



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

**Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτιστικού Δρόμων και
Εξωτερικών Χώρων με LED: Εφαρμογή στις Πλατείες
Κέντρου του ΕΜΠ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταύρος Α. Γιαγιάννος

Επιβλέπων : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013



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

Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτιστικού Δρόμων και Εξωτερικών Χώρων με LED: Εφαρμογή στις Πλατείες Κέντρου του ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταύρος Α. Γιαγιάννος

Επιβλέπων : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Φεβρουαρίου 2013.

.....
Φραγκίσκος Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

.....
Πάυλος Γεωργιλιάκης
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

.....

Σταύρος Α. Γιαγιάννος

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

Copyright © Σταύρος Α. Γιαγιάννος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες σε όσους βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Φραγκίσκο Τοπαλή, Καθηγητή ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το παρόν θέμα καθώς και για την υποστήριξη που μου παρείχε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα, κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση, για την πολύτιμη καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαιτέρως τους γονείς μου, Αθανασία και Αριστείδα και την αδερφή μου, Δάφνη, για την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν καθημερινά, καθώς και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η παρουσίαση των επιμέρους συνιστωσών ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος φωτισμού δρόμων και εξωτερικών χώρων με LED και η παραμετροποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού των συνιστωσών αυτών, με σκοπό την προσαρμογή του συστήματος στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Στο πλαίσιο της εργασίας, διαστασιολογούνται ο συσσωρευτής και το φ/β σύστημα, ενώ ιδιαίτερο βάρος δίνεται στο σχεδιασμό της φωτεινής πηγής και των απαραίτητων συστημάτων ελέγχου αυτής, ο οποίος γίνεται με κριτήριο την κάλυψη των περισσότερο απαιτητικών κλάσεων φωτισμού, την υψηλή ενεργειακή απόδοση και την υψηλή ποιότητα του παραγόμενου φωτός.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του συστήματος εφαρμόζονται σε αντίστοιχη μελέτη περίπτωσης, η οποία αφορά τη χρησιμοποίηση του σχεδιαζόμενου συστήματος για το φωτισμό των Κεντρικών Πλατειών του Συγκροτήματος της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, στο πλαίσιο των έργων αρχιτεκτονικής ανάπλασης των εν λόγω χώρων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Φωτισμός δρόμων και εξωτερικών χώρων, αυτόνομο φωτιστικό, φωτοεκπέμπουσες δίοδοι, φωτισμός στερεάς κατάστασης, φωτοβολταϊκό, συσσωρευτής, έλεγχος φωτεινότητας, εξοικονόμηση ενέργειας, οδήγηση LED.

ABSTRACT

The goal of this thesis is the study and presentation of all the individual subsystems that, when combined, construct a stand-alone, photovoltaic, outdoor and street lighting system with LED technology. Furthermore, a parameterization of the system's design process is attempted, so that the system can be designed to meet the requirements of any possible application.

The process of the photovoltaic panel and battery sizing is thoroughly explained, while special attention is given to the design of the lighting fixture and its control systems, in order to meet the most strict lighting requirements in road lighting and achieve high energy efficiency and high lighting quality.

The conclusions made during the systems' study, are applied to a case study concerning the use of this particular system, in the lighting of the Central Squares of the National Technical University of Athens in Zografou Campus, as part of the program for the architectural reconstruction of these facilities.

KEY WORDS

Outdoor and street lighting, stand-alone luminaire, Light Emitting Diodes (LED), solid state lighting, photovoltaic panel, battery, dimming, LED driver, energy saving.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	9
Εισαγωγή	9
1.1 Γενικά	9
1.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας στο Φωτισμό	10
1.3 Αυτόνομο Σύστημα Φωτισμού.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	13
Το Φορτίο	13
2.1 Περιγραφή του φορτίου	13
2.2 Φωτισμός δρόμων και εξωτερικών χώρων.....	13
2.2.1 Γενικά.....	13
2.2.2 Κατηγοριοποίηση δρόμων και Κλάσεις Φωτισμού	14
2.2.3 Ορισμός φωτομετρικών μεγεθών	17
2.3 Συμβατικές Πηγές Φωτισμού	19
2.3.1 Γενικά.....	19
2.3.2 Τεχνολογίες Λαμπτήρων	20
2.4 Φωτοεκπέμπουσες Δίοδοι LED.....	23
2.4.1 Γενικά.....	23
2.4.2 Ιστορία.....	24
2.4.3 Τεχνολογία.....	25
2.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των LEDs.....	26
2.4.5 Φωτισμός δρόμων και εξωτερικών χώρων με LED	27
2.5 Σχεδιασμός της πηγής.....	29
2.5.1 Γενικά.....	29
2.5.2 Πολικό Διάγραμμα.....	30
2.5.3 Επιλογή LED.....	31
2.5.4 Σύνθεση Πολικού Διαγράμματος	33
2.5.5 Έλεγχος Απαιτήσεων και Επιλογή Πολικού Διαγράμματος	36
2.5.6 Αριθμός LEDs.....	41
2.5.7 Θερμοκρασία Χρώματος.....	43
2.5.8 Μοντέλο Φορτίου	46
2.6 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ	49
2.6.1 Περιγραφή	49
2.6.2 Πλατείες Κέντρου (Μη στεγαζόμενες περιοχές)	50
2.6.3 Στέγαστρα.....	54
2.6.4 Υπαίθριο Αναγνωστήριο	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	59
Η Πηγή της Ενέργειας	59
3.1 Γενικά	59
3.2 Ενεργειακό Δυναμικό	59
3.2.1 Ηλιακή Ενέργεια.....	59
3.2.2 Μετρήσεις Ηλιακής Ακτινοβολίας	60
3.2.3 Επεξεργασία των Μετρήσεων.....	61
3.3 Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας	63
3.3.1 Γενικά.....	63
3.3.2 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία.....	64
3.3.3 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια.....	65
3.3.4 Προσανατολισμός Φ/Β Πλαισίου	67
3.3.5 Διαστασιολόγηση του Φ/Β Πλαισίου	69
3.4 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ	70
3.4.1 Περιγραφή	70
3.4.2 Συλλογή και Επεξεργασία Μετρήσεων	70
3.4.3 Επιλογή κλίσης και Ισχύος Αιχμής του Φ/Β Πάνελ	71

