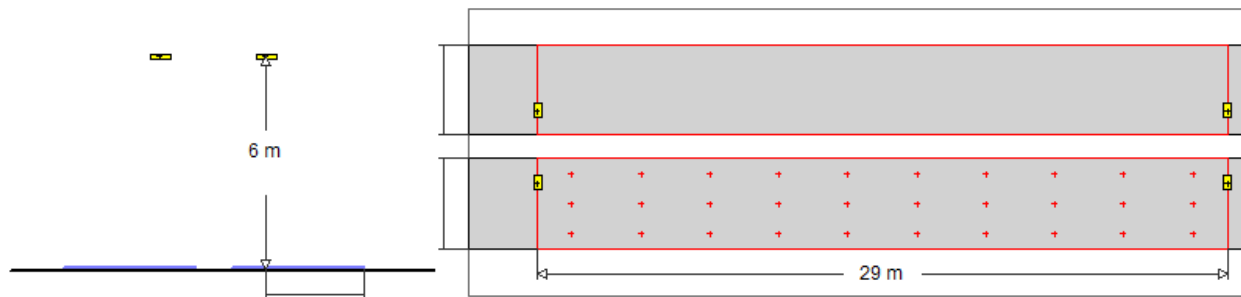
Luminance	Calculation field: 39m x 7.5m (13 x 6 pts)
Observer	
2 : x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m	
1 : x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m	


Lane	\bar{L}_m	U_o	UI	TI	Rei
2:(y=5.63)	1.08 cd/m ²	0.51	0.61	13	0.92
1:(y=1.88)	1.16 cd/m ²	0.53	0.70	9	0.67
M3	>= 1.00 cd/m ²	>= 0.40	>= 0.60	<= 15	>= 0.30

Illuminance	Calculation field: 39m x 7.5m (13 x 6 pts)		
\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
17.3 lx	8.23 lx	0.48	0.22

Σχήμα 5.12. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 6 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.12 Διάταξη 6.B



1		OSRAM Order No. : 5XB33K2C408A/ Luminaire name : Streetlight 20 midi LED ST1.3a Equipment : 2 x LED 4000K / CRI >= 70 47 W / 5350 lm
---	---	--

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 29.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D4
Load/km	: 6579 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1



Illuminance

Calculation field: 29m x 3.75m (10 x 3 pts)

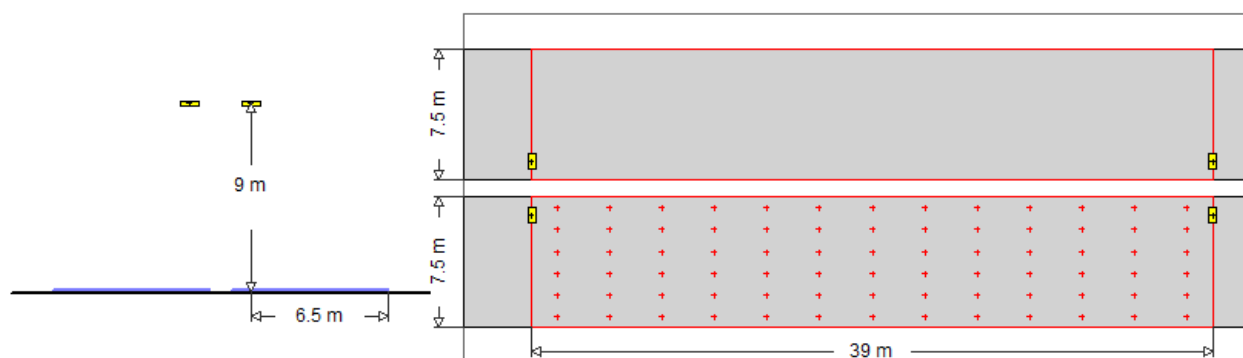
	\bar{E}_m	E_{min}	U_0	U_d
	34 lx	13.7 lx	0.40	0.17
C4	>= 10.0 lx		>= 0.40	


Σχήμα 5.13. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 6 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.13 Διάταξη 7.A

Το φωτιστικό 7 είναι της εταιρίας OSRAM και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι Streetlight 20 maxi LED (90,8 Watt). Στο παράρτημα Α.7 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 39 m στο δρόμο κλάσης M3 και 29 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



1	OSRAM	Order No.	: 5XB43N1B408A/
		Luminaire name	: Streetlight 20 maxi LED ST1.3a
		Equipment	: 2 x LED 3000K / CRI >= 80 45 W / 5150 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 39.00 m	Height (phot. centre)	: 9.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 6.50 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 4656 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road

Width	: 7.50 m	Lanes	: 2
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Luminance

Calculation field: 39m x 7.5m (13 x 6 pts)

Observer

2 : x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m

1 : x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m

Lane	\bar{E}_m	U_o	UI	TI	Rei
2:(y=5.63)	1.04 cd/m ²	0.51	0.61	13	0.92
1:(y=1.88)	1.12 cd/m ²	0.53	0.70	9	0.67
M3	>= 1.00 cd/m ²	>= 0.40	>= 0.60	<= 15	>= 0.30

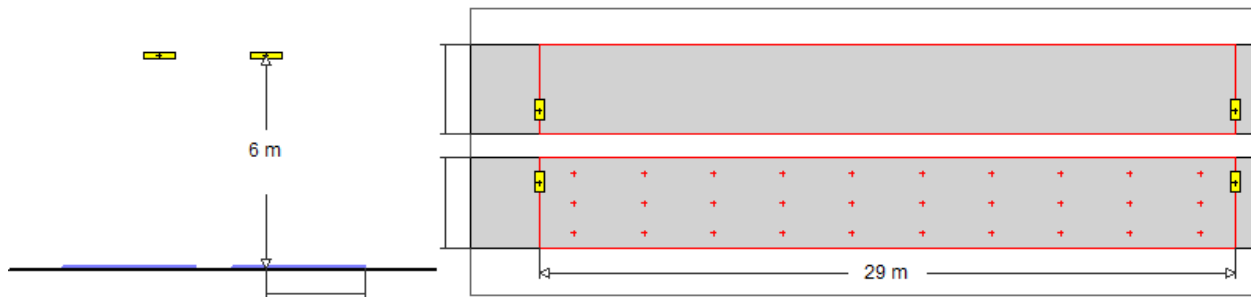
Illuminance


Calculation field: 39m x 7.5m (13 x 6 pts)

\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
16.6 lx	7.93 lx	0.48	0.22

Σχήμα 5.14. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 7 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.14 Διάταξη 7.B



1	OSRAM	Order No.	: 5XB43N1B408A/
	Luminaire name	: Streetlight 20 maxi LED ST1.3a	
	Equipment	: 2 x LED 3000K / CRI >= 80 45 W / 5150 lm	

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 29.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 6262 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

	Calculation field: 29m x 3.75m (10 x 3 pts)			
	\bar{E}_m	E_{min}	U_0	U_d
	33 lx	13.2 lx	0.40	0.17
C4	>= 10.0 lx		>= 0.40	

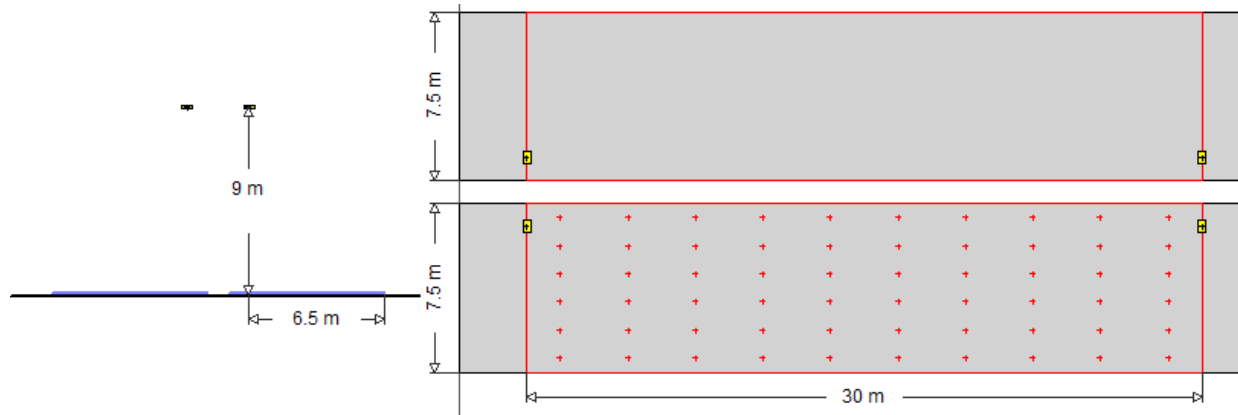



Σχήμα 5.15. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 7 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.15 Διάταξη 8.A

Το φωτιστικό 8 είναι της εταιρίας Philips και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι Philips Oceanroad LED (48.5 Watt). Στο παράρτημα Α.8 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

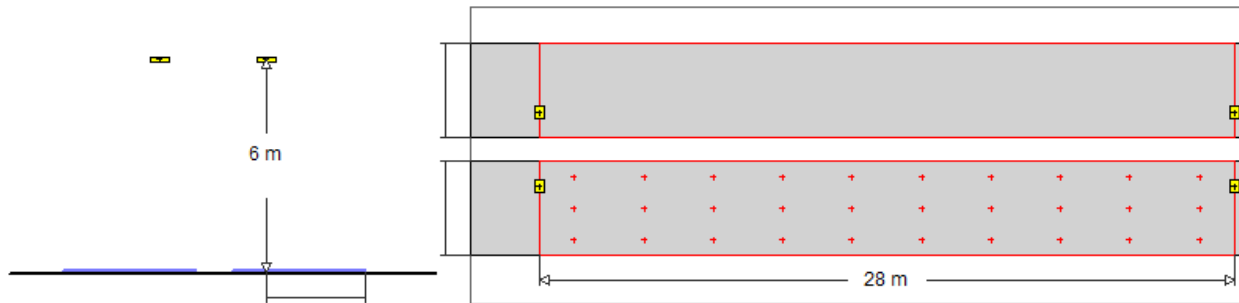
Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 30 m στο δρόμο κλάσης Μ3 και 28 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.17 και 5.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης Μ3 και C4 αντίστοιχα.




Philips Lighting					
1	Order No.	:			
	Luminaire name	:	BRP708 T25 1 xLED82-4S/740 DM10		
	Equipment	:	1 x LED82-4S/740 48.5 W / 8200 lm		
MyLumRow					
Luminaire placing	:	Central (two rows)	Maintenance factor		
Luminaire spacing	:	30.00 m	Height (phot. centre)		
Overhang	:	1.00 m	Tilt		
Abs. position	:	6.50 m	Glare index class		
Load/km	:	3233 W/km	Lum. intensity class		
			: 0.80		
			: 9.00 m		
			: 0.00 °		
			: D6		
			: G*3		
Road					
Width	:	7.50 m	Lanes		
Surface	:	R3, q0=0.07	Surface (wet)		
			: 2		
			: -none-, q0=1		
Luminance Calculation field: 30m x 7.5m (10 x 6 pts)					
Observer					
2	:	x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m			
1	:	x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m			
Lane	\bar{L}_m	U_o	U_l	T_l	Re_i
2:(y=5.63)	1.02 cd/m ²	0.50	0.96	9	1.02
1:(y=1.88)	1.10 cd/m ²	0.50	0.90	6	0.64
M3	>= 1.00 cd/m ²	>= 0.40	>= 0.60	<= 15	>= 0.30
Illuminance Calculation field: 30m x 7.5m (10 x 6 pts)					
	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d	
	15.5 lx	9.01 lx	0.58	0.33	

Σχήμα 5.16. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 8 στο δρόμο κλάσης Μ3 [26]

5.2.16 Διάταξη 8.B



1	Philips Lighting	
	Order No.	:
	Luminaire name	: BRP708 T25 1 xLED82-4S/740 DM10
	Equipment	: 1 x LED82-4S/740 48.5 W / 8200 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 28.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D6
Load/km	: 3464 W/km	Lum. intensity class	: G*3

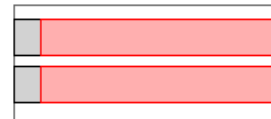
Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

Calculation field: 28m x 3.75m (10 x 3 pts)

	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	25 lx	9.83 lx	0.40	0.19
C4	≥ 10.0 lx		≥ 0.40	

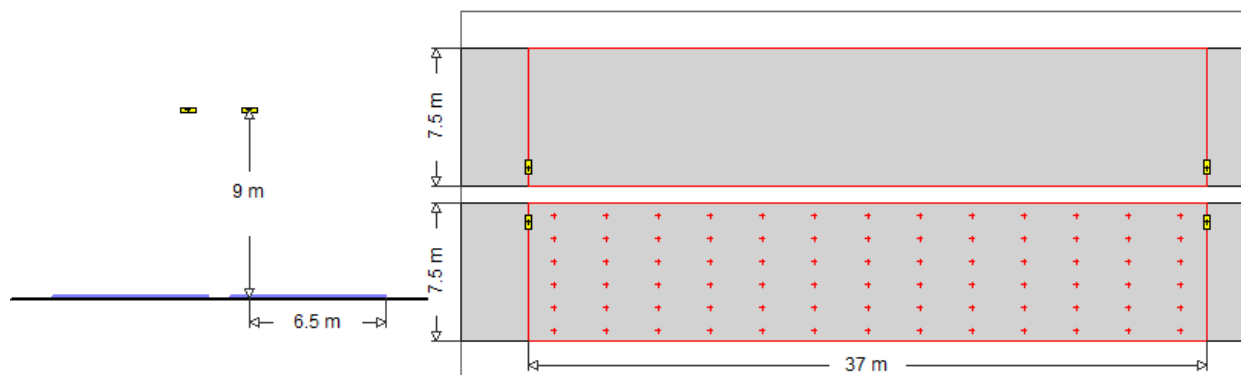



Σχήμα 5.17. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 8 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.2.17 Διάταξη 9.A

Το φωτιστικό 9 είναι της εταιρίας Philips και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι Philips Selenium LED (71 Watt). Στο παράρτημα Α.9 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 37 m στο δρόμο κλάσης Μ3 και 27 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.19 και 5.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης Μ3 και C4 αντίστοιχα.



Philips Lighting	
1	Order No. :
	Luminaire name : BGP340 1xLED92-3S/740 DM
	Equipment : 1 x LED92-3S/740 71 W / 9200 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 37.00 m	Height (phot. centre)	: 9.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 6.50 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 3838 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road

Width	: 7.50 m	Lanes	: 2
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Luminance

Calculation field: 37m x 7.5m (13 x 6 pts)

Observer

2	: x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m
1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m

Lane	\bar{E}_m	U_o	UI	TI	Rei
2:(y=5.63)	1.01 cd/m ²	0.50	0.69	11	1.12
1:(y=1.88)	1.08 cd/m ²	0.51	0.77	8	0.54
M3	>= 1.00 cd/m ²	>= 0.40	>= 0.60	<= 15	>= 0.30

Illuminance

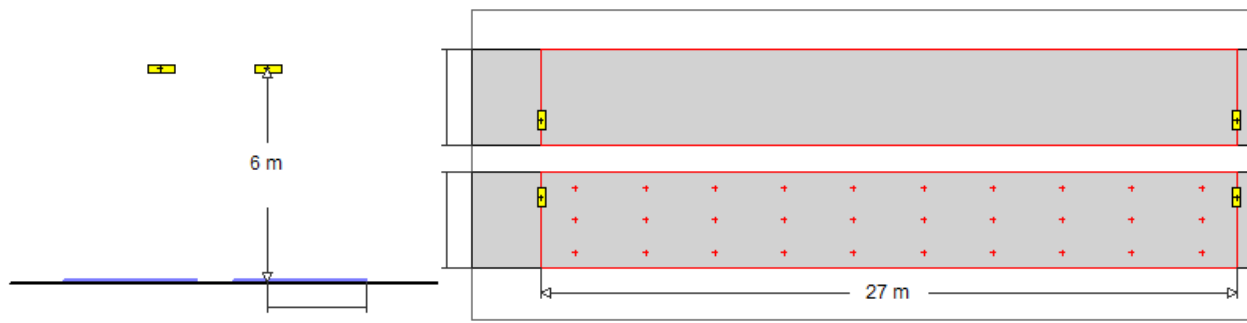
Calculation field: 37m x 7.5m (13 x 6 pts)


\bar{E}_m	E_{min}	U_o	Ud
16.0 lx	7.32 lx	0.46	0.17



Σχήμα 5.18. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 9 στο δρόμο κλάσης Μ3 [26]

5.2.18 Διάταξη 9.B



1	Philips Lighting	Order No.	:	
		Luminaire name	:	BGP340 1xLED92-3S/740 DM
		Equipment	:	1 x LED92-3S/740 71 W / 9200 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 27.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 5259 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

	Calculation field: 27m x 3.75m (10 x 3 pts)			
	\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d
	32 lx	13.0 lx	0.41	0.18
C4	≥ 10.0 lx		≥ 0.40	

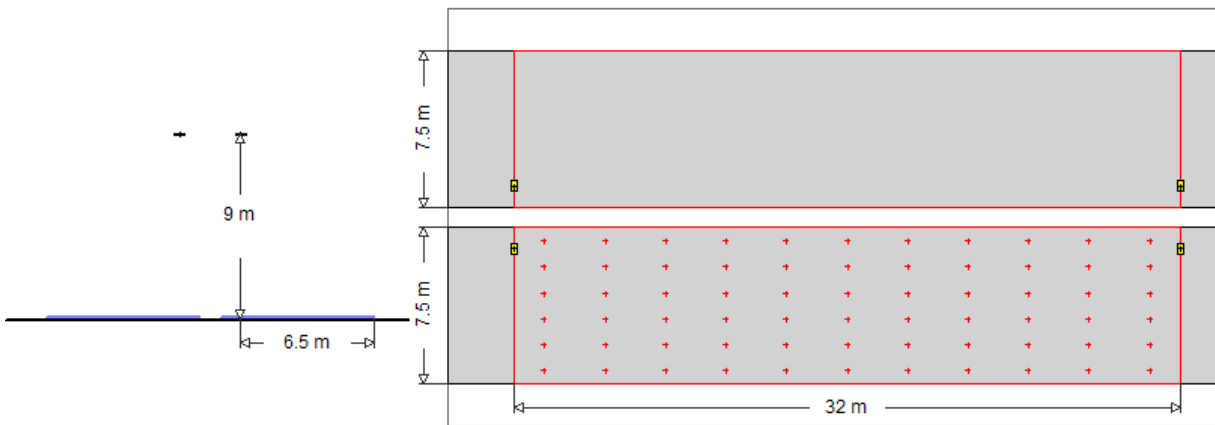


Σχήμα 5.19. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 9 στο δρόμο κλάσης C4 [2]

5.2.19 Διάταξη 10.A

Το φωτιστικό 10 είναι της εταιρίας Philips και η πλήρης εμπορική ονομασία του είναι Philips Unistreet (60 Watt). Στο παράρτημα Α.10 παρατίθεται ο πλήρης πίνακας με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

Με βάση τις απαιτήσεις που θέτει το πρότυπο EN 13201, υπολογίστηκε πως η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών είναι ίση με 32 m στο δρόμο κλάσης M3 και 27 m στο δρόμο κλάσης C4. Στα Σχήματα 5.21 και 5.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για δρόμους κλάσης M3 και C4 αντίστοιχα.



1	Philips Lighting	
	Order No.	:
	Luminaire name	: BGP202 T25 1 xLED80/740 DM
	Equipment	: 1 x LED80/740/- 60 W / 8000 lm

MyLumRow			
Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 32.00 m	Height (phot. centre)	: 9.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 6.50 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 3750 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road			
Width	: 7.50 m	Lanes	: 2
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1



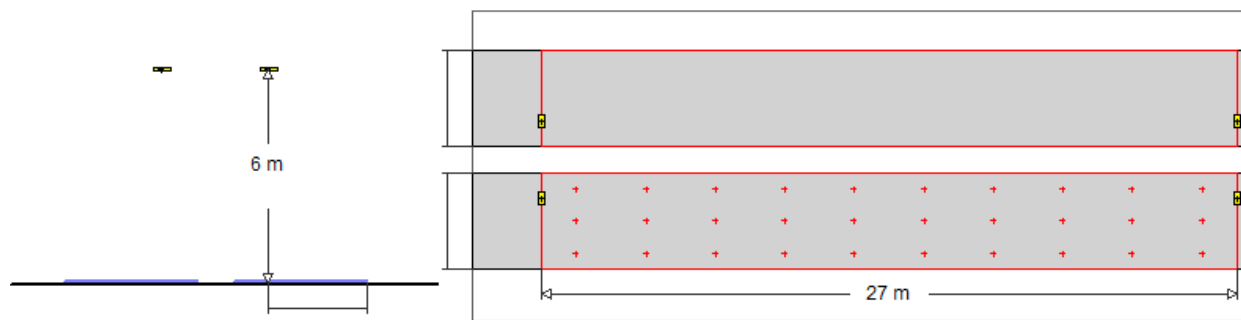
Luminance	Calculation field: 32m x 7.5m (11 x 6 pts)	
Observer		
2	: x=-60.00m, y=5.63m, z=1.50m	
1	: x=-60.00m, y=1.88m, z=1.50m	


Lane	\bar{L}_m	U_o	U_l	T_l	Re_i
2:(y=5.63)	1.00 cd/m ²	0.52	0.91	9	1.10
1:(y=1.88)	1.09 cd/m ²	0.53	0.89	7	0.60
M3	>= 1.00 cd/m ²	>= 0.40	>= 0.60	<= 15	>= 0.30

Illuminance	Calculation field: 32m x 7.5m (11 x 6 pts)			
\bar{E}_m	E_{min}	U_o	U_d	
15.3 lx	7.86 lx	0.51	0.23	

Σχήμα 5.20. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 10 στο δρόμο κλάσης M3 [26]

5.2.20 Διάταξη 10.B



1	Philips Lighting	
	Order No.	:
	Luminaire name	: BGP202 T25 1 xLED80/740 DM
	Equipment	: 1 x LED80/740/- 60 W / 8000 lm

MyLumRow

Luminaire placing	: Central (two rows)	Maintenance factor	: 0.80
Luminaire spacing	: 27.00 m	Height (phot. centre)	: 6.00 m
Overhang	: 1.00 m	Tilt	: 0.00 °
Abs. position	: 2.75 m	Glare index class	: D5
Load/km	: 4444 W/km	Lum. intensity class	: G*3

Road

Width	: 3.75 m	Lanes	: 1
Surface	: R3, q0=0.07	Surface (wet)	: -none-, q0=1

Illuminance

	Calculation field: 27m x 3.75m (10 x 3 pts)			
	\bar{E}_m	E_{min}	U_0	U_d
	27 lx	11.1 lx	0.41	0.19
C4	≥ 10.0 lx		≥ 0.40	



Σχήμα 5.21. Αποτελέσματα μετρήσεων φωτιστικού 10 στο δρόμο κλάσης C4 [26]

5.3 Δεδομένα και παράμετροι εφαρμογής της μεθόδου PROMETHEE II

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια με βάση τα οποία ο αλγόριθμος PROMETHEE II κατέταξε τα φωτιστικά που μελετήθηκαν, με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Visual Promethee (version 1.4.0.0 academic edition). Τα κριτήρια και τα αντίστοιχα βάρη τους επιλέχθηκαν σε συνεννόηση με τον επιβλέποντα καθηγητή και παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 και 5.2. Οι απαιτήσεις του προτύπου EN 13201 για κάθε κλάση οδοφωτισμού παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3 και 5.4.

Πίνακας 5.1. Κριτήρια και βάρη της μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης M3

Κριτήρια μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης M3	Βάρη μεθόδου Promethee II
Μέση λαμπρότητα οδοστρώματος L_m	0.1
Ομοιομορφία U_o	0.1
Ομοιομορφία U_i	0.1
TI	0.1
R_{ei}	0.1
Κατανάλωση ενέργειας (W/Km)	0.2
Κόστος αγοράς ($€/km$)	0.3

Πίνακας 5.2. Κριτήρια και βάρη PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης C4

Κριτήρια μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης C4	Βάρη μεθόδου Promethee II
Μέση ένταση φωτισμού E_m	0.26
Ομοιομορφία U_o	0.24
Κατανάλωση ενέργειας (W/Km)	0.2
Κόστος αγοράς ($€/km$)	0.3

Πίνακας 5.3. Απαιτήσεις προτύπου EN 13201 για κλάση οδοφωτισμού M3

Φωτομετρικά μεγέθη	Απαιτήσεις προτύπου EN13201
L_{av}	> 1 cd/m ²
U_o	> 0.40
U_i	> 0.60
TI	< 15
R_{ei}	> 0.30

Πίνακας 5.4. Απαιτήσεις προτύπου EN 13201 για κλάση οδοφωτισμού C4

Φωτομετρικά μεγέθη	Απαιτήσεις προτύπου EN13201
E_m	>15 lux
U_o	>0.4

5.4. Φωτομετρικά αποτελέσματα και χαρακτηριστικά φωτιστικών

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από τον αλγόριθμο PROMETHEE II. Σε αυτό το σημείο είναι κρίσιμο να γίνουν τρεις παρατηρήσεις. Πρώτον, στις μελέτες που έγιναν για το δρόμο κλάσης M3, σε συμμόρφωση με το πρότυπο

EN 13201, μετρήσεις έγιναν για δύο παρατηρητές. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες αποτελούν τους μέσους όρους των μεγεθών που μετρήθηκαν από αυτούς, με την προϋπόθεση ότι τα μετρούμενα μεγέθη καλύπτουν τις απαιτήσεις του προτύπου για καθέναν από τους δύο παρατηρητές. Δεύτερον, οι τιμές αγοράς των φωτιστικών ανακτήθηκαν από την επίσημη ιστοσελίδα της Disano για τα φωτιστικά της [27] και από online καταλόγους προϊόντων που έχουν εκδοθεί για χώρες της Ε.Ε. για τα φωτιστικά των OSRAM και Philips [28], [29]. Τέλος, η κεντρική διάταξη που έχει επιλεγεί στις μελέτες, υπαγορεύει την εγκατάσταση δύο φωτιστικών ανά ιστό, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του πλήθους φωτιστικών που θα εγκατασταθούν και του συνολικού κόστους εγκατάστασης.

Πίνακας 5.5. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 1 και φωτομετρικά αποτελέσματα

<i>Χαρακτηριστικά φωτιστικού 1</i>	
<i>Όνομασία φωτιστικού</i>	1681 Brera1 (325371)
<i>Εταιρία κατασκευής</i>	Disano
<i>Είδος φωτεινής πηγής</i>	LED
<i>Φωτεινή ροή (lumen)</i>	10860
<i>Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)</i>	109.1
<i>Τιμή φωτιστικού (€)</i>	1027
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
<i>Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών</i>	39
<i>Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου</i>	52
<i>L (cd/m²)</i>	1.04
<i>U_o</i>	0.64
<i>U_i</i>	0.65
<i>TI</i>	9.5
<i>R_{ei}</i>	0.90
<i>Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)</i>	5595
<i>Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)</i>	53404
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
<i>Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών</i>	29
<i>Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου</i>	70
<i>E_m (lux)</i>	26
<i>U_o</i>	0.41
<i>Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)</i>	7524
<i>Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)</i>	71890

Πίνακας 5.6. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 2 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 2

Όνομασία φωτιστικού	3275 Mini Stelvio (330475)
Εταιρία κατασκευής	Disano
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	8635
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	82.4
Τιμή φωτιστικού (€)	824
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	31
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	66
L (cd/m ²)	1.04
U_o	0.76
U_i	0.82
TI	8
R_{ei}	0.90
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	5316
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	54384
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	29
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	70
E_m (lux)	21
U_o	0.41
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	5683
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	57680

Πίνακας 5.7. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 3 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 3

Όνομασία φωτιστικού	3284 Rolle (330441)
Εταιρία κατασκευής	Disano
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	9321
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	84.7
Τιμή φωτιστικού (€)	647
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	33
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	62
L (cd/ m ²)	1.29
U_o	0.46
U_i	0.69
TI	7
R_{ei}	0.74
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	5133
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	40114
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	28
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	72
E_m (lux)	34
U_o	0.41
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	6050
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	46584

Πίνακας 5.8. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 4 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 4

Όνομασία φωτιστικού	3290 Sella 1 (330601)
Εταιρία κατασκευής	Disano
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	9401
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	84.9
Τιμή φωτιστικού (€)	696
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	33
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	62
L (cd/m ²)	1.28
U_o	0.50
U_i	0.72
TI	8
R_{ei}	0.85
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	5145
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	43152
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	28
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	72
E_m (lux)	33
U_o	0.41
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	6064
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	50112

Πίνακας 5.9. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 5 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 5

Όνομασία φωτιστικού	Streetlight 11 mini (5XC2G41C08HA)
Εταιρία κατασκευής	OSRAM
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	7000
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	65.3
Τιμή φωτιστικού (€)	916
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	27
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	76
L (cd/m ²)	1.09
U_o	0.49
U_i	0.75
TI	12.5
R_{ei}	0.87
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	4837
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	69616
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	30
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	68
E_m (lux)	21
U_o	0.40
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	4353
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	62288

Πίνακας 5.10. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 6 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 6

Όνομασία φωτιστικού	Streetlight 20 midi (5XB33K2C408A)
Εταιρία κατασκευής	OSRAM
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	10700
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	95.4
Τιμή φωτιστικού (€)	1080
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	39
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	52
L (cd/m ²)	1.12
U_o	0.52
U_i	0.66
TI	11
R_{ei}	0.80
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	4892
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	56160
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	29
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	70
E_m (lux)	34
U_o	0.40
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	6579
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	75600

Πίνακας 5.11. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 7 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 7

Όνομασία φωτιστικού	Streetlight 20 maxi (5XB43N1B408A)
Εταιρία κατασκευής	OSRAM
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	10300
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	90.8
Τιμή φωτιστικού (€)	1180
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	39
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	52
L (cd/m ²)	1.08
U_o	0.52
U_i	0.66
TI	11
R_{ei}	0.80
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	4656
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	61360
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	29
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	70
E_m (lux)	33
U_o	0.40
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	6262
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	82600

Πίνακας 5.12. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 8 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 8

Όνομασία φωτιστικού	Oceanroad LED (BRP708 T25 DM10 1xLED 82-4S/740)
Εταιρία κατασκευής	Philips
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	6642
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	48.5
Τιμή φωτιστικού (€)	1126
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	30
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	68
L (cd/m ²)	1.06
U_o	0.50
U_i	0.93
TI	7.5
R_{ei}	0.83
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	3233
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	76568
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	28
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	72
E_m (lux)	25
U_o	0.4
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	3464
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	81072

Πίνακας 5.13. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 9 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 9

Όνομασία φωτιστικού	Selenium LED (BGP340 DM 1xLED 92-3S/740)
Εταιρία κατασκευής	Philips
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	7912
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	71
Τιμή φωτιστικού (€)	1104
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	37
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	56
L (cd/m ²)	1.05
U_o	0.51
U_i	0.73
TI	9.5
R_{ei}	0.83
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	3838
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	61824
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	27
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	76
E_m (lux)	32
U_o	0.41
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	5259
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	83904

Πίνακας 5.14. Χαρακτηριστικά φωτιστικού 10 και φωτομετρικά αποτελέσματα

Χαρακτηριστικά φωτιστικού 10

Όνομασία φωτιστικού	Unistreet (BGP202 T25 DM 1xLED 80/740)
Εταιρία κατασκευής	Philips
Είδος φωτεινής πηγής	LED
Φωτεινή ροή (lumen)	6640
Κατανάλωση ενέργειας φωτιστικού (Watt)	60
Τιμή φωτιστικού (€)	1058
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης M3	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	32
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	64
L (cd/m ²)	1.05
U_o	0.53
U_i	0.90
TI	8
R_{ei}	0.85
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	3750
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	67712
Φωτομετρικά αποτελέσματα σε δρόμο κλάσης C4	
Μέγιστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών	27
Πλήθος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο δρόμου	76
E_m (lux)	27
U_o	0.41
Κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (W/km)	4444
Κόστος φωτιστικών ανά χιλιόμετρο (€/km)	80408

5.5 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Οι πίνακες 5.15 και 5.16 παρουσιάζουν τη συνολική, τη θετική και την αρνητική ροή υπεροχής των φωτιστικών που μελετήθηκαν για κλάσεις οδοφωτισμού M3 και C4 αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε κατά την ανάλυση της μεθόδου PROMETHEE II, η κατάταξη των φωτιστικών προκύπτει από την τιμή της συνολικής ροής υπεροχής, με τα φωτιστικά με τις μεγαλύτερες τιμές να αποτελούν τις επικρατέστερες δράσεις.

Πίνακας 5.15. Αποτελέσματα μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης M3 [30]

Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	Disano Rolle		0,2000	0,6000	0,4000
2	Disano Sella 1		0,2000	0,5778	0,3778
3	Phillips Unistreet		0,1333	0,5444	0,4111
4	Disano Mini Stelvio		0,1333	0,5444	0,4111
5	Phillips Oceanroad		0,0000	0,4889	0,4889
6	Phillips Selenium		-0,0778	0,4444	0,5222
7	Disano Brera 1		-0,0778	0,4444	0,5222
8	Osram 20 midi		-0,1222	0,4222	0,5444
8	Osram 20 maxi		-0,1222	0,4222	0,5444
10	Osram 11 mini		-0,2667	0,3667	0,6333

Πίνακας 5.16. Αποτελέσματα μεθόδου PROMETHEE II στο δρόμο κλάσης C4 [30]

Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	Disano Rolle		0,6600	0,7489	0,0889
2	Disano Sella 1		0,3889	0,6133	0,2244
3	Phillips Unistreet		0,0889	0,4778	0,3889
4	Disano Mini Stelvio		0,0200	0,4289	0,4089
5	Osram 20 midi		-0,0733	0,4089	0,4822
6	Phillips Selenium		-0,0978	0,3844	0,4822
7	Osram 11 mini		-0,1356	0,3778	0,5133
8	Disano Brera 1		-0,1467	0,3600	0,5067
9	Phillips Oceanroad		-0,2711	0,3244	0,5956
10	Osram 20 maxi		-0,4333	0,2289	0,6622

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα φωτιστικά που έρχονται στις πρώτες θέσεις και για τις δύο περιπτώσεις κλάσεων οδοφωτισμού είναι τα ίδια. Αυτό δεν προκαλεί μεγάλη έκπληξη, καθώς το κριτήριο με το μεγαλύτερο βάρος που χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή της μεθόδου είναι το κόστος αγοράς και τα συγκεκριμένα φωτιστικά υπερέχουν αισθητά έναντι των εναλλακτικών σε αυτή την κατηγορία.

- Για τον ίδιο λόγο, λόγω του συγκριτικά υψηλότερου κόστους, τα φωτιστικά Disano Brera 1 και OSRAM 20 maxi βρίσκονται σε πολύ χαμηλές θέσεις και στις δύο περιπτώσεις.
- Για τα υπόλοιπα φωτιστικά, στη μέση της κατάταξης, οι διαφορές είναι μικρότερες σε αυτό το κριτήριο. Ως αποτέλεσμα, η τελική τους κατάταξη υπαγορεύεται πολύ πιο έντονα και από τα αποτελέσματα των φωτομετρικών μελετών που έγιναν. Επιπροσθέτως, παρατηρείται σε κάποιες περιπτώσεις έντονη εξάρτηση από αυτά καθώς υπάρχουν φωτιστικά με αρκετά διαφορετικές κατατάξεις στις δύο κλάσεις οδοφωτισμού. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν το OSRAM Streetlight 11 mini και το Philips Oceanroad LED.
- Τέλος πρέπει να σχολιαστεί το γεγονός ότι η κατάταξη που έχει παρουσιαστεί προφανώς εξαρτάται από τα κριτήρια και βάρη που έχουν επιλεγεί. Όσον αφορά τα βάρη, διαφορετική επιλογή τους καταλήγει σε διαφορετική κατάταξη και ενδεχομένως να αξίζει να εκτελείται σε τέτοιες περιπτώσεις ανάλυση ευαισθησίας, που όμως για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εργασίας παραλείφθηκε.
- Επιπροσθέτως, τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί είναι είτε οικονομικής φύσεως (κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο, κόστος αγοράς ανά χιλιόμετρο), είτε τα φωτομετρικά μεγέθη οι απαιτήσεις από τα οποία πρέπει να καλυφθούν. Μπορούν όμως στη γενική περίπτωση να επιλεγούν περισσότερα κριτήρια που να καθορίζουν επιπλέον απαιτήσεις, ανάλογες με τις προδιαγραφές που θέτει ο μελετητής του έργου. Ένα παράδειγμα είναι ο δείκτης χρωματικής απόδοσης CRI των φωτιστικών προς μελέτη. Στην περίπτωση των φωτιστικών που μελετήθηκαν για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, τον καλύτερο CRI έχει το OSRAM 20 maxi, το οποίο έχει πολύ χαμηλή κατάταξη και στις δύο περιπτώσεις κλάσεων οδοφωτισμού. Γίνεται από τα παραπάνω αντιληπτή η αναγκαιότητα προσεκτικής επιλογής κριτηρίων και ανάθεσης των αντιστοιχών βαρών κατά την εφαρμογή πολυκριτηρίων συστημάτων απόφασης.
- Η κατάταξη των φωτιστικών, όπως αναφέρθηκε, εξαρτάται από τις τιμές των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων. Για παράδειγμα, εάν υποθεθεί μείωση του συντελεστή βαρύτητας της τιμής αγοράς των φωτιστικών, παρατηρείται μείωση της θετικής ροής υπεροχής των οικονομικότερων φωτιστικών καθώς και αύξηση της αρνητικής υπεροχής των ακριβότερων, σύμφωνα με τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου. Ως αποτέλεσμα, θα παρατηρηθούν μεταβολές στην τελική κατάταξη τους, με κάποια από τα πιο φθηνά φωτιστικά να καταλαμβάνουν χειρότερες θέσεις και κάποια από τα ακριβότερα να έχουν καλύτερη κατάταξη σε σχέση με την περίπτωση που εξετάστηκε. Οι μεταβολές αυτές εξαρτώνται αποκλειστικά από τη μεταβολή του αντίστοιχου βάρους.
- Παρόλα αυτά, από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η μέθοδος που έχει περιγραφεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικά σε κάθε περίπτωση, για οποιοδήποτε πλήθος και είδος κριτηρίων και για διαφορετικές τιμές συντελεστών βαρύτητας, ανάλογα με τις προτιμήσεις του εκάστοτε μελετητή και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

5.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η ανάγκη εγκατάστασης συστημάτων οδοφωτισμού, με σκοπό τη σωστή λειτουργία και ασφάλεια του οδικού δικτύου. Η ανάγκη αυτή, καθώς και η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας οδήγησαν στην ανάπτυξη του προτύπου EN 13201 και της αντίστοιχης Τεχνικής Οδηγίας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, τα οποία καθορίζουν τον τρόπο εκτέλεσης και τις απαιτήσεις τόσο από νέες εγκαταστάσεις οδοφωτισμού όσο και από αναβαθμίσεις εγκαταστάσεων που υπάρχουν ήδη.