3.4.4 Επιλογή εμπορικού Φ/Β Πάνελ	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	77
Σύστημα Αποθήκευσης	77
4.1 Γενικά	77
4.1.1 Η Ανάγκη για Αποθήκευση	77
4.1.2 Μέθοδοι Αποθήκευσης	77
4.2 Συσσωρευτές	78
4.2.1 Γενικά	78
4.2.2 Τεχνολογίες Συσσωρευτών	79
4.2.3 Συσσωρευτές Μολύβδου Οξέος (Lead Acid)	80
4.3 Αυτονομία του Συστήματος	84
4.3.1 Γενικά	84
4.3.2 Διαστασιολόγηση	84
4.3.3 Πιθανότητα Μη Τροφοδοτούμενης Ενέργειας	85
4.4 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ	85
4.4.1 Περιγραφή	85
4.4.2 Διαστασιολόγηση Συσσωρευτή	86
4.4.3 Προσομοίωση	86
4.4.4 Επιλογή Εμπορικού Μοντέλου Συσσωρευτή	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	91
Συστήματα Ελέγχου	91
5.1 Γενικά	91
5.2 Έλεγχος Φόρτισης	92
5.2.1 Ρυθμιστές Φόρτισης	92
5.2.2 Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης	92
5.2.3 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)	96
5.2.4 Φόρτιση Συσσωρευτή	98
5.3 Έλεγχος Φορτίου	99
5.3.1 Γενικά	99
5.3.2 Πόλωση LED	99
5.3.3 Οδήγηση LED	100
5.3.4 Τοπολογίες Σύνδεσης LED	108
5.3.5 Ρύθμιση Φωτεινότητας	114
5.4 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ	121
5.4.1 Περιγραφή	121
5.4.2 Το Κύκλωμα των LEDs	122
5.4.3 Το Κύκλωμα Οδήγησης	124
5.4.4 Επιλογή Ρυθμιστή Φόρτισης	131
5.4.5 Ρύθμιση Φωτεινότητας	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	137
Σύνοψη	137
6.1 Συμπεράσματα	137
6.2 Προτάσεις Για Μελέτη	138
Βιβλιογραφία	139
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Φωτεινή πηγή	A-1
Πολικά Διαγράμματα	A-1
Συγκεντρωτικοί Πίνακες Φωτομετρικών Υπολογισμών	A-5
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Κύκλωμα Οδήγησης	B-1
Πίνακες υλικών	B-1
Λειτουργικά Χαρακτηριστικά	B-3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Με τον όρο, εξοικονόμηση ενέργειας, αναφερόμαστε σε όλες εκείνες τις δράσεις, η εφαρμογή των οποίων, οδηγεί στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, που απαιτείται για την ικανοποίηση κάποιας συγκεκριμένης ανάγκης, χωρίς ταυτόχρονη μείωση της ποιότητας ζωής, την οποία εξασφαλίζει η αποτελεσματική κάλυψη της ανάγκης αυτής. Σκοπός δηλαδή, των δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας, είναι τόσο η εκμετάλλευση εναλλακτικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και ο εντοπισμός και η αντιμετώπιση τυχόν σπατάλης ενέργειας, όσο και η διαρκής μελέτη και ο επαναπροσδιορισμός των ανθρωπίνων αναγκών και η προσαρμογή τους στις εκάστοτε συνθήκες.

Μια από τις σπουδαιότερες, και ταυτοχρόνως πιο ενεργοβόρες, ανάγκες του ανθρώπου, είναι η ανάγκη για φωτισμό, τόσο εσωτερικών, όσο και εξωτερικών χώρων. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ότι οι διάφορες εφαρμογές ηλεκτροφωτισμού, ευθύνονται για ένα ποσοστό μεγαλύτερο από το 20% της παγκοσμίως καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η μείωση των επιπέδων φωτισμού, τις περισσότερες φορές, δεν αποτελεί βιώσιμη λύση στο πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς τα αντίστοιχα όρια είναι αυστηρώς καθορισμένα και είναι αυτά που εξασφαλίζουν την ομαλή και αποτελεσματική διεξαγωγή των διαφόρων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, που απαιτούν την ύπαρξη τεχνητού φωτός. Δεδομένου, ωστόσο, του γεγονότος ότι, σήμερα, οι περισσότερες εφαρμογές φωτισμού ενσωματώνουν παλαιές, συμβατικές και ενεργοβόρες τεχνολογίες, υπάρχει αρκετά μεγάλο περιθώριο εφαρμογής δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας, με την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και την εφαρμογή της νεοαποκτηθείσας τεχνογνωσίας στον εν λόγω κλάδο. Η σχετικά αργή ανάπτυξη της τεχνολογίας στο χώρο του φωτισμού, δεν είχε αναδείξει, μέχρι προσφάτως, κάποια επαναστατική καινοτομία. Οι ραγδαίες εξελίξεις, ωστόσο, στην τεχνολογία των ημιαγωγών, η εμφάνιση των LEDs υψηλής ισχύος και η διαρκής βελτίωση των επιδόσεων τους, είναι πιθανώς προάγγελοι της αναμενόμενης επανάστασης στον κλάδο του φωτισμού, η οποία θα φέρει την αναθεώρηση των κλασικών πρακτικών και σε συνδυασμό με τη γενικότερη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και εξορθολόγηση των ανθρωπίνων αναγκών θα προσελκύσει το ενδιαφέρον της έρευνας και των αγορών στις δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας στο φωτισμό.

1.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας στο Φωτισμό

Όπως αναφέρθηκε, ο κλάδος του φωτισμού προσφέρεται για την εκτεταμένη εφαρμογή δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας. Κάθε περίπτωση παρουσιάζει τα δικά της ιδιόζοντα χαρακτηριστικά, αναλόγως με το αν η μελέτη αφορά φωτισμό, εσωτερικών ή εξωτερικών, κατοικήσιμων ή βιομηχανικών χώρων, αναλόγως με την τοποθεσία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες κ.ο.κ. Οι κεντρικοί άξονες, ωστόσο, για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας είναι κοινói σε κάθε περίπτωση και συνοψίζονται ως εξής:

- Υλοποίηση εξειδικευμένης και καταλλήλως παραμετροποιημένης μελέτης φωτισμού, αναλόγως με την εξεταζόμενη περίπτωση, με σκοπό τόσο την ικανοποίηση των αναγκών για φωτισμό, όσο και την αποφυγή περίσσειας φωτισμού, λόγω υπερδιαστασιολογήσεων του συστήματος.
- Όσο το δυνατόν αποδοτικότερη εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού, τόσο από αρχιτεκτονικής άποψης, όσο και από την άποψη εγκατάστασης έξυπνων, αυτόματων συστημάτων διαχείρισης του τεχνητού φωτισμού. Τέτοια συστήματα, ενσωματώνουν αισθητήρες φυσικού φωτισμού, αισθητήρες κίνησης και χρονοδιακόπτες και ελέγχουν το επίπεδο του τεχνητού φωτισμού, με κριτήριο, αφενός τη βέλτιστη αξιοποίηση του περιβάλλοντος φωτισμού και αφετέρου, το κατά πόσο και το πότε απαιτείται ο φωτισμός του εξεταζόμενου χώρου.
- Αντικατάσταση των φωτεινών πηγών παλαιάς τεχνολογίας, από λαμπτήρες νέας τεχνολογίας, υψηλής απόδοσης και μεγάλης διάρκειας ζωής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού και οι λαμπτήρες τεχνολογίας LED.
- Αντικατάσταση των ενεργοβόρων μαγνητικών κυκλωμάτων έναυσης (ballast) των λαμπτήρων εκκένωσης, με αντίστοιχα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Τα ηλεκτρονικά ballast προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι και 25%, επιτρέπουν τη σύνδεση μεγαλύτερου αριθμού λαμπτήρων και υποβάλλουν τους λαμπτήρες σε μικρότερες καταπονήσεις, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους.
- Εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για το σχεδιασμό και την υλοποίηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων φωτισμού.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται ο συνδυασμός των παραπάνω δράσεων, για το σχεδιασμό ενός έξυπνου και ενεργειακά αυτόνομου φωτιστικού με πεδίο εφαρμογής το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός αυτόνομου φωτιστικού με LEDs, εξοπλισμένο με φωτοβολταϊκό πλαίσιο και συσσωρευτή.

1.3 Αυτόνομο Σύστημα Φωτισμού

Η ιδέα της χρησιμοποίησης ενεργειακά αυτόνομων φωτιστικών, προέκυψε από την ανάγκη φωταγώγησης σημείων απομονωμένων και δύσκολα προσβάσιμων, στα οποία είτε δεν υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε αυτή είναι δύσκολη και δαπανηρή. Η ανάπτυξη, ωστόσο, της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας σε συνδυασμό με το γεγονός ότι, μια εφαρμογή νυχτερινού φωτισμού αποτελεί το ιδανικό φορτίο μιας φ/β γεννήτριας, δεδομένου του πλήρους ετεροχρονισμού μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, καθιστά την ιδέα ενός «φωτοβολταϊκού συστήματος φωτισμού», ελκυστική και συμφέρουσα ακόμα και σε περιπτώσεις όπου προϋπάρχει η υποδομή για σύνδεση στο δίκτυο. Η χρήση και άλλων πηγών ενέργειας, επιπλέον της ηλιακής, και η παράλληλη σύνδεση στο δίκτυο, συνθέτουν πιο πολύπλοκα υβριδικά συστήματα φωτισμού τα οποία έχουν επίσης αρχίσει να κάνουν την εμφάνισή τους στην αγορά.

Όπως κάθε υβριδικό σύστημα ενέργειας, έτσι και το αυτόνομο σύστημα φωτισμού, μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερα επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία αποτελούν τα βασικά δομικά του συστατικά:

- 1 **Το Φορτίο:** Ο λόγος ύπαρξης ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, είναι η κάλυψη κάποιας ενεργειακής ανάγκης. Η ικανοποίηση της ανάγκης αυτής επιτυγχάνεται με την τροφοδότηση ενέργειας σε κάποιο υποσύστημα, το οποίο καλούμε φορτίο. Στην περίπτωση του αυτόνομου φωτιστικού, το φορτίο είναι η χρησιμοποιούμενη φωτεινή πηγή και η ανάγκη που το σύστημα καλείται να καλύψει, είναι αυτή για αποτελεσματικό φωτισμό. Η σωστή διαστασιολόγηση και ο σχεδιασμός του φορτίου εξασφαλίζουν την επίτευξη του απώτερου στόχου του συστήματος.
- 2 **Η Πηγή Ενέργειας:** Η πηγή, από την οποία το σύστημα αντλεί την απαραίτητη ενέργεια, και η μορφή της ενέργειας την οποία αυτή παρέχει, καθορίζουν το είδος του υποσυστήματος που πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να δεσμευτεί η ενέργεια αυτή και να μετατραπεί σε αξιοποιήσιμη μορφή. Στην περίπτωση του αυτόνομου φωτιστικού, η πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος, και δεσμεύεται με τη βοήθεια φ/β πλαισίων.
- 3 **Το Σύστημα Αποθήκευσης:** Κάθε υβριδικό σύστημα ενέργειας θα πρέπει, εκτός από το να παράγει ενέργεια, να είναι σε θέση και να αποθηκεύει τυχόν περίσσεια αυτής, προκειμένου να μπορεί να τη διοχετεύσει στο φορτίο όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής. Στην περίπτωση που η κατανάλωση είναι ετεροχρονισμένη σε σχέση με την παραγωγή, η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι εξαιρετικά μεγάλης σημασίας.
- 4 **Τα Συστήματα Ελέγχου:** Τα διάφορα υποσυστήματα ελέγχου του υβριδικού συστήματος, συντονίζουν τη λειτουργία των επιμέρους συστημάτων και ευθύνονται για την αποδοτική και αποτελεσματική λειτουργία του συνολικού συστήματος.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, επιχειρείται η λεπτομερής ανάλυση των επιμέρους συστημάτων, με σκοπό την παραμετροποίηση του σχεδιασμού ενός αυτόνομου συστήματος φωτισμού και τον καθορισμό όλων των απαραίτητων συνιστωσών για την πρακτική του υλοποίηση. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν, εφαρμόζονται σε αντίστοιχη μελέτη περίπτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Το Φορτίο

2.1 Περιγραφή του φορτίου

Σαν φορτίο ορίζουμε την ηλεκτρική ισχύ που πρέπει να καταναλωθεί από το σχεδιαζόμενο σύστημα, για κάποιο χρονικό διάστημα, προκειμένου να ικανοποιήσει μια συγκεκριμένη ανάγκη του καταναλωτή.

Το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας είναι ο προσδιορισμός του φορτίου, το οποίο θα δύναται να εξυπηρετηθεί από το σύστημα. Το ηλεκτρικό φορτίο, η ζητούμενη δηλαδή ισχύς, θα πρέπει να μπορεί να καλυφθεί ανά πάσα στιγμή, και για τόσο χρονικό διάστημα όσο επιβάλλεται για την επαρκή κάλυψη των αναγκών του καταναλωτή.

Στην προκειμένη περίπτωση, το υπό μελέτη σύστημα καλείται να τροφοδοτήσει κάποια πηγή φωτεινής ακτινοβολίας, προκειμένου να καλύψει την ανάγκη για το φωτισμό δρόμων, πλατειών, υπαίθριων χώρων στάθμευσης και άλλων εξωτερικών χώρων.

Ο φωτισμός θα πρέπει να επιτυγχάνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αποδοτικός και να ικανοποιεί τις διεθνείς προδιαγραφές και τα πρότυπα που έχουν τεθεί για το φωτισμό εξωτερικών χώρων.