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτή την εργασία είναι η δυνατότητα αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση στον οδοφωτισμό της τεχνολογίας φωτισμού στερεής κατάστασης και συγκεκριμένα των φωτοεκπέμπουσων διόδων (LED). Τα LED έχουν αρχίσει να αντικαθιστούν τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης σε εφαρμογές οδοφωτισμού, κυρίως λόγω της ανώτερης απόδοσής τους και της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής. Τα πλεονεκτήματα προς εκμετάλλευση δεν περιορίζονται όμως στα παραπάνω. Επιπροσθέτως, η δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινής ροής των LED μαζί με την ανάπτυξη τεχνολογιών επικοινωνίας και τηλεματικής δημιουργούν πρόσφορο έδαφος για εφαρμογή προγραμμάτων προσαρμοστικού φωτισμού, μέσω συστημάτων κεντρικής διαχείρισης μιας εγκατάστασης, με τα οφέλη τόσο από οικονομικής όσο και από περιβαλλοντικής άποψης να ιδιαίτερα σημαντικά.

Τέλος, προβάλλεται η αξία χρήσης πολυκριτήριων συστημάτων για εύρεση λύσης σε προβλήματα απόφασης που σχετίζονται με τον οδοφωτισμό. Συγκεκριμένα, αφού πραγματοποιήθηκαν φωτομετρικές μελέτες για δύο κλάσεις οδοφωτισμού, όπως ορίζει το πρότυπο EN 13201, για ένα σύνολο 10 φωτιστικών σωμάτων, χρησιμοποιήθηκε η πολυκριτήρια μέθοδος PROMETHEE II με σκοπό την κατάταξή τους από το καλύτερο στο χειρότερο για καθεμία από τις δύο κλάσεις.

Με την προσεκτική επιλογή κριτηρίων και βαρών, δόθηκε ποσοτική απάντηση στο ζήτημα της κατάταξης των φωτιστικών. Έτσι, αναδεικνύεται η προοπτική χρήσης πολυκριτήριων συστημάτων αποφάσεων ως ένα εργαλείο στα χέρια του Μηχανικού που δύναται να δώσει λύση σε προβλήματα αποφάσεων που σχετίζονται με τον οδοφωτισμό.

Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

- [1]: <https://sciencestruck.com/wavelength-of-visible-light-spectrum>
- [2]: Φ.Β. Τοπαλής, Λ. Οικονόμου, Σ. Κουρτέση, Φωτοτεχνία, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- [3]: CIE 191-2010. Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance
- [4]: DiLaura, D. L., Houser, K. W., Mistrick, R. G., & Steffy, G. R. (2011). The lighting handbook: Reference and application (pp. 1328-p). New York: Illuminating Engineering Society of North America.
- [5]: <https://www.lrc.rpi.edu/programs/Transportation/pdf/glareCalculation.pdf>

Κεφάλαιο 2

- [6]: Rossi, F., Bonamente, E., Nicolini, A., Anderini, E., & Cotana, F. (2016). A carbon footprint and energy consumption assessment methodology for UHI-affected lighting systems in built areas. *Energy and Buildings*, 114, 96-103.
- [7]: CIE 093-1992. Road lighting as an accident countermeasure
- [8]: http://en.licht.de/en/service/publications-and-downloads/lichtwissen-series-of-publications/1409_Roads-Paths-Squares_web.pdf
- [9]: <https://www.darksky.org/light-pollution/>
- [10]: http://en.licht.de/en/service/publications-and-downloads/lichtwissen-series-of-publications/1807_LEDs-Basics-Applications-Effects_web.pdf
- [11]: IESNA LM-80-2008. Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources
- [12]: IESNA TM-21-2011. Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources
- [13]: Grela, J., Ozadowicz, A., (2015). The Street Lighting Control System Application and Case Study.

Κεφάλαιο 3

- [14]: EN 13201-1, "Road Lighting-Part 1: Selection of Lighting Classes", European Committee for Standardization CEN, 2014.
- [15]: EN 13201-2, "Road Lighting-Part 2: Performance Requirements", European Committee for Standardization CEN, 2014.
- [16]: EN 13201-3, "Road Lighting-Part 3: Calculation of Performance", European Committee for Standardization CEN, 2014.
- [17]: EN 13201-4, "Road Lighting-Part 4: Methods of Measuring Lighting Performance", European Committee for Standardization CEN, 2014.
- [18]: EN 13201-5, "Road Lighting-Part 5: Energy Efficiency Requirements", European Committee for Standardization CEN, 2014.

[19]: Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Οδηγίες Σχεδιασμού και Ελέγχου Εγκαταστάσεων Οδοφωτισμού, Κείμενο διαβούλευσης, 2017

[20]: CIE 97:2005, Guide on the maintenance of indoor electric lighting systems, 2nd Edition, CIE, 2005.

Κεφάλαιο 4

[21]: Μ. Δούμπος και Κ. Ζοπουνίδης, Πολυκριτήριες Τεχνικές Ταξινόμησης: Θεωρία και Εφαρμογές, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2001.

[22]: Peter G.W. Keen και M.S.S. Morton, Decision support systems: an organizational perspective, Addison-Wesley Pub. Co, 1978.

[23]: B. Roy, Méthodologie multicritère d'aide à la décision, Paris: Economica, 1985.

[24]: Ι. Σίσκος, Μοντέλα Αποφάσεων, Αθήνα: Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2008.

[25]: P. Vincke, Multicriteria decision-aid, New York: Wiley, 1992.

Κεφάλαιο 5

[26]: Relux, version 2019.1.0.0

[27]: <http://www.disano.it/>

[28]: https://www.siteco.com/fileadmin/downloads/price_lists/Siteco_%C3%96sterreich_Preisliste_2018.pdf

[29]: <http://www.lighting.philips.com/main/home>

[30]: Visual PROMETHEE, version 1.4.0.0 academic edition

Παράρτημα Α: Datasheets των υπό μελέτη φωτιστικών

Στο Παράρτημα Α παρατίθενται τα datasheets και τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και τα οποία προέρχονται από τη χρήση του λογισμικού Relux.

A.1. Φωτιστικό Disano 1681 Brera 1 (κωδικός 325371)

Manufacturer: disano



325371-00 Disano - LED SOLUTIONS - Road lighting - Pole Top Disano 1681 48 LED CLD CELL graphite

Housing: in die-cast aluminium. Closing hooks are made of die-cast aluminium with retractable safety screws and AISI 304 stainless steel springs.

Optics: in PMMA, highly resistant to temperature and UV radiation

Diffusers: in tempered glass, 5 mm thick, resistant to thermal and mechanical shock (UNI EN 12150-1/2001).

Equipment: automatic temperature control device. In the event of an unexpected temperature rise caused by particular weather conditions or LED malfunctioning, the system will reduce the drive current as the LED gets warmer, reducing the lamp's operating temperature and guaranteeing proper operation.

Supplied with a safety diode to protect against peak loads.

Ta-30+40°C life 80.000h 80% L80B20

Photobiological safety class: exempt group

At request it can be equipped with several dimming systems installed on the fixture:

- Bi-power dimming with virtual midnight option.

- Power line carrier (PLC) remote control.

- 1-10V dimmable driver with external control.

Regulations: Produced according to applicable EN60598-1 CEI 34-21 standards, degree of protection according to EN 60529 standards.

Wind surface: L:850cm² F:1540cm².

Luminaire data

Absolute Photometry

Luminaire efficacy : 99.54 lm/W

Classification : A30 ↓ 100.0% ↑ 0.0%

CIE Flux Codes : 31 72 98 100 100

Glare : G*3 / D5

Control gear : CELL

Power : 109.1 W

Luminous flux : 10860 lm

Dimensions : 795 mm x 379 mm x 272 mm

Equipped with

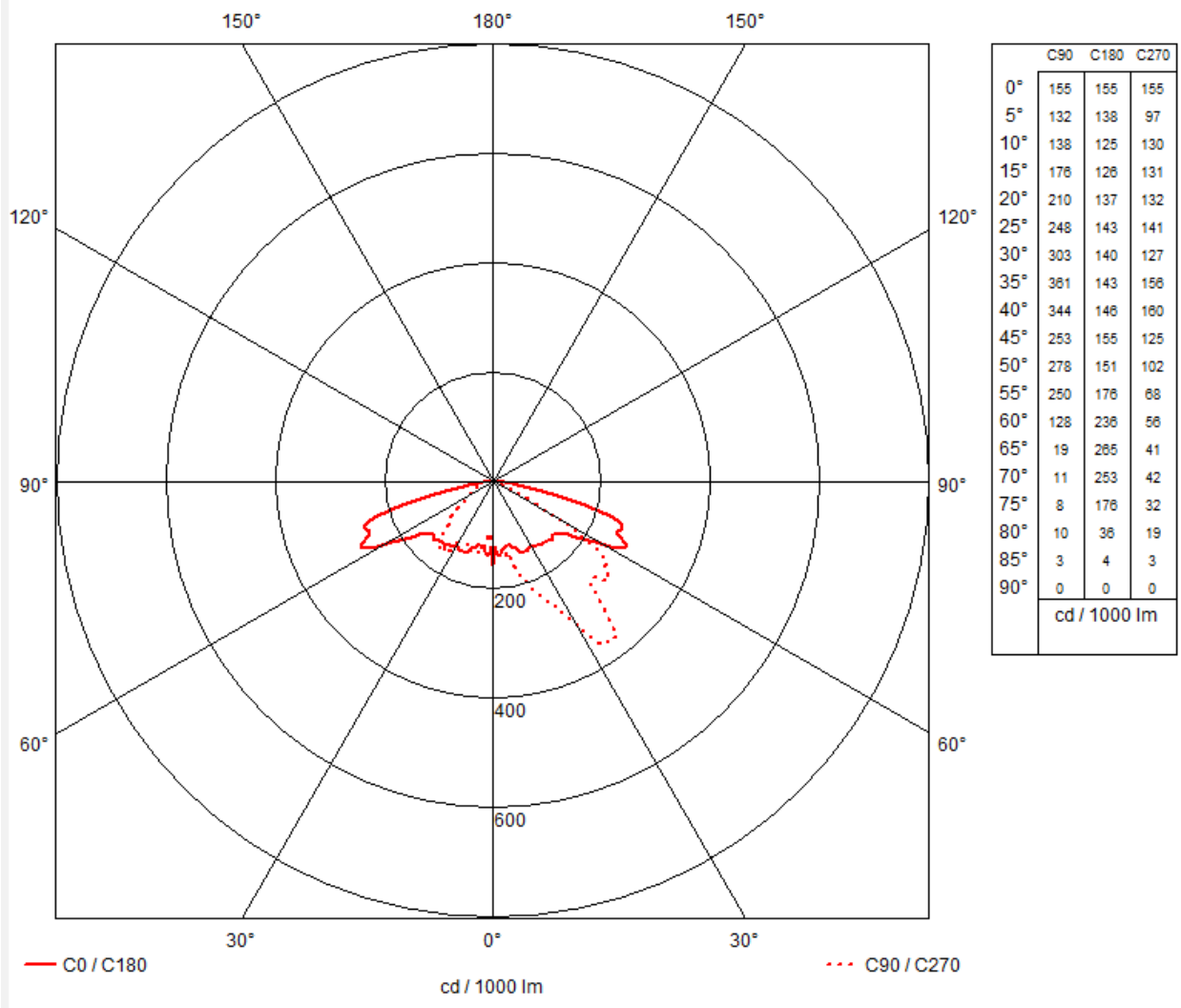
Quantity : 1

Designation : LTx48_700_81

Colour : 4000K

Colour reproduction : 70





A.2. Φωτιστικό Disano 3275 Mini Stelvio (κωδικός 330475)

Manufacturer: disano



330475-00 Disano - LED SOLUTIONS - Road lighting - Pole Top Disano 3275 48 led - 530mA
CLD CELL anthracite

Housing and cover: in die-cast aluminium and designed with a very small surface exposed to wind. Cooling fins are integrated into the cover.

Pole connection: in die-cast aluminium and with gaskets to secure the frame according to different inclinations. Adjustable ranges: between 0° and 15° for side mount; and between 0° and 10° for mast-top mounting. Inclination pace: 5°. Suited for poles with a diameter 63-60mm

Diffuser: clear, tempered glass, 4 mm thick, resistant to thermal shock and impacts (UNI-EN 12150-1 : 2001)

Coating: the standard powder coating consists of a first metal surface pre-treatment stage and of single layer of UV-stabilised, corrosion and salt resistant polyester powder coating.

Standard supply: Automatic temperature control inside the device with automatic resetting. Electronic safety device to protect the LED module and the related ballast compliant with EN 61547.

It works in two modes:

- differential mode: surge between power cables and between the phase and neutral.
- common mode: surge between power, L/N and ground cables or between the fixture's body if it is of class II and installed on a metal pole.

Upon request: for Class II fixtures, protection up to 10KV.

Equipment: complete with IP67 airtight connector for mains connection. Supplied with double insulation switch that cuts off electricity when the cover is opened.

Energy-saving: the possibility to choose the correct drive current for LEDs will allow you to have the right power under specific design conditions, and also help you deal with maintenance and retrofitting problems. Using a lower current will improve the efficiency of fixtures and therefore increase energy savings, whilst a higher current will result in a higher light flux so that you can reduce the number of fixtures.

Optics: in PMMA, highly resistant to temperature and UV radiation.

Ta-30+40°C life 80%: 80.000h (L80B10).

Power factor >0.9

Regulations: Produced according to applicable EN60598-1 CEI 34-21 standards, degree of protection according to EN 60529 standards.

Upon request:

- with power supply 1-10 V dimmable with subcode 12.
- with power supply DIG dimmable with subcode 0041.
- with virtual midnight subcode 30.
- power line carrier remote control systems subcode 0078.
- Coating compliant with UNI EN ISO 9227 Corrosion tests in artificial atmospheres for aggressive environments.

Wind surface: L:139cm² F:400cm².

Luminaire data

Absolute Photometry

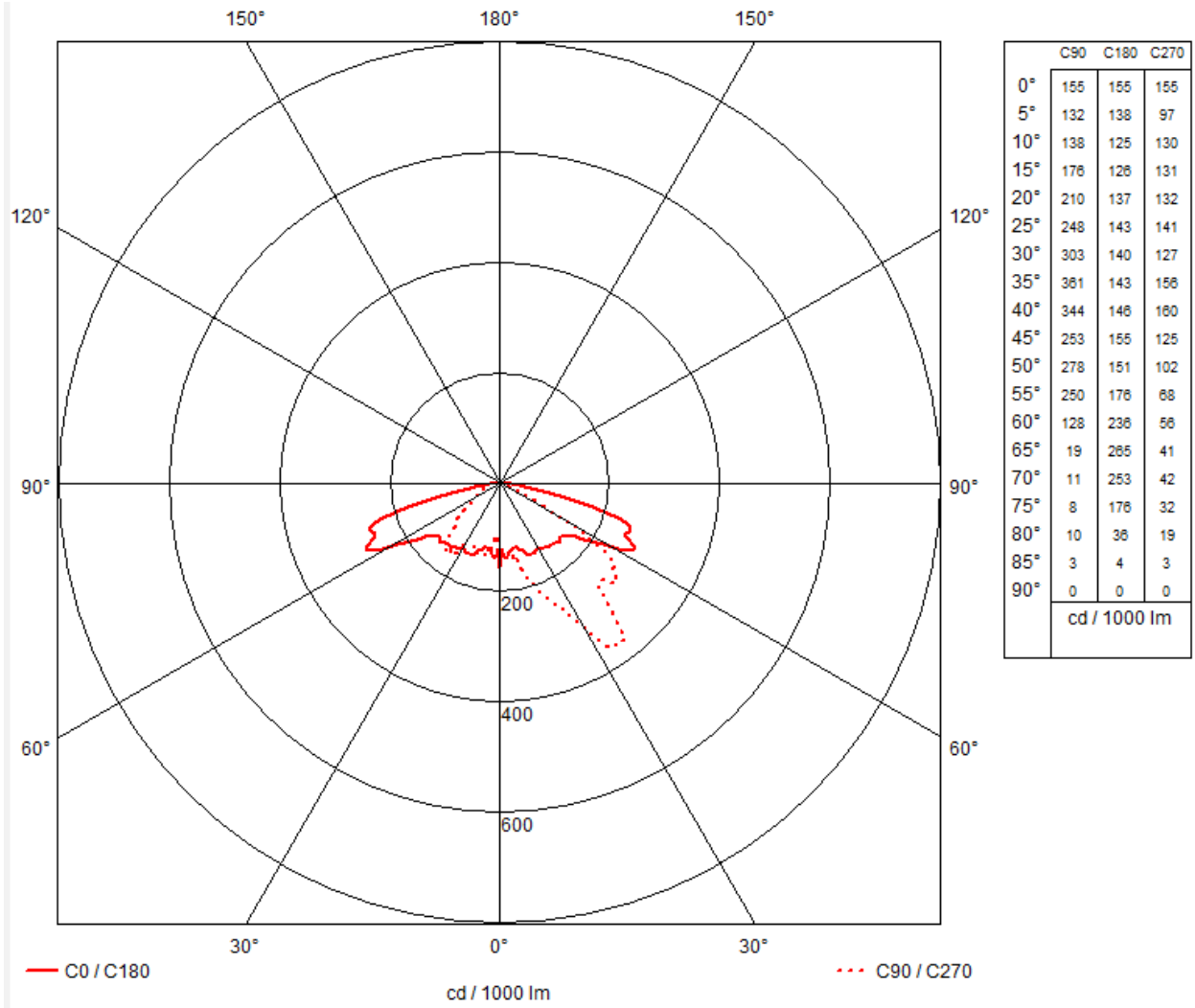
Luminaire efficacy : 104.79 lm/W
Classification : A30 ↓100.0% ↑0.0%
CIE Flux Codes : 31 72 98 100 100
Glare : G*3 / D5
Control gear : CELL
Power : 82.4 W
Luminous flux : 8635 lm

Equipped with

Quantity : 1
Designation : LTx48_530_75
Colour : 4000K
Colour reproduction : 70

Dimensions : 530 mm x 280 mm x 156 mm





A.3. Φωτιστικό Disano 3284 Rolle (Κωδικός 330441)

Manufacturer: disano



330441-00 Disano - LED SOLUTIONS - Road lighting - Pole Top Disano 3284 10 LED - T5 -700mA CLD CELL grey

Housing and cover: in die-cast aluminium and designed with a very small surface exposed to wind. Cooling fins are integrated into the cover.

Optics: in PMMA, highly resistant to temperature and UV radiation

Pole connection: in die-cast aluminium and with gaskets to secure the frame according to different inclinations. Adjustable ranges: between 0° and 15° for side mount; and between 0° and 10° for mast-top mounting. Inclination pace: 5°. Suited for poles with a diameter of 46-76mm.

Diffuser: clear, tempered glass, 4 mm thick, resistant to thermal shock and impacts (UNI-EN 12150-1 : 2001)

Coating: the standard powder coating consists of a first metal surface pre-treatment stage and of single layer of UV-stabilised, corrosion and salt resistant polyester powder coating.

Standard supply: automatic temperature control device. In the event of an unexpected LED temperature rise caused by particular weather conditions or a LED failure, the system will reduce the luminous flux to lower the working temperature and guarantee proper operation. Safety diode to protect against voltage peaks.

Equipment: complete with IP67 airtight connector for mains connection.

Heat sink: the heat dissipation system is specially designed and made to allow the operation of the LED lights with temperatures below 50° (T_j = 25°), thus guaranteeing excellent performance/efficiency and durability.

LED: Latest generation LED technology, Ta -30 + 40°C life 80.000h to 80% L80B10

Photobiological safety class: exempt group EN62471.

Power factor >0.9

Regulations: Produced according to applicable EN60598-1 CEI 34-21 standards, degree of protection according to EN 60529 standards.

Upon request:

- with power supply 1-10 V dimmable with subcode 12.
- with power supply DIG dimmable with subcode 0041.
- with virtual midnight subcode 30.
- power line carrier remote control systems subcode 0078.

Wind surface: L:548cm² S:1431cm².

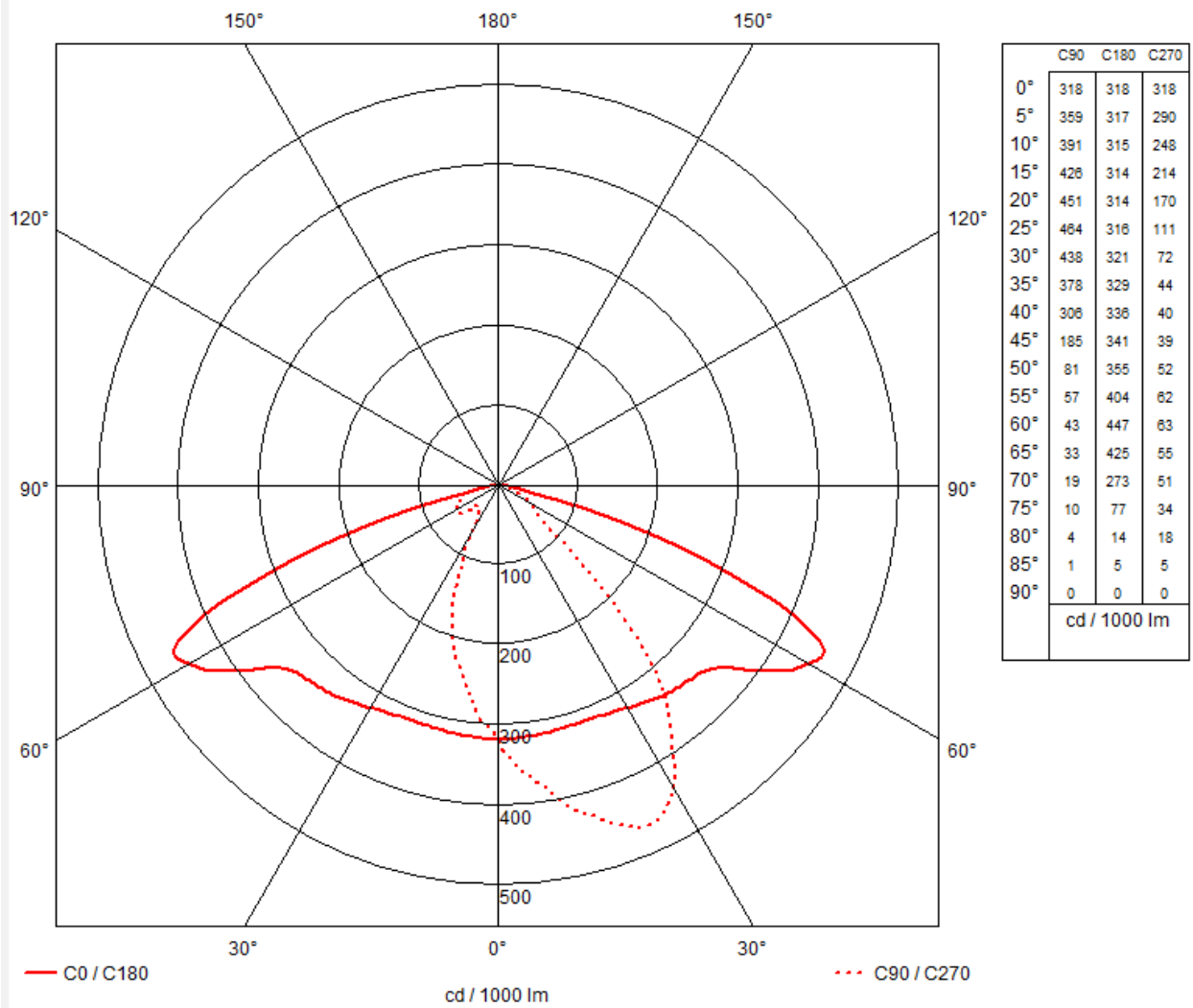
Contact the Consulting and design Centre for any lighting information.

Luminaire data

Absolute Photometry	
Luminaire efficacy	: 110.05 lm/W
Classification	: A30 ↓100.0% ↑0.0%
CIE Flux Codes	: 46 79 99 100 100
Glare	: G*6 / D5
Control gear	: CELL
Power	: 84.7 W
Luminous flux	: 9320.9 lm
Dimensions	: 460 mm x 300 mm x 125 mm

Equipped with

Quantity	: 1
Designation	: LMu10_700_84
Colour	: 4000K
Colour reproduction	: 70



A.4. Φωτιστικό Disano 3290 Sella 1 (κωδικός 330601)

Manufacturer: disano



330601-00 Disano - LED SOLUTIONS - Road lighting - Pole Top Disano 3290 16 LED 78w CLD CELL graphite

Housing and cover: in die-cast aluminium and designed with a very small surface exposed to wind. Cooling fins are integrated into the cover.

Optics: in aluminium coated with very high purity (99.99%) silver using physical vapour deposition (PVD).

Pole connection: in die-cast aluminium and with gaskets to secure the frame according to different inclinations. Adjustable ranges: between 0° and 20° for side mount; and between 0° and 20° for mast-top mounting. Inclination pace: 5°. Suited for poles with a diameter 46-76.

Diffuser: extra-clear, tempered glass, 4 mm thick, resistant to thermal shock and impacts (UNI-EN12150-1: 2001).

Coating: Coating: the standard powder coating consists of a first metal surface pre-treatment stage and of single layer of UV-stabilised, corrosion and salt resistant polyester powder coating.

The SELLA luminaire is declared to have passed the 2000 hours of salt corrosion resistance test in accordance with ASTM B 117 standard and the 2000 hours of UV condensation test in accordance with the ASTM G 154 standard.

Standard supply: double insulation switch that cuts off electricity when the cover is opened. Electronic safety device to protect the LED module and the related ballast compliant with EN 61547. External connector for quick installation.

It works in two modes:

- differential mode: surge between power cables and between the phase and neutral.
- common mode: surge between power, L/N and ground cables or between the fixture's body if it is of class II and installed on a metal pole.

Upon request: protection up to 10KV. Coating compliant with UNI EN ISO 9227 Corrosion tests in artificial atmospheres for aggressive environments.

Available upon request:

- 1-10V dimmer: 10%-100% dimming with 1-10V device, to be ordered with subcode -12.
- Virtual midnight: stand-alone device with automatic flux reduction, to be ordered with subcode -30.
- Power line carrier: point-to-point diagnosis and control management system, to be ordered with subcode -0078.
- Wi-Fi remote control (to be agreed upon): point-to-point control and diagnosis system of the entire system with Wi-Fi technology.

Wind surface: 1750cm².

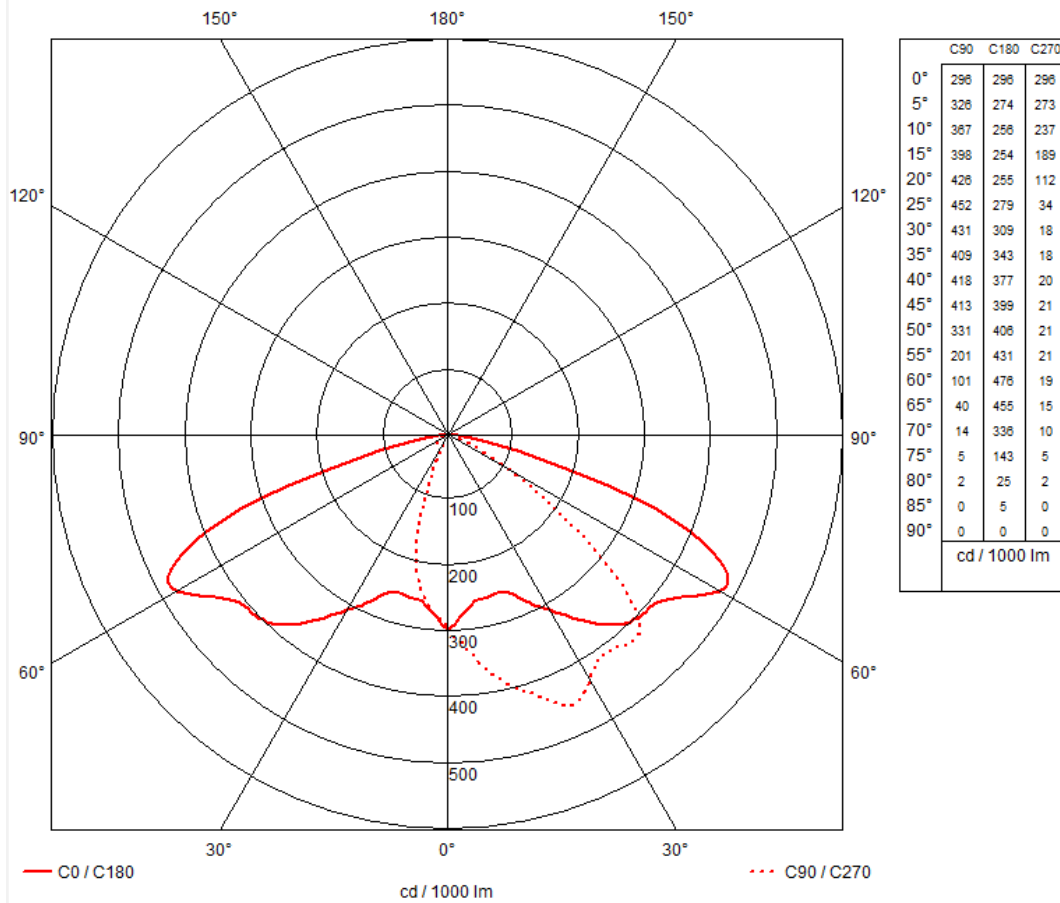
The products of the Sella family are compliant with all applicable tests (third-party certification) pursuant to standard ANSI C136.31: Street Lighting – Luminaire Vibration.

Luminaire data
Absolute Photometry
 Luminaire efficacy : 110.73 lm/W
 Classification : A30 ↓ 100.0% ↑ 0.0%
 CIE Flux Codes : 40 77 98 100 100
 Glare : G*4 / D4
 Control gear : CELL
 Power : 84.9 W
 Luminous flux : 9401 lm

Equipped with
 Quantity : 1
 Designation :

 Colour : 4000K
 Colour reproduction: 70

Dimensions : 603 mm × 300 mm × 180 mm



A.5. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 11 mini (κωδικός 5XC2G41C08HA)

Manufacturer: OSRAM

OSRAM

5XC2G41C08HA mast luminaire-pylon top Streetlight 11 mini LED | ST1.2P1.0

Streetlight 11 mini LED, mast luminaire, primary light control with 3 zone faceted reflector, of plastic, silver coated, highly specular, primary optical cover: cover, of PMMA, transparent, light distribution: ST1.2P1.0, light emission: direct distribution, primary light characteristic: asymmetric, installation type: post-top, side-entry, LED, LED High Power, luminous flux: 7.000 lm, luminous efficacy: 107lm/W, light colour: 740, colour temperature: 4000K, control gear: ECG Premium, control: optimised constant luminous flux control (CLO 2.0), flexible luminous flux parameterisation, time-dependent luminous flux control, power reduction, Street Light Control, overheat protection, electronic power reduction, with cable H07RN-F 3x 1.5mm², mains connection: 220..240V, AC, 50/60Hz, connection cable pre-assembled, cable length: 8,5 m, start of lifetime: 65 W, end of lifetime: 74 W, reduction: 31 W, luminaire housing, of diecast aluminium, powder-coated, Siteco® metallic grey (DB 702S), length: 736 mm, width: 174 mm, height: 116mm, spigot size: 60/76mm (post-top) and 42/60mm (side-entry), mast flange for spigot size: 42mm: 5XC10008XM4, 60mm: 5XC10008XM2, 76mm: 5XC10008XM1, luminaire controller, protection rating (complete): IP66, insulation class (complete): insulation class II (safety insulation), certification: CE, ENEC in preparation, permissible ambient temperature for outdoor applications: -25..+50°C, standard-compliant lighting for roads and squares, packaging unit: 1 piece

Light Distribution: ST1.2P1.0

factory setting: luminousflux part=100% (dimming level=254)

Luminaire data

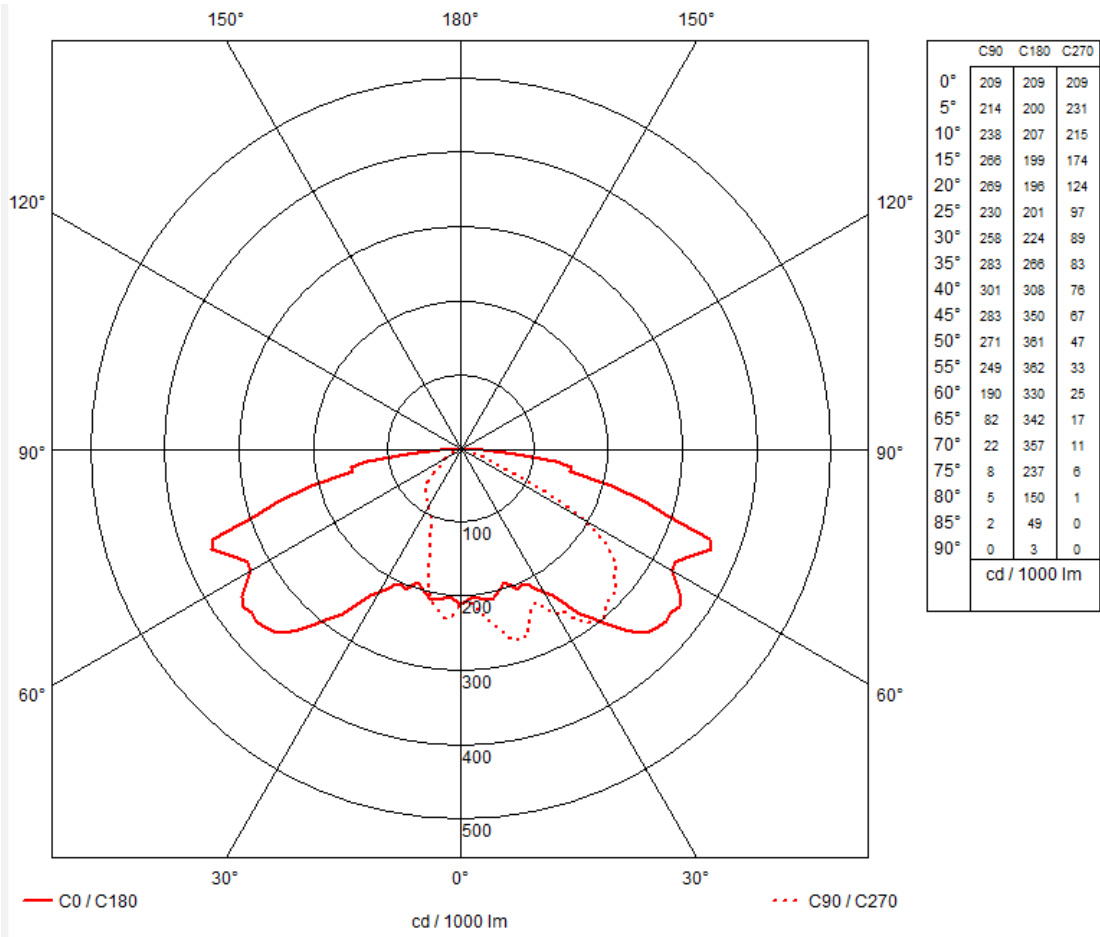
Luminaire efficiency : 100%
Luminaire efficacy : 107.2 lm/W
Classification : A30 ↓ 100.0% ↑ 0.0%
CIE Flux Codes : 31 68 95 100 100
Glare : G*1 / D1
Control gear : ECG Premium
Power : 65.3 W
Luminous flux : 7000 lm

Equipped with

Quantity : 1
Designation : LED 4000K /
CRI >= 70
Power : 65 W
Colour : 4000K
Luminous flux : 7000 lm
Colour reproduction: 73

Dimensions : 735 mm x 174 mm x 115 mm





A.6. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 20 midi (κωδικός 5XB33K2C408A)

Manufacturer: OSRAM

OSRAM

5XB33K2C408A mast luminaire-pylon top Streetlight 20 midi LED | ST1.3a

Streetlight 20 midi LED, mast luminaire, primary light control with lens, of PMMA, primary optical cover: cover, of toughened safety glass, transparent, light distribution: ST1.3a, light emission: direct distribution, primary light characteristic: asymmetric, installation type: side-entry, post-top, LED, LED High Power, luminous flux: 10.700 lm, luminous efficacy: 112lm/W, light colour: 740, colour temperature: 4000K, control gear: ECG Premium, control: power reduction, constant luminous flux control, overheat protection, Street Light Control, time-dependent luminous flux control, flexible luminous flux parameterisation, electronic power reduction, mains connection: 220..240V, AC, 50/60Hz, start of lifetime: 95 W, end of lifetime: 110 W, reduction: 46 W, luminaire housing, of diecast aluminium, powder-coated, Siteco® metallic grey (DB 702S), length: 535 mm, width: 230 mm, height: 120mm, spigot size: 42/60/76mm (post-top) and 42/60mm (side-entry), mast flange for spigot size: 42mm: 5XA59000XM4, 60mm: 5XA59000XM2, 76mm: 5XA59000XM1, protection rating (complete): IP66, insulation class (complete): insulation class II (safety insulation), certification: CE, ENEC, VDE, impact resistance: IK09, permissible ambient temperature for outdoor applications: -35..+50°C, standard-compliant lighting for roads and squares, packaging unit: 1 piece

Light Distribution: ST1.3a

factory setting: luminousflux part=100% (dimming level=254)