Στο παρόν κεφάλαιο θα προσδιοριστούν

- Οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται κατά το φωτισμό ενός δρόμου
- Το είδος της φωτεινής πηγής που θα χρησιμοποιηθεί
- Ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί για τη διαμόρφωση της φωτεινής πηγής και το κόστος αυτού
- Η συνολική ισχύς που καταναλώνεται από τη φωτεινή πηγή

2.2 Φωτισμός δρόμων και εξωτερικών χώρων

2.2.1 Γενικά

Η πρώτη εφαρμογή φωτισμού δρόμων και εξωτερικών χώρων χρονολογείται στον 10^ο αιώνα μ. Χ. , όταν στην Cordoba της Ισπανίας εγκαταστάθηκαν λάμπες κηροζίνης κατά μήκος των κεντρικών δρόμων. Έκτοτε, τόσο η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία όσο και ο ρόλος, αυτός καθ'αυτός, του φωτισμού έχουν υποστεί ραγδαία εξέλιξη.

Σήμερα ο φωτισμός δρόμων και εξωτερικών χώρων προσφέρει οδηγική ασφάλεια, οπτική άνεση για οδηγούς και πεζούς, αίσθημα αυξημένης ασφάλειας και παράλληλα καθιστά τους εξωτερικούς χώρους δεκτικούς και φιλικούς προς τον άνθρωπο κατά τη διάρκεια της νύχτας, δημιουργώντας μια ευχάριστη

ατμόσφαιρα και αναδεικνύοντας τα ιδιαίτερα γεωγραφικά, αρχιτεκτονικά και πολιτισμικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Έχει επίσης αποδειχθεί η συμβολή του φωτισμού στη μείωση της εγκληματικότητας, στην προώθηση των κοινωνικών δραστηριοτήτων και στην ανάπτυξη των τοπικών κοινωνιών.

Ενδεικτικά των παραπάνω, είναι τα αποτελέσματα σχετικών ερευνών που, μεταξύ άλλων, δείχνουν ότι ο σωστός φωτισμός δρόμων μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο ατυχημάτων κατά 50% και να προκαλέσει μείωση της εγκληματικότητας κατά 20%, ενώ παράλληλα αποτελεί έναν από τους βασικούς δείκτες ανάπτυξης μιας περιοχής.



Εικόνα 2-1: Φωτισμός Αυτοκινητόδρομου

2.2.2 Κατηγοριοποίηση δρόμων και Κλάσεις Φωτισμού

Η ανάγκη για αποτελεσματικό και αποδοτικό φωτισμό οδήγησε στη θέσπιση διεθνών προτύπων για το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων, τα οποία κατηγοριοποιούν τους δρόμους, τις πλατείες και τα πεζοδρόμια. Στην προκειμένη περίπτωση θα μας απασχολήσει το ευρωπαϊκό πρότυπο **ΕΛΟΤ CEN/TR 13201**.

Σύμφωνα με το εν λόγω πρότυπο, η αρχική κατηγοριοποίηση των δρόμων γίνεται με κριτήρια:

- Το είδος των οχημάτων που επιτρέπεται να διέρχονται της οδού
- Την ταχύτητα των οχημάτων που αποτελούν τον κύριο χρήστη της οδού
- Κατά πόσον η οδός χρησιμοποιείται από πεζούς

Αποτέλεσμα αυτής της πρώτης κατηγοριοποίησης αποτελούν οι διάφορες καταστάσεις φωτισμού όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1

Πίνακας 2-1: Καταστάσεις Φωτισμού

Ταχύτητα του κύριου χρήστη km/h	Τύπος χρηστών στην σχετική περιοχή			Περιπτώσεις (Καταστάσεις) φωτισμού
	Κύριος χρήστης	Άλλοι επιτρεπόμενοι χρήστες	Απαγορευμένοι χρήστες	
>60	Κυκλοφορία αυτοκινήτων		Αργά κινούμενα οχήματα, ποδηλάτες, πεζοί.	A1
		Αργά κινούμενα οχήματα	Ποδηλάτες, πεζοί.	A2
		Αργά κινούμενα οχήματα, ποδηλάτες.		A3
>30 και ≤ 60	Κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα	Ποδηλάτες, πεζοί.		B1
	Κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα, ποδηλάτες.	πεζοί.		B2
	Ποδηλάτες.	πεζοί.	κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα.	C1
>5 και ≤30	Ποδηλάτες.	πεζοί.	κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα.	C1
	Κυκλοφορία αυτοκινήτων, πεζοί.		Αργά κινούμενα οχήματα, πεζοί.	D1
		αργά κινούμενα οχήματα, Ποδηλάτες.		D2
	Κυκλοφορία αυτοκινήτων, ποδηλάτες.	Αργά κινούμενα οχήματα, πεζοί.		D3
	Κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα, Ποδηλάτες, πεζοί			D4
ταχύτητα βαδίσματος	Κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα, Ποδηλάτες, πεζοί			D4
	πεζοί.		Κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα, Ποδηλάτες.	E1
		Κυκλοφορία αυτοκινήτων, αργά κινούμενα οχήματα, Ποδηλάτες.		

Περαιτέρω κατηγοριοποίηση λαμβάνει υπόψιν παραμέτρους όπως:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (αριθμός λωρίδων, πλάτος, κόμβοι, διασταυρώσεις κτλ)
- Κυκλοφοριακή κίνηση
- Περιβαλλοντικοί και εξωγενείς παράγοντες

Οι παράμετροι αυτές παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στον Πίνακα 2-2

Πίνακας 2-2: Παράμετροι Κατηγοριοποίησης Κλάσεων Φωτισμού

Παράμετροι		Επιλογές
Περιοχή (γεωμετρικά χαρακτηριστικά)	Διαχωρισμός λωρίδων ή δρόμων	Ναι Όχι
	Τύπος διασταυρώσεων	Ανισόπεδοι κόμβοι Ισόπεδοι κόμβοι
	Αποστάσεις μεταξύ ανισόπεδων κόμβων Αποστάσεις μεταξύ γεφυρών	>3km ≤3km
	Πυκνότητα ισόπεδων κόμβων	<3 IK/km ≥3 IK/km
	Περιοχή σύγκρουσης	Όχι Ναι
	Γεωμετρικά μέτρα ήπιας κυκλοφορίας	Όχι Ναι
Κυκλοφοριακά δεδομένα	Κυκλοφοριακή ροή σε οχήματα ανά ημέρα	<4 000 4000 έως 7000 7000 έως 15000 15000 έως 25000 25000 έως 40000 >40000
	Κυκλοφοριακή ροή σε ποδηλάτα	Φυσιολογική Υψηλή
	Κυκλοφοριακή ροή πεζών	Φυσιολογική Υψηλή
	Δυσκολίες στην οδήγηση	Φυσιολογική Υψηλή
	Σταθμευμένα οχήματα	Δεν υπάρχουν Υπάρχουν
	Αναγνώριση προσώπων	Δεν απαιτείται Απαιτείται
	Εγκληματικότητα	Φυσιολογική Υψηλή
	Πολυπλοκότητα οπτικού πεδίου	Φυσιολογική Υψηλή
Περιβαλλοντικές και λοιπές εξωτερικές επιδράσεις	Υπάρχων Φωτισμός περιβάλλοντος	Υπεραστικός Αστικός Κέντρο πόλης
	Καιρικές συνθήκες	Στεγνό Υγρό