Luminaire data

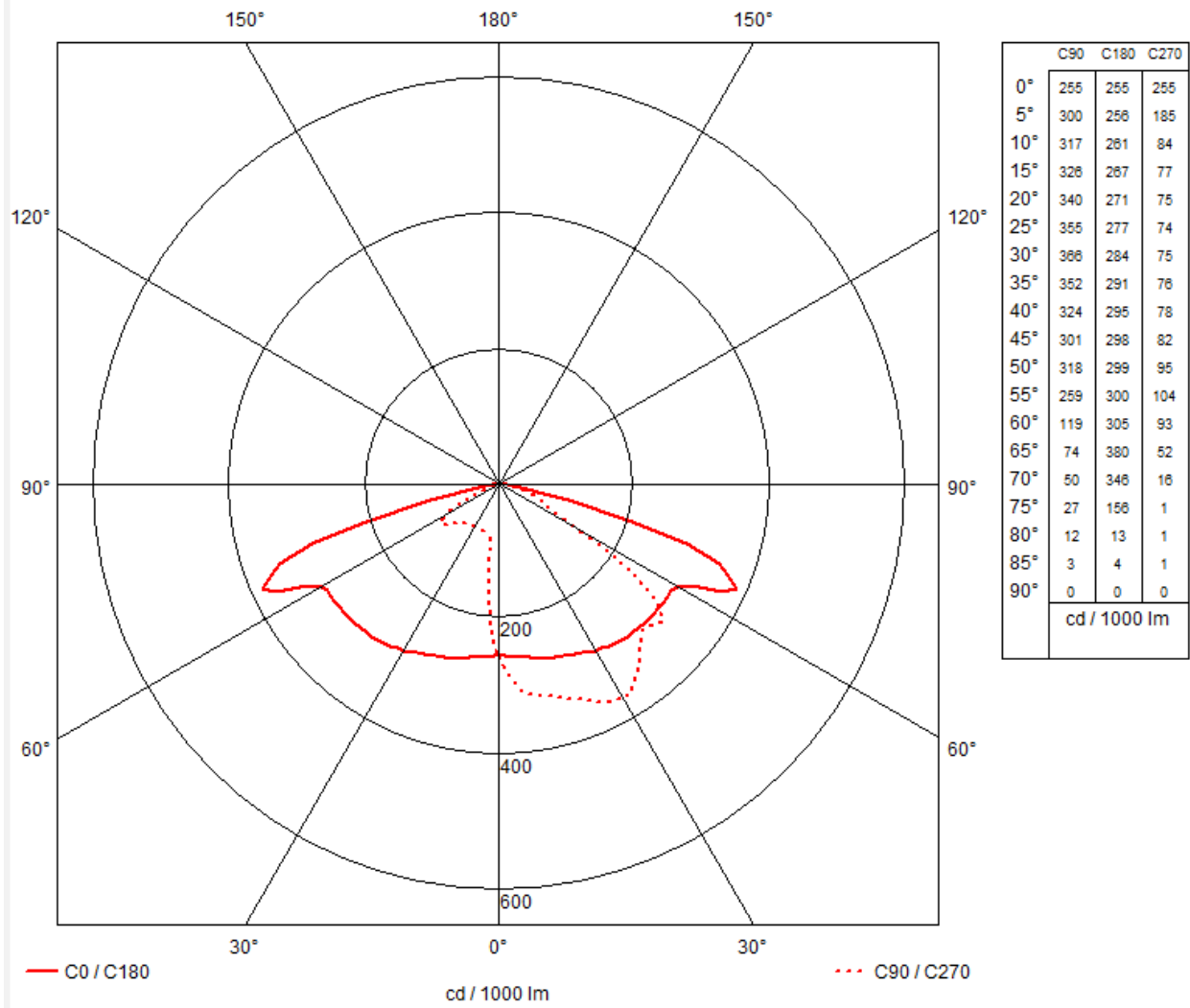
Luminaire efficiency : 100%
Luminaire efficacy : 112.16 lm/W
Classification : A30 ↓ 100.0% ↑ 0.0%
CIE Flux Codes : 36 72 98 100 100
Glare : G*3 / D4
Control gear : ECG DALI
Power : 95.4 W
Luminous flux : 10700 lm

Equipped with

Quantity : 2
Designation : LED 4000K /
CRI >= 70
Power : 47 W
Colour : 4000K
Luminous flux : 5350 lm
Colour reproduction: 70

Dimensions : 599 mm × 324 mm × 138 mm





A.7. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 20 maxi (κωδικός 5XB43N1B408A)

Manufacturer: OSRAM

OSRAM

5XB43N1B408A mast luminaire-pylon top Streetlight 20 maxi LED | ST1.3a

Streetlight 20 maxi LED, mast luminaire, primary light control with lens, of PMMA, primary optical cover: cover, of toughened safety glass, transparent, light distribution: ST1.3a, light emission: direct distribution, primary light characteristic: asymmetric, installation type: side-entry, post-top, LED, LED High Power, luminous flux: 10.300 lm, luminous efficacy: 113lm/W, light colour: 830, colour temperature: 3000K, control gear: ECG Plus, control: overheat protection, power reduction, digital communication interface, constant luminous flux control, time-dependent luminous flux control, flexible luminous flux parameterisation, electronic power reduction, mains connection: 220..240V, AC, 50/60Hz, start of lifetime: 91 W, end of lifetime: 103 W, reduction: 45 W, luminaire housing, of diecast aluminium, powder-coated, Siteco® metallic grey (DB 702S), spigot size: 60/76mm (post-top) and 42/60mm (side-entry), mast flange for spigot size: 42mm: 5XA76800XM4, 60mm: 5XA76800XM2, 76mm: 5XA76800XM1, protection rating (complete): IP66, insulation class (complete): insulation class II (safety insulation), certification: CE, ENEC in preparation, impact resistance: IK09, permissible ambient temperature for outdoor applications: -35..+50°C, standard-compliant lighting for roads and squares, packaging unit: 1 piece

Light Distribution: ST1.3a

factory setting: luminousflux part=100% (dimming level=254)

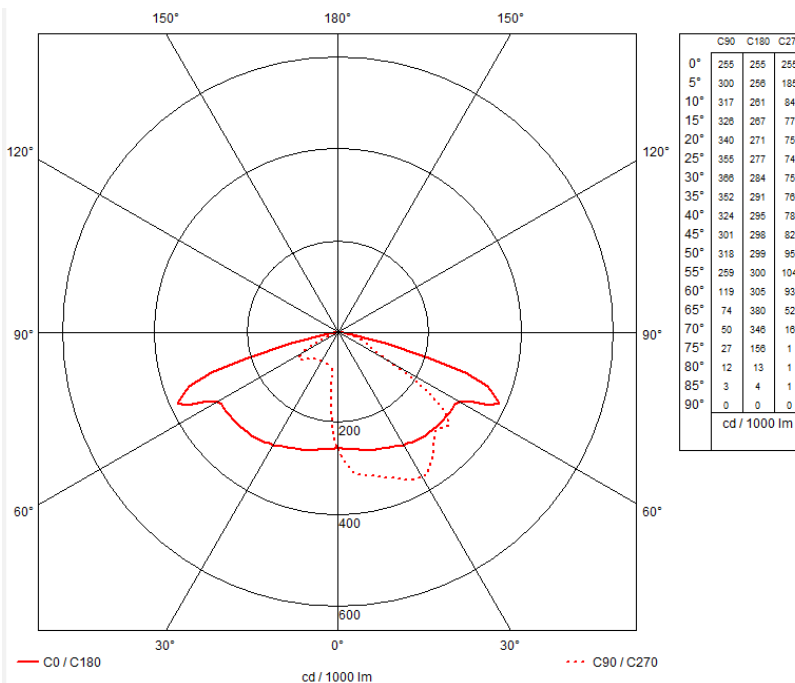
Luminaire data

Luminaire efficiency : 100%
 Luminaire efficacy : 113.44 lm/W
 Classification : A30 ↓ 100.0% ↑ 0.0%
 CIE Flux Codes : 36 72 98 100 100
 Glare : G*3 / D5
 Control gear : ECG DALI
 Power : 90.8 W
 Luminous flux : 10300 lm

Equipped with

Quantity : 2
 Designation : LED 3000K /
 CRI >= 80
 Power : 45 W
 Colour : 3000K
 Luminous flux : 5150 lm
 Colour reproduction: 80

Dimensions : 878 mm × 422 mm × 191 mm



A.8. Φωτιστικό Philips Oceanroad LED (κωδικός BRP708 T25 DM10 1xLED 82-4S/740)

Manufacturer: Philips Lighting

other BRP708 T25 1 xLED82-4S/740 DM10

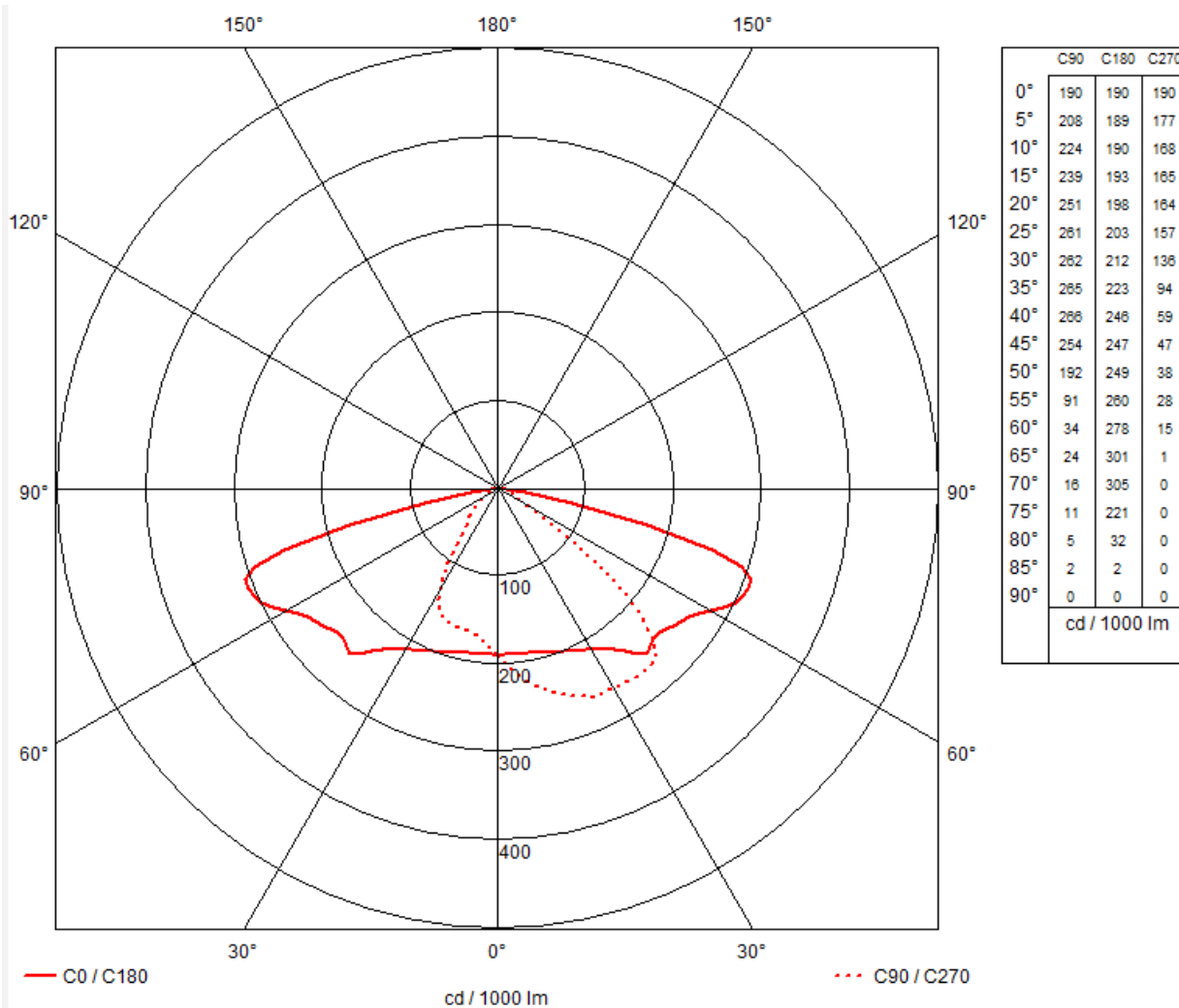
Luminaire data

Luminaire efficiency : 81%
 Luminaire efficacy : 136.95 lm/W
 Classification : A30 ↓100.0% ↑0.0%
 CIE Flux Codes : 40 75 98 100 81
 Glare : G*3 / D6
 Power : 48.5 W
 Luminous flux : 6642 lm

Equipped with

Quantity : 1
 Designation : LED82-4S/740
 Colour : -
 Luminous flux : 8200 lm

Dimensions : 530 mm x 370 mm x 140 mm



A.9. Φωτιστικό Philips Selenium LED (κωδικός BGP340 DM 1xLED 92-3S/740)

Manufacturer: Philips Lighting

other BGP340 1xLED92-3S/740 DM

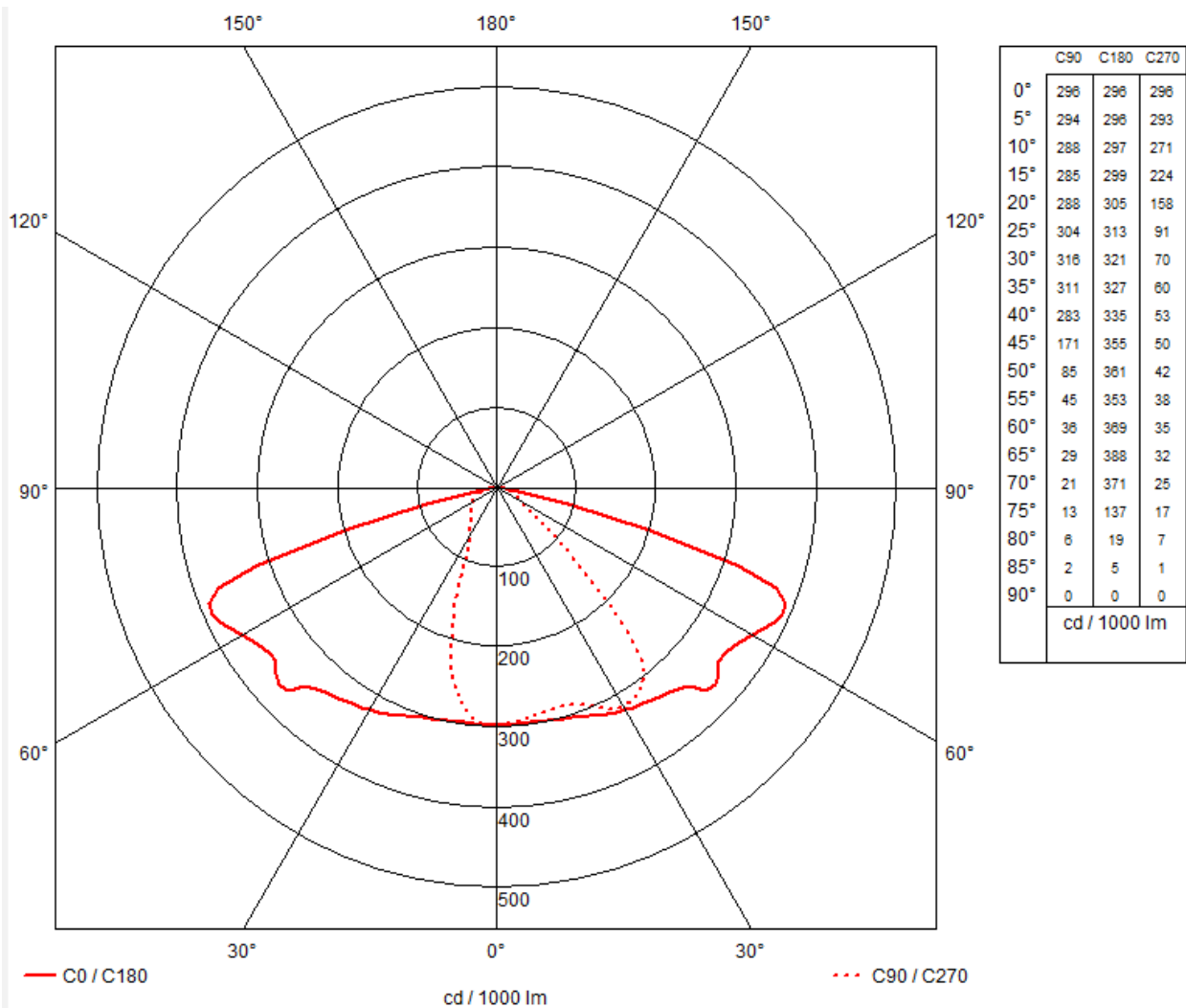
Luminaire data

Luminaire efficiency : 86%
 Luminaire efficacy : 111.44 lm/W
 Classification : A40 ↓ 100.0% ↑ 0.0%
 CIE Flux Codes : 45 79 98 100 86
 Glare : G*3 / D5
 Power : 71 W
 Luminous flux : 7912 lm

Equipped with

Quantity : 1
 Designation : LED92-3S/740
 Colour : -
 Luminous flux : 9200 lm

Dimensions : 749 mm x 321 mm x 207 mm



A.10. Φωτιστικό Philips Unistreet (κωδικός BGP202 T25 DM 1xLED 80/740)

Manufacturer: Philips Lighting

other BGP202 T25 1 xLED80/740 DM

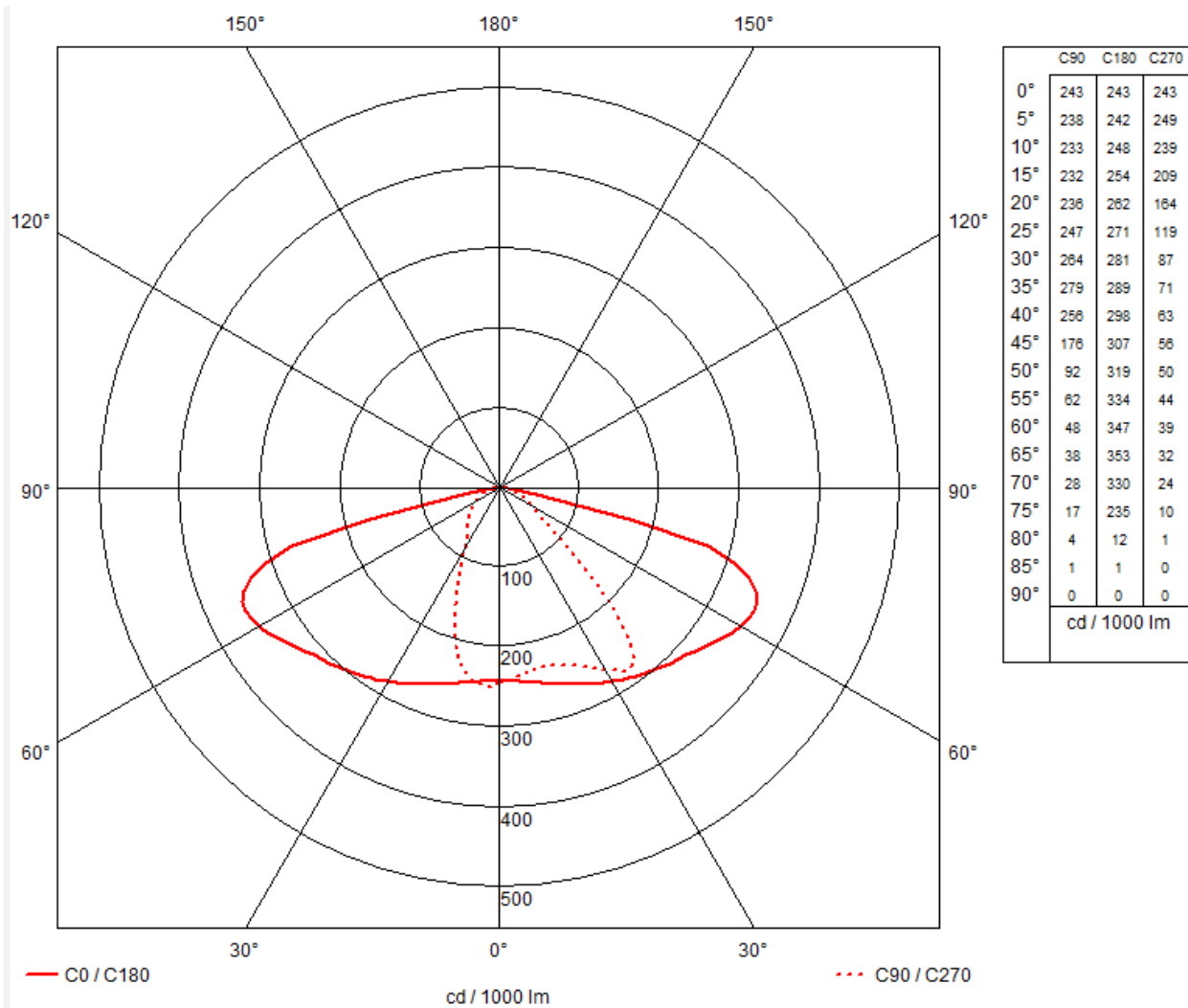
Luminaire data

Luminaire efficiency : 83%
 Luminaire efficacy : 110.67 lm/W
 Classification : A30 ↓ 100.0% ↑ 0.0%
 CIE Flux Codes : 42 77 98 100 83
 Glare : G*3 / D5
 Power : 60 W
 Luminous flux : 6640 lm

Equipped with

Quantity : 1
 Designation : LED80/740/-
 Colour : -
 Luminous flux : 8000 lm

Dimensions : 505 mm x 269 mm x 98 mm

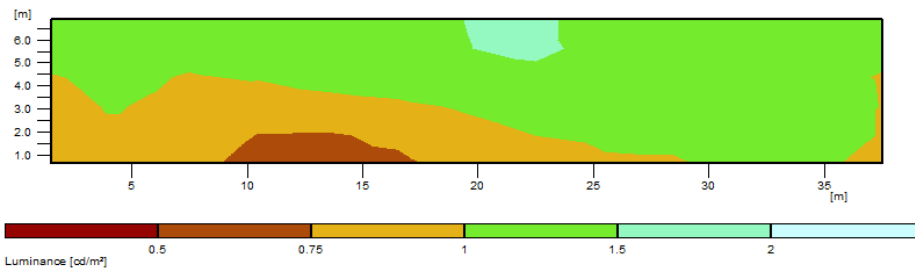


Παράρτημα Β: Αποτελέσματα φωτομετρικών μελετών

Στο παράρτημα Β παρατίθενται οι συνοπτικοί πίνακες που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των φωτομετρικών υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Επίσης, παρουσιάζονται τα βασικά φωτομετρικά μεγέθη για κάθε κλάση οδοφωτισμού με χρήση ψευδοχρωμάτων, δηλαδή της λαμπρότητας του οδοστρώματος L όπως την αντιλαμβάνονται οι δύο παρατηρητές στην κλάση M3 και της έντασης φωτισμού E όπως μετράται από τον παρατηρητή στην κλάση C4.

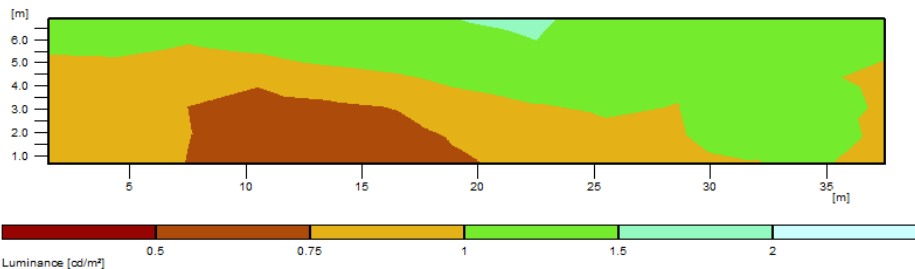
Β.1.1. Φωτιστικό Disano Brera 1 στο δρόμο κλάσης M3

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 1681 48 LED CLD CELL graphite, 325371-00		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	5595 W/km	--
Road		
L(1). M3		
Lm	1.08 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.64	>= 0.40
UI	0.62	>= 0.60
TI	8	<= 15
Rei	0.81	>= 0.30
L(2). M3		
Lm	1.00 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.64	>= 0.40
UI	0.67	>= 0.60
TI	11	<= 15
Rei	0.81	>= 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.08 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.69 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.64
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax : 0.62
 Threshold increment TI : 8 %

Uniformity Uo min/average : 1 : 1.58 (0.64)
 Diversity Ud min/max : 1 : 2.29 (0.44)

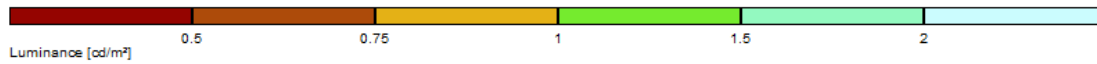
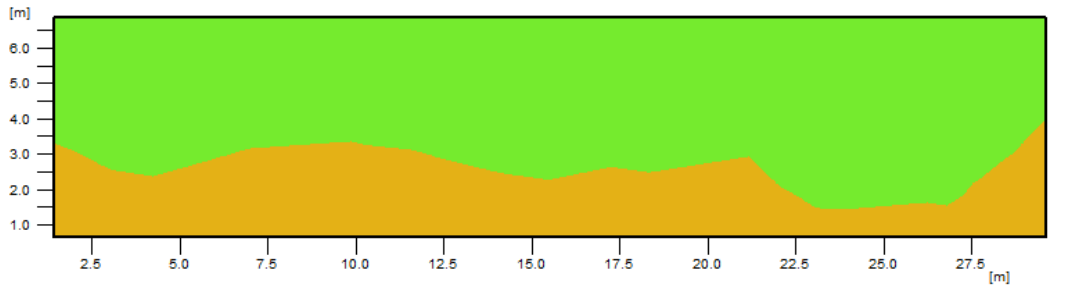


Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.64 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.64
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax : 0.67
 Threshold increment TI : 11 %

Uniformity Uo min/average : 1 : 1.57 (0.64)
 Diversity Ud min/max : 1 : 2.49 (0.4)

B.1.2. Φωτιστικό Disano Mini Stelvio στο δρόμο κλάσης M3

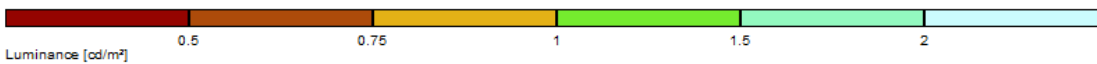
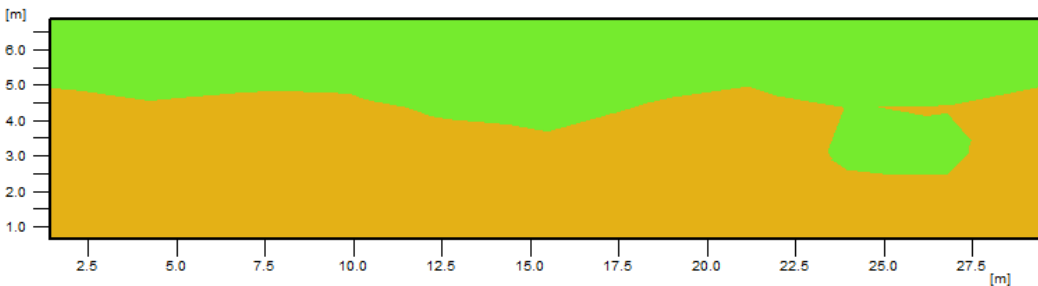
Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 3275 48 led - 530mA CLD CELL anthracite. ...		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	5316 W/km	--
Road		
L(1). M3		
\bar{L}_m	1.08 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
U _o	0.76	>= 0.40
U _l	0.83	>= 0.60
TI	7	<= 15
Re _i	0.81	>= 0.30
L(2). M3		
\bar{L}_m	1.00 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
U _o	0.76	>= 0.40
U _l	0.81	>= 0.60
TI	9	<= 15
Re _i	0.81	>= 0.30



Luminance [cd/m²]

Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.41)
 Average luminance L_{av} : 1.08 cd/m²
 Minimum luminance L_{min} : 0.82 cd/m²
 Overall uniformity U_o L_{min}/L_m : 0.76
 Longitudinal uniformity U_l L_{min}/L_{lmax} : 0.83
 Threshold increment TI : 7 %

Uniformity U_o min/average : 1 : 1.32 (0.76)
 Diversity U_d min/max : 1 : 1.71 (0.59)



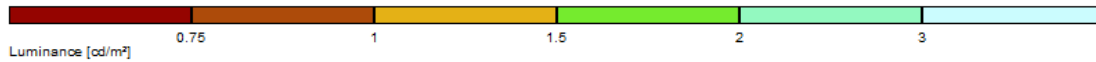
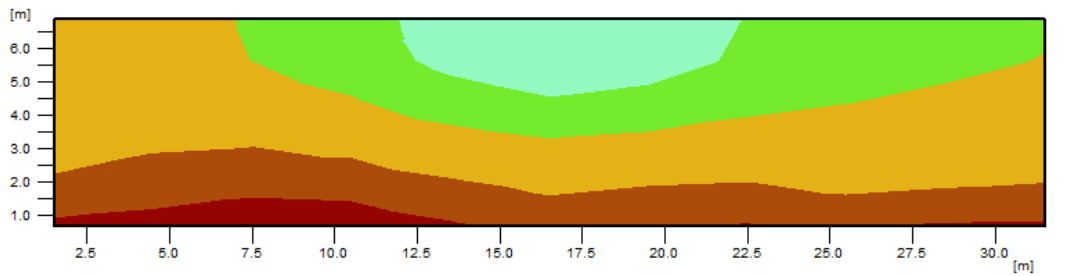
Luminance [cd/m²]

Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.41)
 Average luminance L_{av} : 1 cd/m²
 Minimum luminance L_{min} : 0.76 cd/m²
 Overall uniformity U_o L_{min}/L_m : 0.76
 Longitudinal uniformity U_l L_{min}/L_{lmax} : 0.81
 Threshold increment TI : 9 %

Uniformity U_o min/average : 1 : 1.31 (0.76)
 Diversity U_d min/max : 1 : 1.82 (0.55)

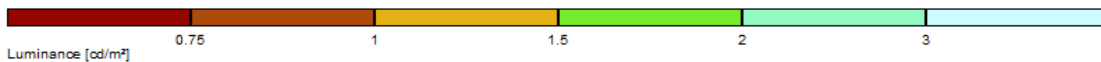
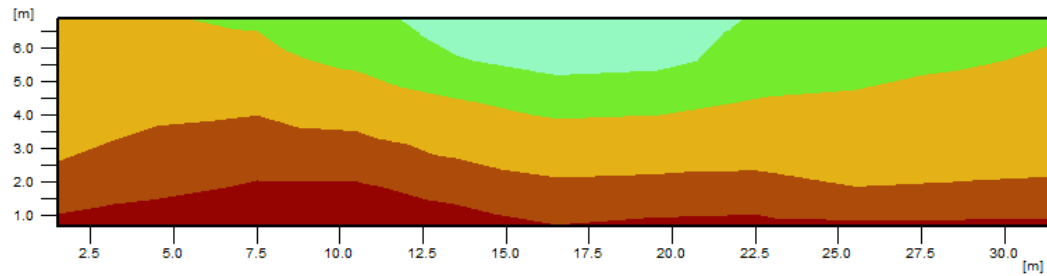
B.1.3. Φωτιστικό Disano Rolle στο δρόμο κλάσης M3

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 3284 10 LED - T5 -700mA CLD CELL grey, 3...		
Lum. intensity class	G*6	--
Glare index class	D5	--
Load/km	5133 W/km	--
Road		
L(1). M3		
\bar{L}_m	1.33 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
U _o	0.46	>= 0.40
U _l	0.75	>= 0.60
TI	5	<= 15
Re _i	0.45	>= 0.30
L(2). M3		
\bar{L}_m	1.25 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
U _o	0.46	>= 0.40
U _l	0.62	>= 0.60
TI	9	<= 15
Re _i	0.45	>= 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.33 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.62 cd/m²
 Overall uniformity U_o Lmin/Lm : 0.46
 Longitudinal uniformity U_l Lmin/Lmax: 0.75
 Threshold increment TI : 5 %

Uniformity U_o min/average: 1 : 2.15 (0.46)
 Diversity U_d min/max : 1 : 3.92 (0.26)

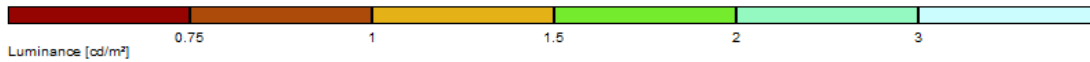
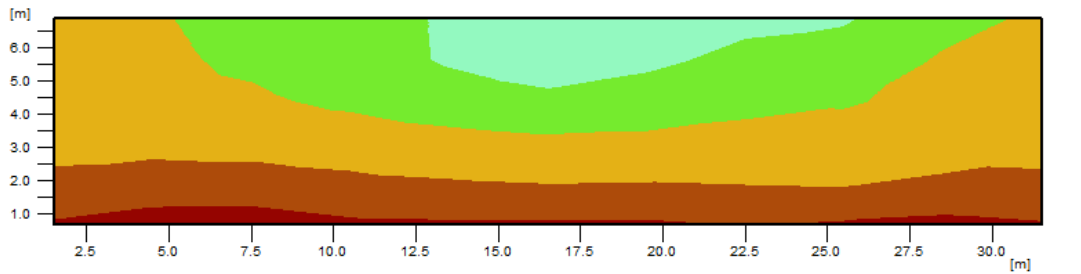


Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.25 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.58 cd/m²
 Overall uniformity U_o Lmin/Lm : 0.46
 Longitudinal uniformity U_l Lmin/Lmax: 0.62
 Threshold increment TI : 9 %

Uniformity U_o min/average: 1 : 2.15 (0.46)
 Diversity U_d min/max : 1 : 4.16 (0.24)

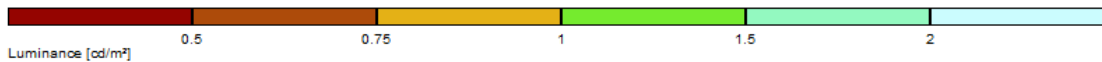
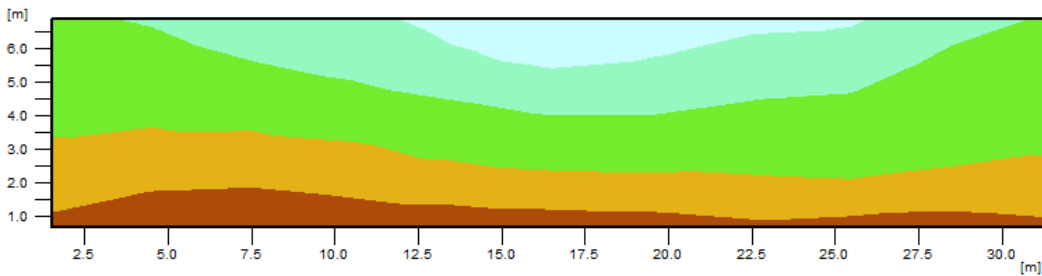
B.1.4. Φωτιστικό Disano Sella1 στο δρόμο κλάσης M3

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 3290 16 LED 78w CLD CELL graphite, 3306...		
Lum. intensity class	G*4	--
Glare index class	D4	--
Load/km	5145 W/km	--
Road		
L(1). M3		
Lm	1.32 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.50	>= 0.40
UI	0.84	>= 0.60
TI	7	<= 15
Rei	0.62	>= 0.30
L(2). M3		
Lm	1.24 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.49	>= 0.40
UI	0.60	>= 0.60
TI	9	<= 15
Rei	0.62	>= 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.32 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.66 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.5
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.84
 Threshold increment TI : 7 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 2 (0.5)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.34 (0.3)

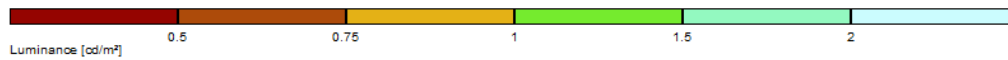
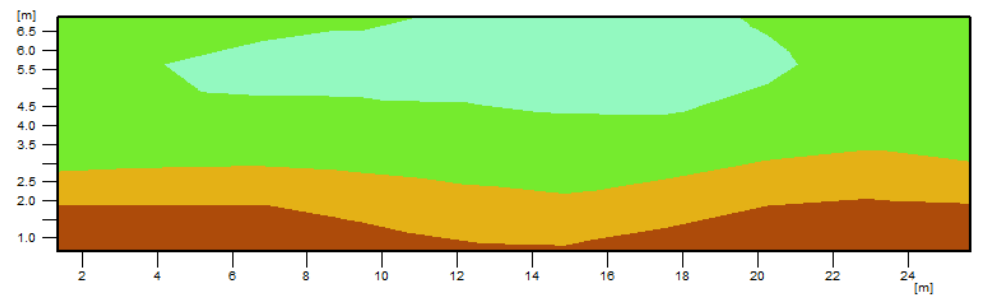


Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.24 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.61 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.49
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.6
 Threshold increment TI : 9 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 2.04 (0.49)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.73 (0.27)

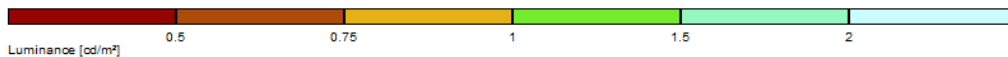
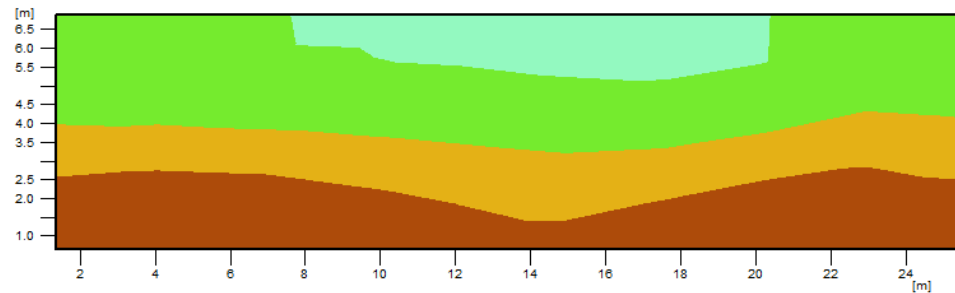
B.1.5. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 11 mini