Ακολουθώντας τον αλγόριθμο που υποδεικνύει το πρότυπο EN 13201, παρουσίαση του οποίου δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης εργασίας, από το συνδυασμό των δύο πινάκων, προκύπτει η κατάταξη του υπό μελέτη δρόμου σε μία Κλάση Φωτισμού (lighting class).

Κάθε κλάση φωτισμού ορίζεται από ένα σύνολο φωτομετρικών προδιαγραφών και απαιτήσεων στόχος των οποίων είναι η ικανοποίηση των οπτικών αναγκών των χρηστών συγκεκριμένων τύπων δρόμου υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλειά τους κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κύριες κλάσεις φωτισμού και το πεδίο εφαρμογής κάθε μιας εξ' αυτών :

1. **Κλάσεις ME:** αναφέρονται σε οδηγούς μηχανοκίνητων οχημάτων, σε αυτοκινητόδρομους και εθνικές οδούς υψηλής κυκλοφορίας και μέσων και υψηλών ταχυτήτων.
Οι απαιτήσεις φωτισμού στις κλάσεις ME αφορούν τη μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος, τη γενική και τη διαμήκη ομοιομορφία της λαμπρότητας, την προσάξηση κατωφλίου της λαμπρότητας του περιβάλλοντος (Threshold Increment) και από το λόγο της φωτεινότητας του περιβάλλοντος χώρου (surround ratio).
2. **Κλάσεις CE:** αναφέρονται σε οδηγούς μηχανοκίνητων οχημάτων, σε δρόμους με ένα βαθμό πολυπλοκότητας, με διασταυρώσεις ,κυκλικές

διασταυρώσεις, χώρους αναμονής (πχ εμπορικοί δρόμοι). Βρίσκουν επίσης εφαρμογή σε πεζοδρόμια, υπόγειες διαβάσεις πεζών και ποδηλατοδρόμους. Οι απαιτήσεις φωτισμού στις κλάσεις CE αφορούν τη μέση οριζόντια ένταση φωτισμού και τη γενική ομοιομορφία της εντάσεως φωτισμού.

3. **Κλάσεις S και A:** αναφέρονται σε πεζούς και ποδηλάτες, σε πεζοδρόμια, ποδηλατοδρόμους, υπαίθριους χώρους στάθμευσης, λωρίδες έκτακτης ανάγκης και άλλες κατηγορίες, παράπλευρων σε αυτοκινητοδρόμους κύριας κυκλοφορίας, δρόμων, πλατείες, σχολικά προαύλια κ.ο.κ. Οι απαιτήσεις φωτισμού στις κλάσεις S και A αφορούν τη μέση οριζόντια ένταση φωτισμού, την ελάχιστη ένταση φωτισμού, τη μέση ημισφαιρική ένταση φωτισμού και τη γενική ομοιομορφία αυτής.
4. **Κλάσεις ES:** πρόκειται για πρόσθετες κλάσεις φωτισμού οι οποίες αναφέρονται σε περιπτώσεις στις οποίες ο δημόσιος φωτισμός κρίνεται απαραίτητος για την αναγνώριση προσώπων και αντικειμένων καθώς και σε περιοχές με αυξημένη εγκληματικότητα. Οι απαιτήσεις φωτισμού στις κλάσεις ES αφορούν την ελάχιστη ημικυλινδρική ένταση φωτισμού.
5. **Κλάσεις EV:** πρόκειται για πρόσθετες κλάσεις φωτισμού οι οποίες αναφέρονται σε περιπτώσεις όπου οι κάθετες επιφάνειες πρέπει να είναι ορατές, (διόδια, interchange areas). Οι απαιτήσεις φωτισμού στις κλάσεις EV αφορούν την ελάχιστη ένταση φωτισμού κάθετου επιπέδου.

2.2.3 Ορισμός φωτομετρικών μεγεθών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι διάφορες απαιτήσεις για το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων ποσοτικοποιούνται μέσω συγκεκριμένων φωτομετρικών μεγεθών. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια :

- **Λαμπρότητα L (cd/m²):** ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής έντασης μιας πηγής στην κατεύθυνση του παρατηρητή, προς το εμβαδόν της επιφάνειας της πηγής το οποίο βλέπει ο παρατηρητής. Χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποσότητα του φωτός που φεύγει (εκπομπή ή ανάκλαση) από μια επιφάνεια προς μια ορισμένη κατεύθυνση.
- **Ένταση φωτισμού E (lux):** ορίζεται ως ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής που προσπίπτει κάθετα σε μια στοιχειώδη επιφάνεια, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής. Χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποσότητα του φωτός που προσπίπτει σε μια επιφάνεια.
- **Γενική ομοιομορφία της Λαμπρότητας U₀:** ορίζεται ως ο λόγος της ελάχιστης τιμής προς τη μέση τιμή της λαμπρότητας σε μια επιφάνεια. Αντιστοίχως ορίζεται η ομοιομορφία της έντασης φωτισμού.
- **Διαμήκης ομοιομορφία της Λαμπρότητας U_i:** ορίζεται ως ο μικρότερος λόγος L_{min}/L_{max} σε ευθείες παράλληλες προς τον άξονα της οδού.

- **Threshold Increment TI (%)**: Αποτελεί μέτρο της απώλειας ορατότητας που οφείλεται στη θάμβωση Ανικανότητας(disability glare) η οποία μπορεί να προκαλείται από τα φωτιστικά της εγκατάστασης
- **Surround Ratio SR**: είναι ο δείκτης που αναφέρεται στην ικανότητα των οδηγών και των πεζών να διακρίνουν ανθρώπους και αντικείμενα παραπλεύρως του δρόμου.
- **Ημισφαιρική Ένταση Φωτισμού E_{hs} (lux)**: ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής σε ένα στοιχειώδες ημισφαίριο με οριζόντια βάση, προς το εμβαδόν του ημισφαιρίου αυτού.
- **Ημικυλινδρική Ένταση Φωτισμού E_{sc} (lux)**: ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής σε μια στοιχειώδη ημικυλινδρική επιφάνεια, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής.
- **Ένταση Φωτισμού κάθετου επιπέδου E_v (lux)**: Ένταση φωτισμού σε κάθετο επίπεδο.

Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζονται οι φωτομετρικές απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού ME

Πίνακας 2-3: Φωτομετρικές Προδιαγραφές Κλάσεων Φωτισμού ME

Class	Road luminance for dry road surface			Threshold increment	Lighting of surroundings
	L_m in cd/m ² [mini. value, maint. factor]	U_0 [min. value]	U_l [min. value]	TI in % [max. value]	SR [min. value]
ME1	2,0	0,4	0,7	10	0,5
ME2	1,5	0,4	0,7	10	0,5
ME3a	1,0	0,4	0,7	15	0,5
ME3b			0,6		
ME3c			0,5		
ME4a	0,75	0,4	0,6	15	0,5
ME4b			0,5		
ME5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
ME6	0,3	0,35	0,4	15	-

2.3 Συμβατικές Πηγές Φωτισμού

2.3.1 Γενικά

Χάρη στη διαρκή πρόοδο της τεχνολογίας, μας δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιούμε σαν πηγές φωτός, για τον ηλεκτροφωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων, ηλεκτρικούς λαμπτήρες των οποίων τα χαρακτηριστικά ολοένα και βελτιώνονται.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν έναν ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό λαμπτήρα είναι τα εξής :

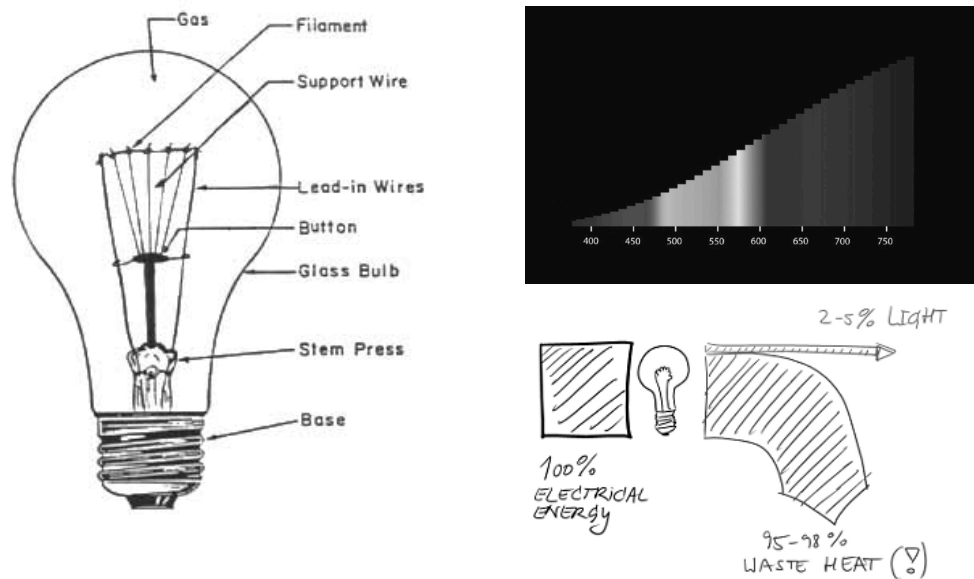
1. **Ονομαστική Τάση Λειτουργίας:** Είναι η τάση στην οποία πρέπει να συνδεθεί το κύκλωμα του λαμπτήρα. Μετριέται σε Volts.
2. **Ονομαστικό Ρεύμα Λειτουργίας:** Η ένταση του ρεύματος λειτουργίας του λαμπτήρα, όπου συνυπολογίζονται και οι πιθανές στραγγαλιστικές διατάξεις. Μετριέται σε Ampere.
3. **Ονομαστική Ισχύς:** Η καταναλισκόμενη από το λαμπτήρα ηλεκτρική ισχύς σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας. Μετριέται σε Watt.
4. **Φωτεινή Ροή:** Η συνολική φωτεινή ροή του λαμπτήρα. Εκφράζει τη ποσότητα της φωτεινής ισχύος που εκπέμπεται από το λαμπτήρα. Μετριέται σε lumen (lm).
5. **Απόδοση Φωτισμού:** Εκφράζει την ποσότητα της φωτεινής ισχύος που παράγεται από τον λαμπτήρα όταν αυτός καταναλώνει 1W ηλεκτρικής ισχύος. Μετριέται σε lm/W.
6. **Θερμοκρασία Χρώματος (CCT):** Αναφέρεται στη θερμοκρασία εκείνη στην οποία θα έπρεπε να βρεθεί ένα «μέλαν σώμα» ώστε να εκπέμψει ακτινοβολία χρώματος ίδιου, με αυτό του λαμπτήρα. Μετριέται σε Kelvin. Οι τιμές του CCT κυμαίνονται μεταξύ 2000 και 7000K. Χαμηλές τιμές CCT αντιστοιχούν σε θερμά χρώματα (μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κίτρινο), ενώ αύξηση του CCT συνεπάγεται ψυχρότερα χρώματα (μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε μπλέ).
7. **Δείκτης Χρωματικής Απόδοσης (CRI):** Εκφράζει το πόσο πιστά αποτυπώνονται τα χρώματα των αντικειμένων όταν αυτά φωτίζονται από το λαμπτήρα. Μετριέται σε κλίμακα επι τοις εκατό. Το φώς της ημέρας έχει CRI 100%.
8. **Δυνατότητα Dimming:** Δυνατότητα αυξομείωσης της φωτεινής ροής του λαμπτήρα.

9. **Διάρκεια Ζωής:** Ορίζουμε σαν «εκτιμώμενη διάρκεια ζωής» το χρόνο που απαιτείται μέχρις ότου πάψει να λειτουργεί το 50% ενός δείγματος λαμπτήρων. Ορίζουμε επίσης την «οικονομική διάρκεια ζωής» ως το χρόνο που απαιτείται μέχρις ότου ο λαμπτήρας χάσει ένα 30% της ικανότητάς του να παράγει φως και χρειάζεται αντικατάσταση. Μετριέται σε ώρες.