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Streetlight 11 mini LED ST1.2P1.0. 5XC2G41C08HA		
Lum. intensity class	n/a	--
Glare index class	D0	--
Load/km	4837 W/km	--
Road		
L(1). M3		
Em	1.15 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.48	>= 0.40
UI	0.76	>= 0.60
TI	10	<= 15
Rei	0.74	>= 0.30
L(2). M3		
Em	1.03 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.49	>= 0.40
UI	0.74	>= 0.60
TI	15	<= 15
Rei	0.74	>= 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.35)
 Average luminance Lav : 1.15 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.55 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.48
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax : 0.76
 Threshold increment TI : 10 %

Uniformity Uo min/average : 1 : 2.08 (0.48)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.13 (0.32)

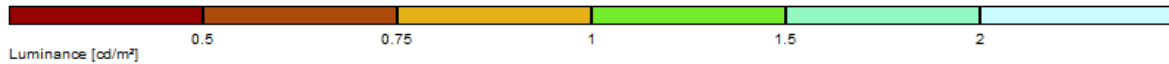
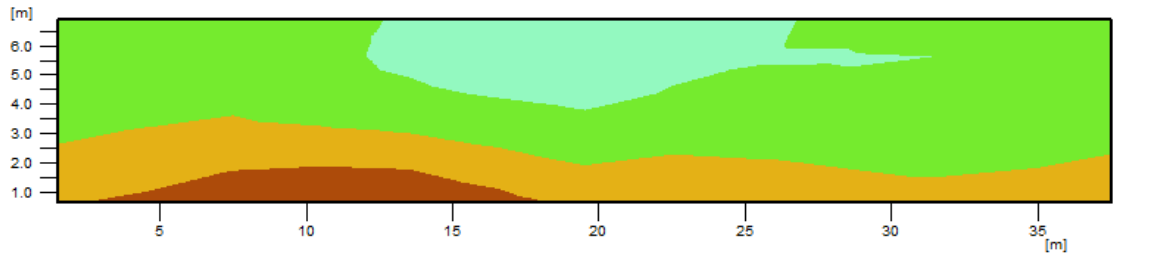


Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.35)
 Average luminance Lav : 1.03 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.5 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.49
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax : 0.74
 Threshold increment TI : 15 %

Uniformity Uo min/average : 1 : 2.08 (0.49)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.38 (0.3)

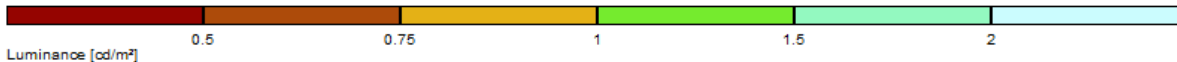
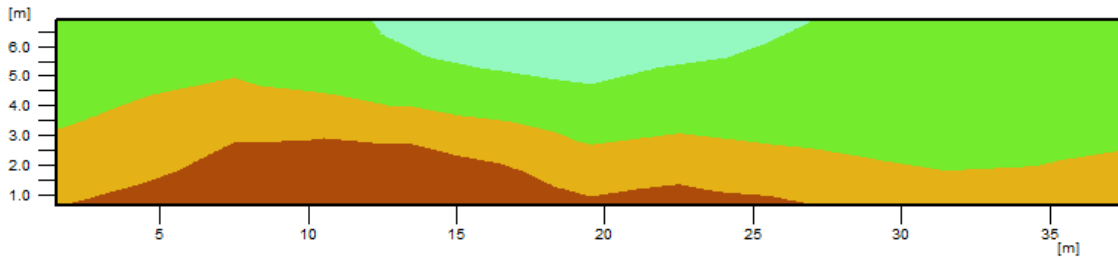
B.1.6. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 20 midi

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Streetlight 20 midi LED ST1.3a, 5XB33K2C408A		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D4	--
Load/km	4892 W/km	--
Road		
L(1). M3		
Lm	1.16 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.53	>= 0.40
UI	0.70	>= 0.60
TI	9	<= 15
Rei	0.67	>= 0.30
L(2). M3		
Lm	1.08 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.51	>= 0.40
UI	0.61	>= 0.60
TI	13	<= 15
Rei	0.67	>= 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.16 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.61 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.53
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.7
 Threshold increment TI : 9 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 1.9 (0.53)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.21 (0.31)

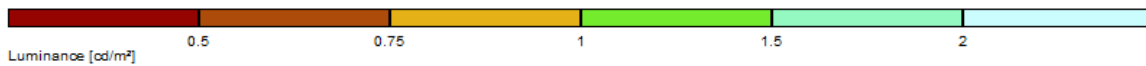
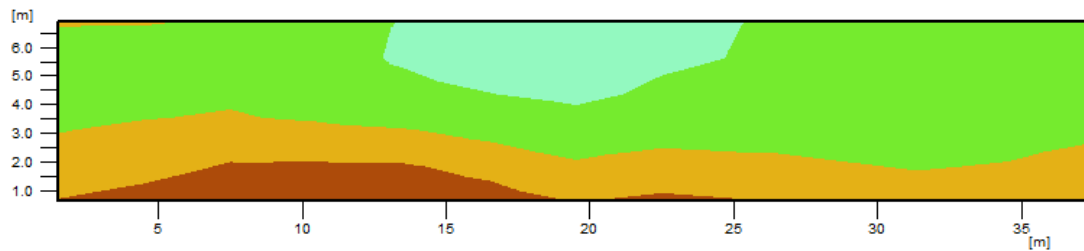


Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.08 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.55 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.51
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.61
 Threshold increment TI : 13 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 1.97 (0.51)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.63 (0.28)

B.1.7. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 20 maxi

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Streetlight 20 maxi LED ST1.3a, 5XB43N1B408A		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	4656 W/km	--
Road		
L(1). M3		
Em	1.12 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.53	>= 0.40
UI	0.70	>= 0.60
TI	9	<= 15
Rei	0.67	>= 0.30
L(2). M3		
Em	1.04 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.51	>= 0.40
UI	0.61	>= 0.60
TI	13	<= 15
Rei	0.67	>= 0.30



Luminance [cd/m²]

Observer location 1 : x = -80, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.50)

Average luminance Lav : 1.12 cd/m²

Minimum luminance Lmin : 0.59 cd/m²

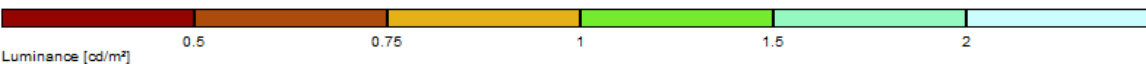
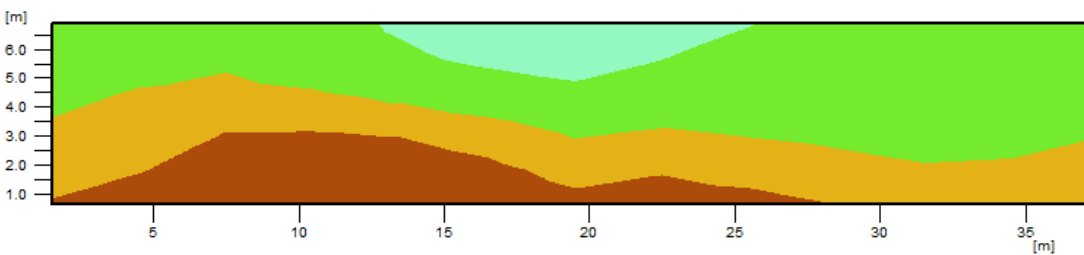
Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.53

Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.7

Threshold increment TI : 9 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 1.9 (0.53)

Diversity Ud min/max : 1 : 3.21 (0.31)



Luminance [cd/m²]

Observer location 2 : x = -80, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.50)

Average luminance Lav : 1.04 cd/m²

Minimum luminance Lmin : 0.53 cd/m²

Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.51

Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.61

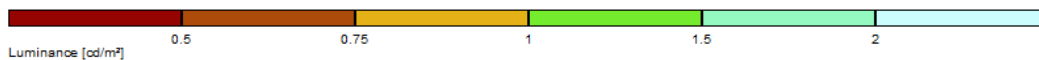
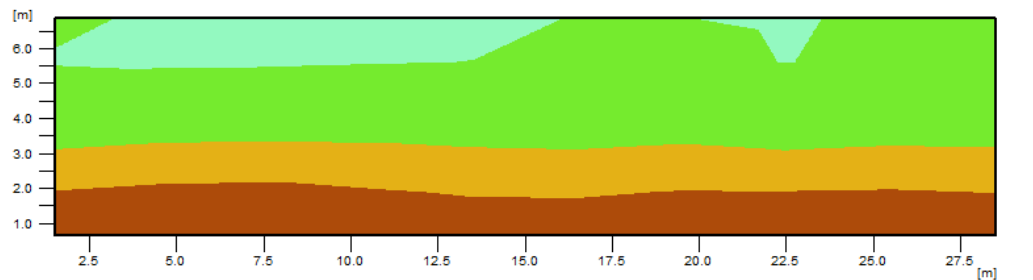
Threshold increment TI : 13 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 1.97 (0.51)

Diversity Ud min/max : 1 : 3.63 (0.28)

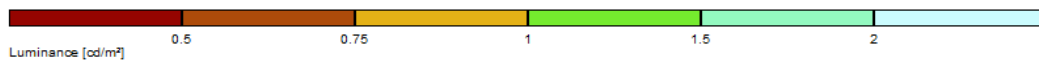
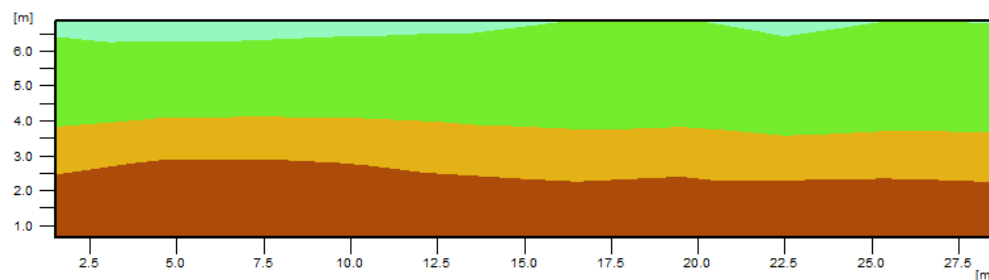
B.1.8. Φωτιστικό Philips Oceanroad LED

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
BRP708 T25 1 xLED82-4S/740 DM10.		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D6	--
Load/km	3233 W/km	--
Road		
L(1). M3		
Lm	1.10 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.50	>= 0.40
UI	0.90	>= 0.60
TI	6	<= 15
Rei	0.64	>= 0.30
L(2). M3		
Lm	1.02 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.50	>= 0.40
UI	0.96	>= 0.60
TI	9	<= 15
Rei	0.64	>= 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.1 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.55 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.5
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.9
 Threshold increment TI : 6 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 2 (0.5)
 Diversity Ud min/max : 1 : 2.81 (0.36)

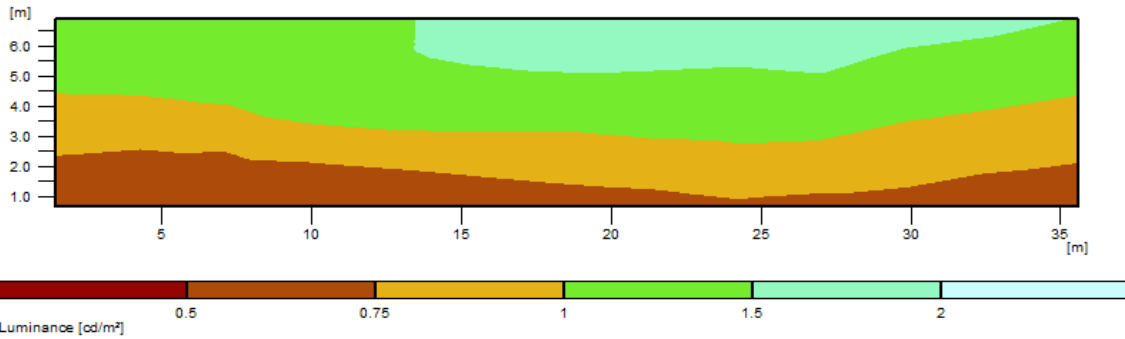


Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.50)
 Average luminance Lav : 1.02 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.5 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.5
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.96
 Threshold increment TI : 9 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 2.02 (0.5)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.14 (0.32)

B.1.9. Φωτιστικό Philips Selenium LED

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
BGP340 1xLED92-3S/740 DM,		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	3838 W/km	--
Road		
L(1), M3		
\bar{E}_m	1.08 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²
U_o	0.51	≥ 0.40
U_l	0.77	≥ 0.60
TI	8	≤ 15
Rei	0.54	≥ 0.30
L(2), M3		
\bar{E}_m	1.01 cd/m ²	≥ 1.00 cd/m ²
U_o	0.50	≥ 0.40
U_l	0.69	≥ 0.60
TI	11	≤ 15
Rei	0.54	≥ 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.42)

Average luminance \bar{E}_m : 1.08 cd/m²

Minimum luminance L_{min} : 0.54 cd/m²

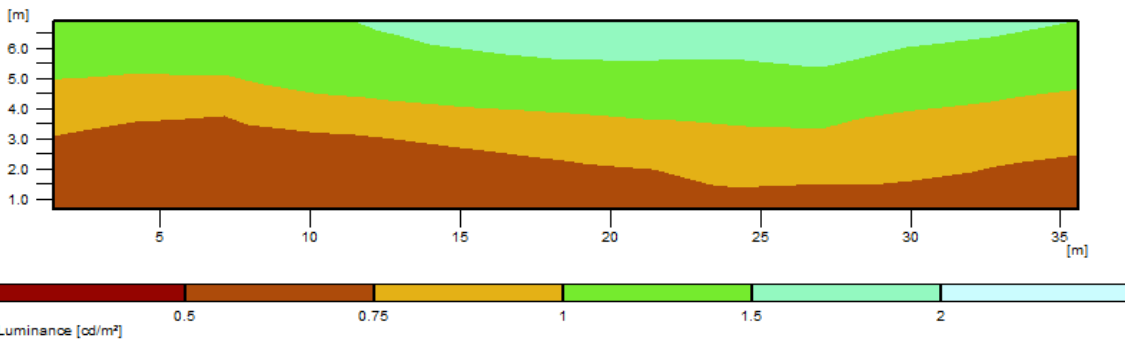
Overall uniformity U_o L_{min}/\bar{E}_m : 0.51

Longitudinal uniformity U_l L_{min}/L_{max} : 0.77

Threshold increment TI : 8 %

Uniformity U_o min/average : 1 : 1.98 (0.51)

Diversity U_d min/max : 1 : 3.4 (0.29)



Observer location 2 : x = -60, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 61.42)

Average luminance \bar{E}_m : 1.01 cd/m²

Minimum luminance L_{min} : 0.5 cd/m²

Overall uniformity U_o L_{min}/\bar{E}_m : 0.5

Longitudinal uniformity U_l L_{min}/L_{max} : 0.69

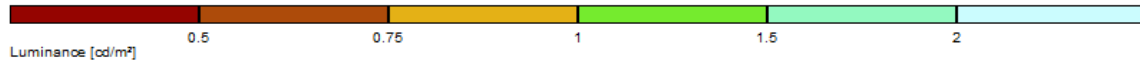
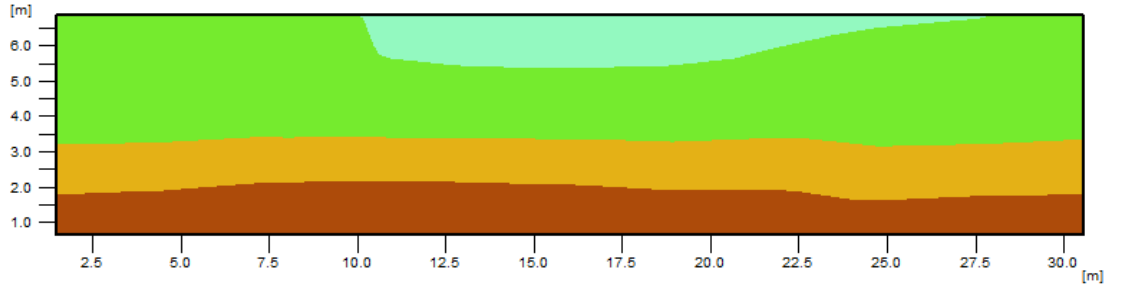
Threshold increment TI : 11 %

Uniformity U_o min/average : 1 : 2.02 (0.5)

Diversity U_d min/max : 1 : 3.67 (0.27)

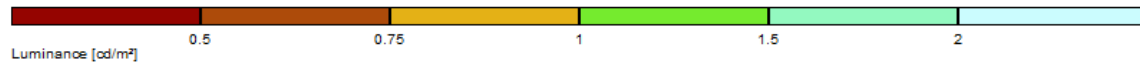
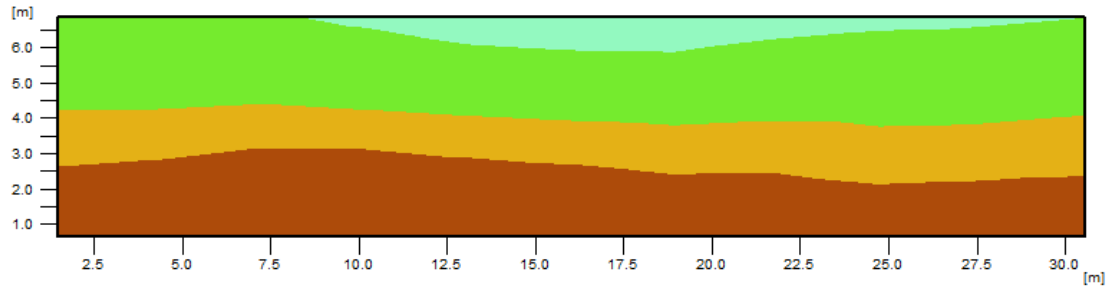
B.1.10. Φωτιστικό Philips Unistreet

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
BGP202 T25 1 xLED80/740 DM.		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	3750 W/km	--
Road		
L(1). M3		
Lm	1.09 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.53	>= 0.40
UI	0.89	>= 0.60
TI	7	<= 15
Rei	0.60	>= 0.30
L(2). M3		
Lm	1.00 cd/m ²	>= 1.00 cd/m ²
Uo	0.52	>= 0.40
UI	0.91	>= 0.60
TI	9	<= 15
Rei	0.60	>= 0.30



Observer location 1 : x = -60, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.45)
 Average luminance Lav : 1.09 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.57 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.53
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.89
 Threshold increment TI : 7 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 1.9 (0.53)
 Diversity Ud min/max : 1 : 2.87 (0.35)

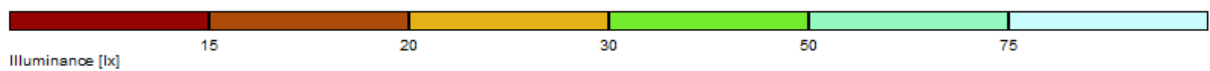
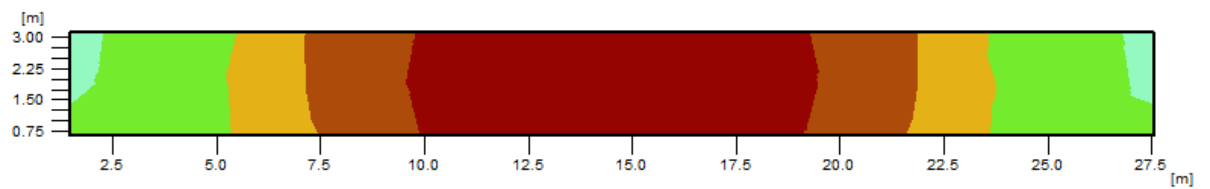


Observer location 2 : x = -60, y = 5.83, z = 1.5 (dx = 61.45)
 Average luminance Lav : 1 cd/m²
 Minimum luminance Lmin : 0.52 cd/m²
 Overall uniformity Uo Lmin/Lm : 0.52
 Longitudinal uniformity UI Lmin/Lmax: 0.91
 Threshold increment TI : 9 %

Uniformity Uo min/average: 1 : 1.92 (0.52)
 Diversity Ud min/max : 1 : 3.13 (0.32)

B.2.1. Φωτιστικό Disano Brera 1 στο δρόμο κλάσης C4

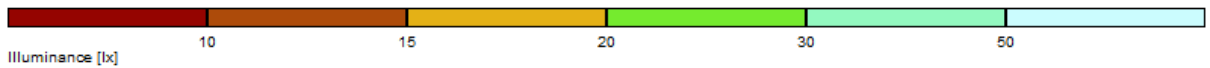
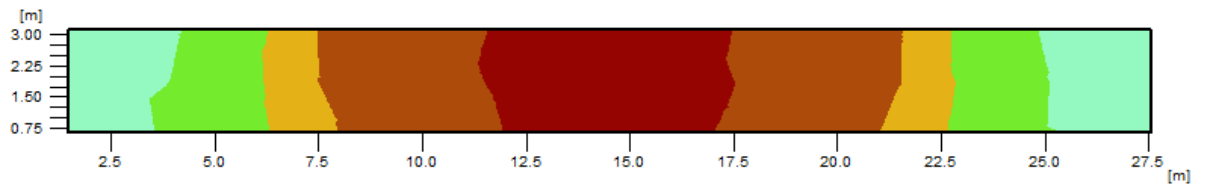
Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 1681 48 LED CLD CELL graphite, 325371-00		
Lum. intensity class	G*2	--
Glare index class	D4	--
Load/km	7524 W/km	--
Road		
E, C4		
Em	26 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.41	>= 0.40



Height reference plane	: 0.00 m
Average illuminance	Eav : 26.3 lx
Minimum illuminance	Emin : 10.7 lx
Maximum illuminance	Emax : 55 lx
Uniformity Uo	min/average: 1 : 2.46 (0.41)
Diversity Ud	min/max : 1 : 5.15 (0.19)

B.2.2. Φωτιστικό Disano Mini Stelvio στο δρόμο κλάσης C4

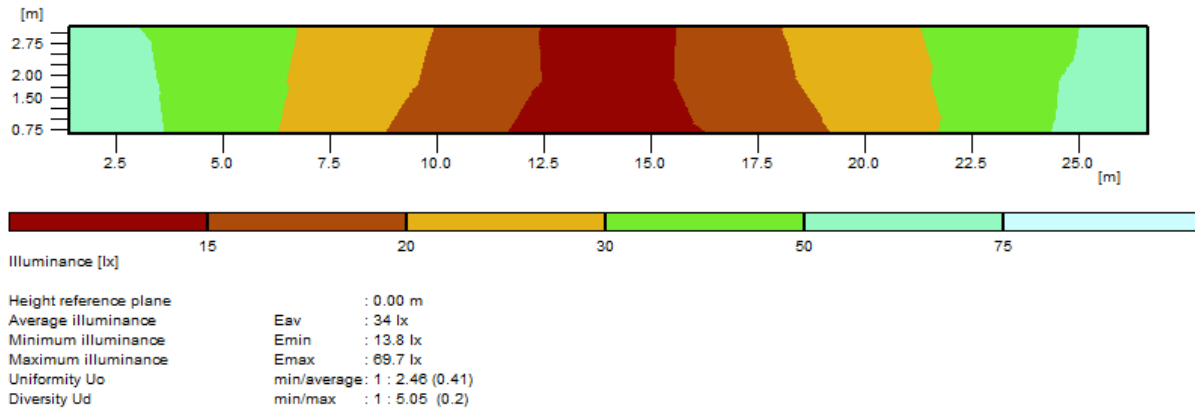
Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 3275 48 led - 530mA CLD CELL anthracite, ...		
Lum. intensity class	G*2	--
Glare index class	D5	--
Load/km	5683 W/km	--
Road		
E, C4		
Em	21 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.41	>= 0.40



Height reference plane	: 0.00 m
Average illuminance	Eav : 20.9 lx
Minimum illuminance	Emin : 8.5 lx
Maximum illuminance	Emax : 43.8 lx
Uniformity Uo	min/average: 1 : 2.46 (0.41)
Diversity Ud	min/max : 1 : 5.15 (0.19)

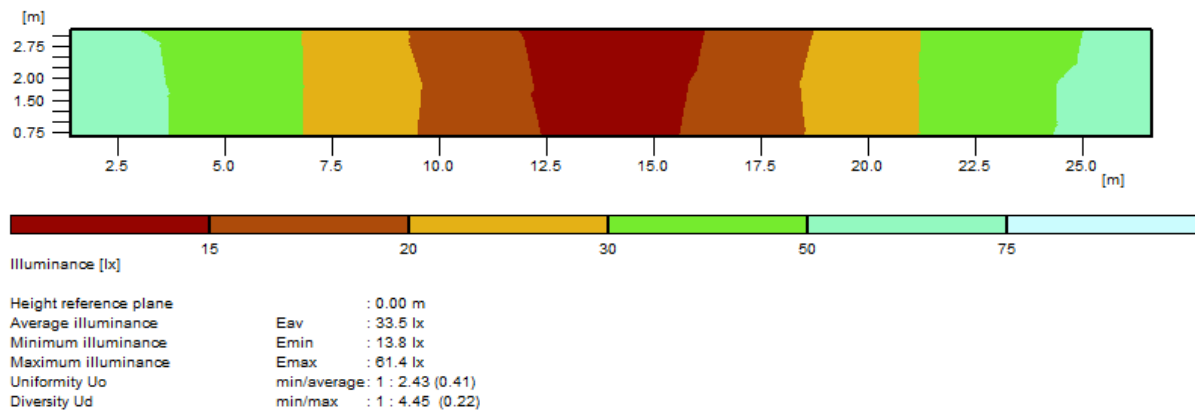
B.2.3. Φωτιστικό Disano Rolle στο δρόμο κλάσης C4

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 3284 10 LED - T5 -700mA CLD CELL grey, 3...		
Lum. intensity class	G*4	--
Glare index class	D5	--
Load/km	6050 W/km	--
Road		
E, C4		
Em	34 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.41	>= 0.40

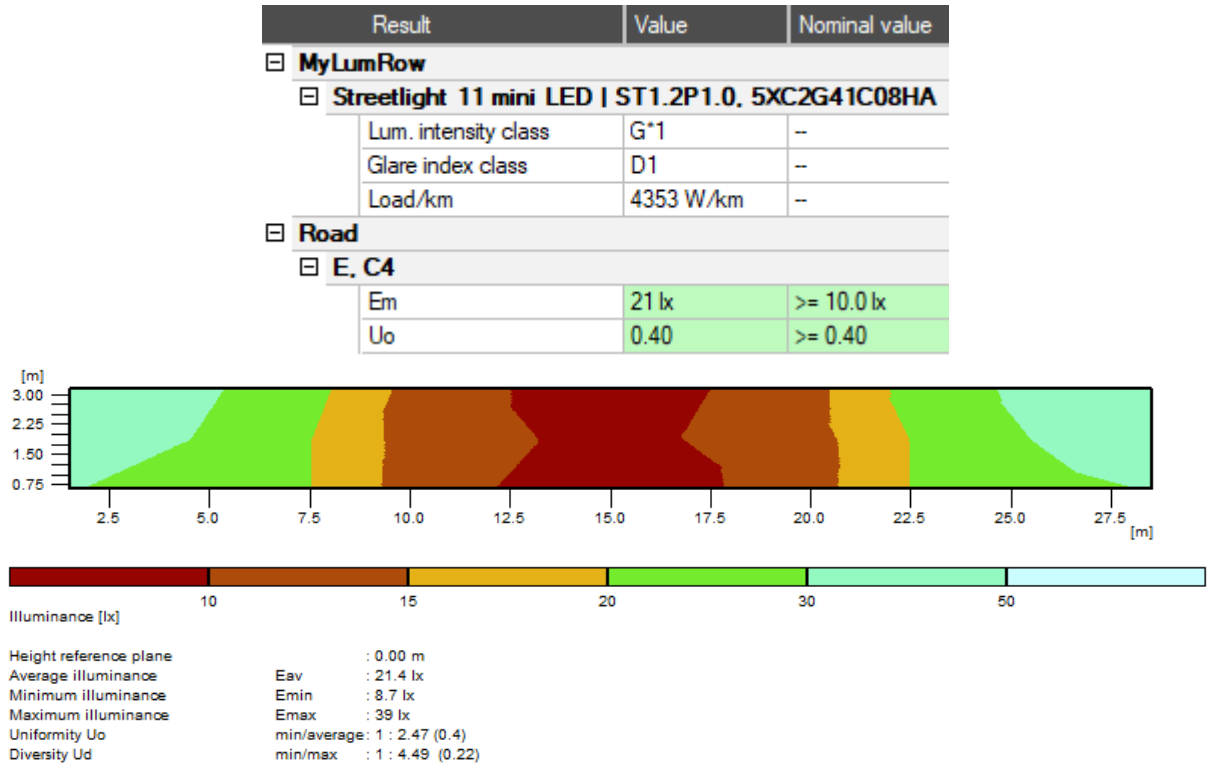


B.2.4. Φωτιστικό Disano Sella 1 στο δρόμο κλάσης C4

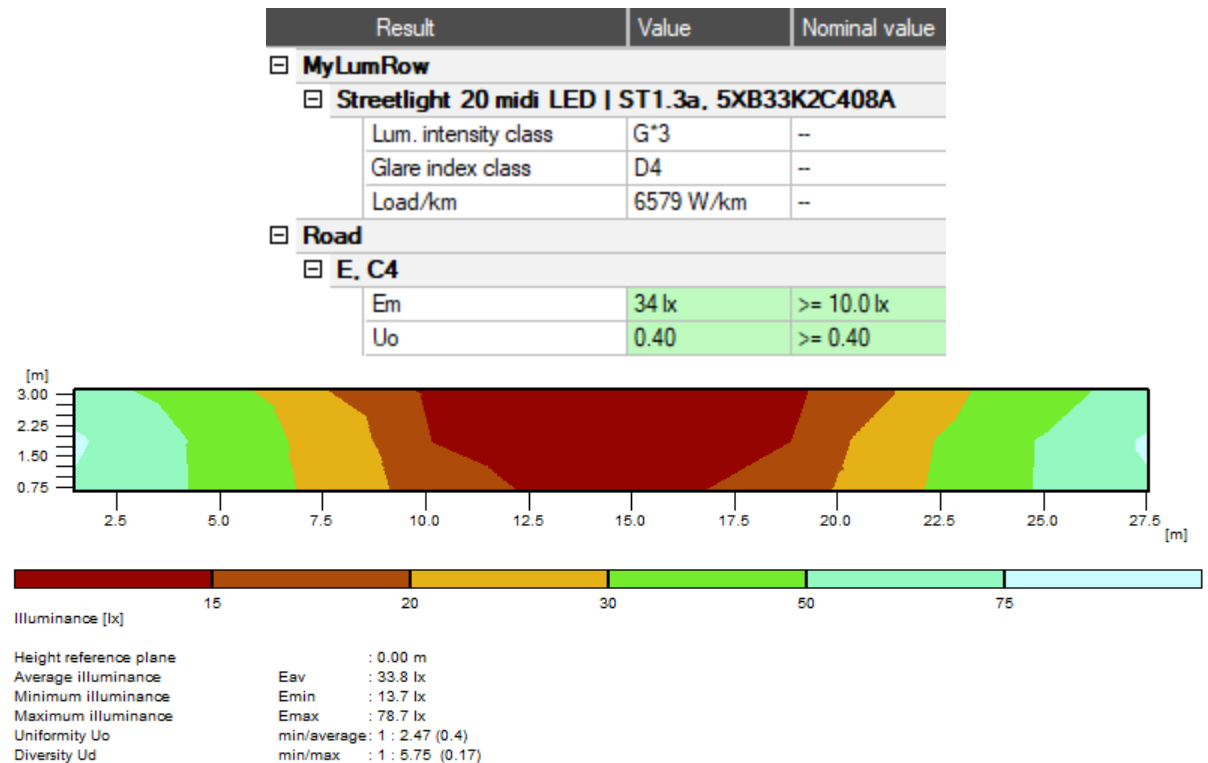
Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Disano 3290 16 LED 78w CLD CELL graphite, 3306...		
Lum. intensity class	G*4	--
Glare index class	D4	--
Load/km	6064 W/km	--
Road		
E, C4		
Em	33 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.41	>= 0.40



B.2.5. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 11 mini στο δρόμο κλάσης C4

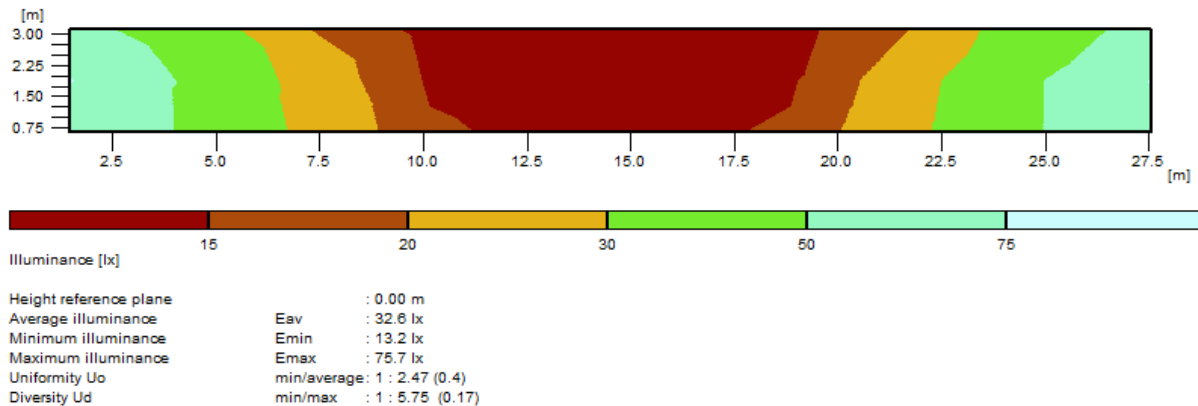


B.2.6. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 20 midi στο δρόμο κλάσης C4



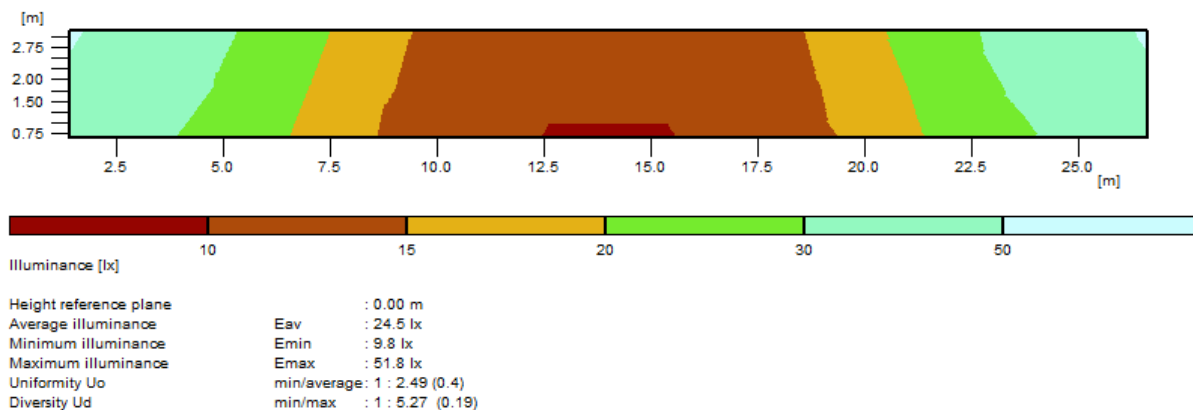
B.2.7. Φωτιστικό OSRAM Streetlight 20 maxi στο δρόμο κλάσης C4

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
Streetlight 20 maxi LED ST1.3a, 5XB43N1B408A		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	6262 W/km	--
Road		
E, C4		
Em	33 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.40	>= 0.40



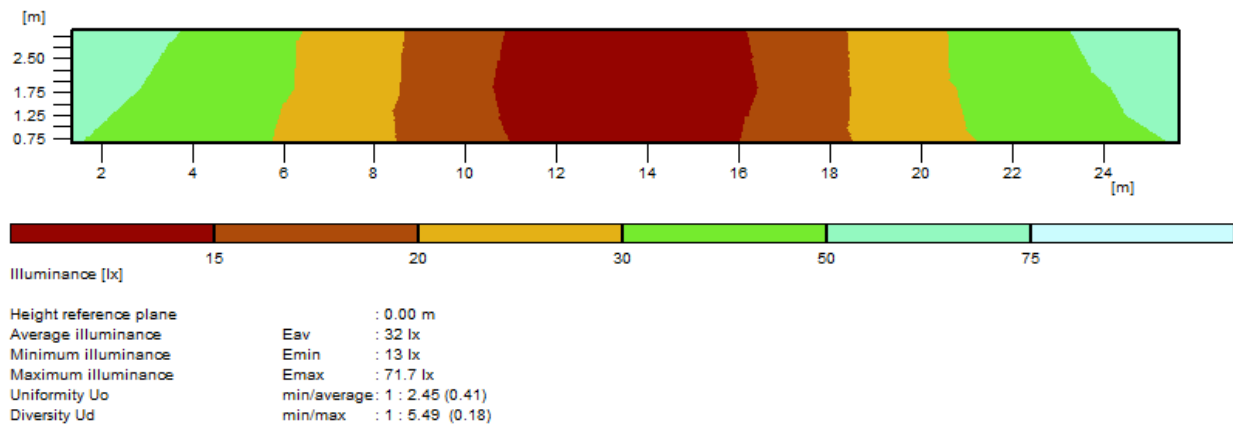
B.2.8. Φωτιστικό Philips Oceanroad LED στο δρόμο κλάσης C4

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
BRP708 T25 1 xLED82-4S/740 DM10.		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D6	--
Load/km	3464 W/km	--
Road		
E, C4		
Em	25 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.40	>= 0.40



B.2.9. Φωτιστικό Philips Selenium LED στο δρόμο κλάσης C4

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
BGP340 1xLED92-3S/740 DM.		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	5259 W/km	--
Road		
E. C4		
Em	32 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.41	>= 0.40



B.2.10. Φωτιστικό Philips Unistreet στο δρόμο κλάσης C4

Result	Value	Nominal value
MyLumRow		
BGP202 T25 1xLED80/740 DM.		
Lum. intensity class	G*3	--
Glare index class	D5	--
Load/km	4444 W/km	--
Road		
E. C4		
Em	27 lx	>= 10.0 lx
Uo	0.41	>= 0.40