2.3.2 Τεχνολογίες Λαμπτήρων

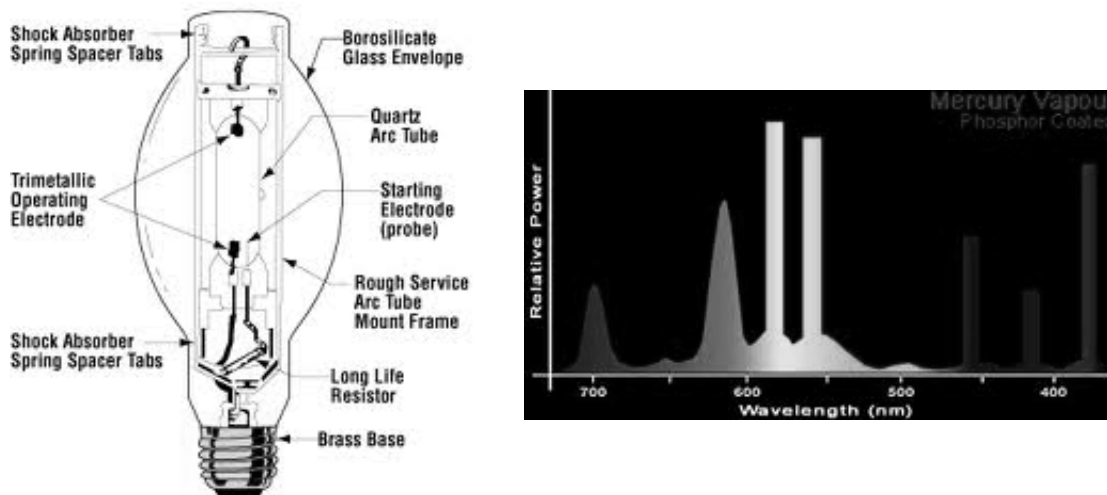
Κάθε μια από τις διάφορες τεχνολογίες λαμπτήρων παρουσιάζει τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία την καθιστούν καταλληλότερη για κάποιο εύρος εφαρμογών. Υπάρχουν έτσι, κάποιες τεχνολογίες λαμπτήρων οι οποίες είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς όσον αφορά το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων και η χρήση τους έχει καθιερωθεί στη συγκεκριμένη κατηγορία εφαρμογών. Τα εν λόγω είδη λαμπτήρων παρουσιάζονται στη συνέχεια [19]:

- ❖ **Λαμπτήρες Πυρακτώσεως:** Η λειτουργία τους βασίζεται στην χρήση περιελιγμένου νήματος βολφραμίου το οποίο κατά την πυράκτωσή του εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως παρουσιάζουν εξαιρετικά καλό CRI ενώ η χρήση τους είναι πολύ απλή αφού δεν απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός για την έναυση και τη ρύθμισή τους. Η χρήση των εν λόγω λαμπτήρων υπήρξε ευρέως διαδεδομένη στο παρελθόν, ωστόσο η χαμηλή τους απόδοση (12-18 lm/W) και η μικρή διάρκεια ζωής τους (<1000h) οδήγησε στη σταδιακή αντικατάστασή τους ενώ πλέον θεωρούνται ανεπιθύμητοι για νέες εγκαταστάσεις.



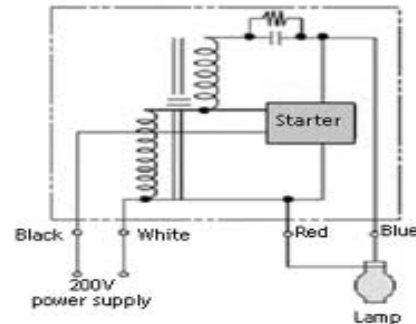
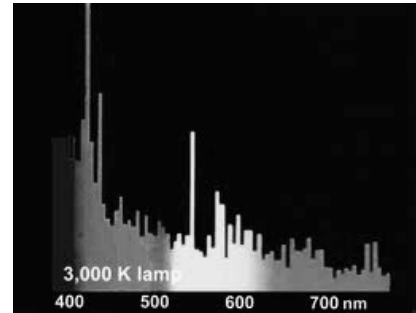
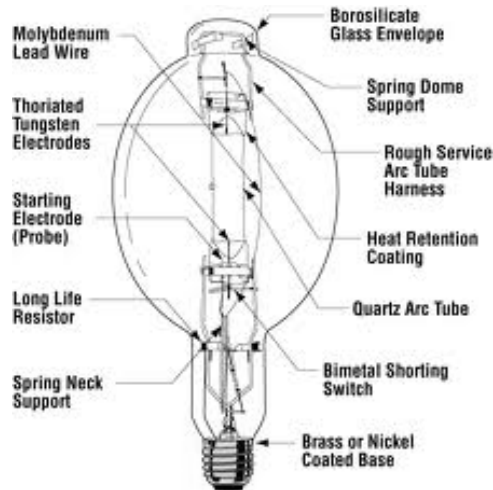
Εικόνα 2-2: Λαμπτήρας Πυρακτώσεως. Χαρακτηρίζεται από συνεχές φάσμα ακτινοβολίας και πολύ χαμηλή απόδοση.

- ❖ **Λαμπτήρες Ατμών Υδραργύρου Υψηλής Πίεσης:** Πρόκειται για λαμπτήρες εκκένωσης αερίου στους οποίους δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο διαμέσου ατμών υδραργύρου για την παραγωγή φωτός. Αποτελούν καλή εναλλακτική έναντι των λαμπτήρων πυράκτωσης, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση (35-65 lm/W) και αυξημένη διάρκεια ζωής (24000h). Για τη σύνδεση τους απαιτείται η χρήση ballast ενώ σε περίπτωση που αυτό είναι ενσωματωμένο η απόδοση του λαμπτήρα πέφτει σημαντικά. Το φως που παράγεται είναι ένα φωτεινό λευκό με αυξημένη περιεκτικότητα σε μπλέ και πράσινο λόγω της επίδρασης του υδραργύρου το οποίο δεν προσφέρει καλή απόδοση των χρωμάτων. Προσθήκη φωσφόρου στο εσωτερικό του λαμπτήρα βελτιώνει σημαντικά το CRI. Οι λαμπτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται κατά κόρον στο φωτισμό αθλητικών σταδίων και δρόμων.



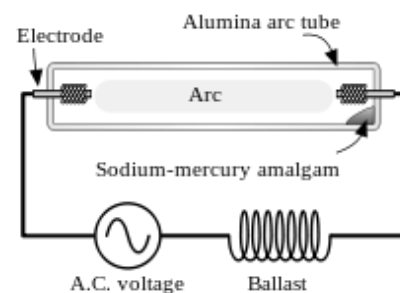
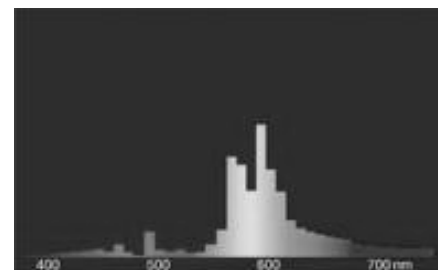
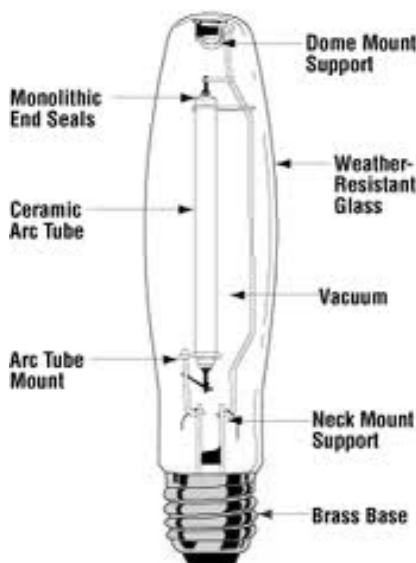
Εικόνα 2-3: Λαμπτήρας Ατμών Υδραργύρου. Η υψηλή Περιεκτικότητα σε πράσινο οφείλεται στην επίδραση του υδραργύρου.

- ❖ **Λαμπτήρας Μεταλλικών Αλογονιδίων:** Αποτελεί παραλλαγή του λαμπτήρα ατμών υδρογόνου. Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με τη διαφορά ότι εδώ η εκκένωση δημιουργείται διαμέσου ενός μίγματος ατμών υδραργύρου με μεταλλικά αλογονίδια. Η προσθήκη των μεταλλικών αλογονιδίων βελτιώνει το CRI καθώς και την απόδοση (75-100 lm/W) ενώ η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται μεταξύ 6 και 15 χιλιάδων ωρών. Και σε αυτή την περίπτωση επιβάλλεται η χρήση στραγγαλιστικού πηνίου.



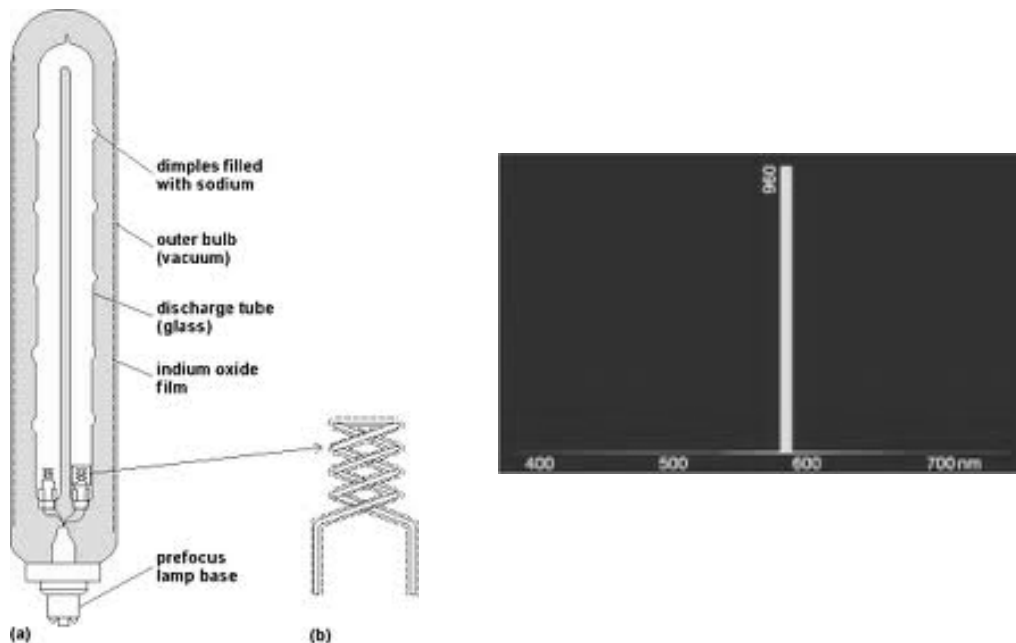
Εικόνα 2-4: Λαμπτήρας Μεταλλικών Αλογονιδίων.

- ❖ **Λαμπτήρας Νατρίου Υψηλής Πίεσης:** Οι εν λόγω λαμπτήρες αποτελούν την πιο δημοφιλή επιλογή για φωτισμό δρόμων υψηλής και μέσης κυκλοφορίας. Παρουσιάζουν υψηλή απόδοση (100-150lm/W), μέτριο CRI και ικανοποιητική διάρκεια ζωής (15-20 χιλιάδες ώρες), ενώ το παραγόμενο φως χαρακτηρίζεται από τη χρυσωπή απόχρωση του. Προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλή τάση που απαιτείται για την έναυση του λαμπτήρα χρησιμοποιούνται ειδικά ballasts.



Εικόνα 2-5: Λαμπτήρας Νατρίου Υψηλής Πίεσης.

- ❖ **Λαμπτήρες Νατρίου Χαμηλής Πίεσης:** Πρόκειται για τους πιο αποδοτικούς λαμπτήρες, με την απόδοσή τους να φτάνει έως και 200lm/W, ενώ παράλληλα είναι οι μοναδικοί λαμπτήρες των οποίων η απόδοση δεν μειώνεται, παρά ελάχιστα, με τη γήρανση. Η διάρκεια ζωής τους φτάνει τις 18 χιλιάδες ώρες. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η σχεδόν μονοχρωματική (κίτρινη) ακτινοβολία που παράγουν, περιορίζει τη χρήση τους σε εφαρμογές όπου η αποτύπωση των χρωμάτων δεν έχει ιδιαίτερη σημασία. Είναι κατάλληλοι για εξωτερικό φωτισμό σε περιοχές με ομίχλη ενώ βρίσκουν εφαρμογή και στο φωτισμό δρόμων και τούνελ.



Εικόνα 2-6: Λαμπτήρας Νατρίου Χαμηλής Πίεσης Χαρακτηρίζεται από πρακτικά, μονοχρωματική ακτινοβολία.

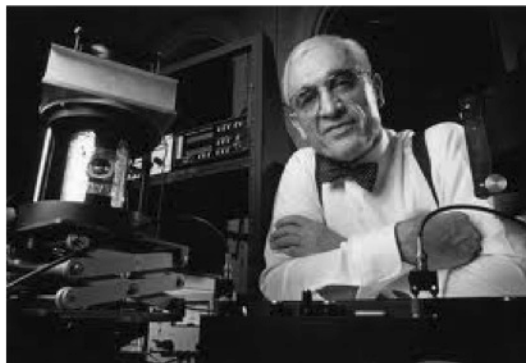
2.4 Φωτοεκπέμπουσες Δίοδοι LED

2.4.1 Γενικά

Μια ανερχόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στον τομέα του φωτισμού, είναι αυτή των LEDs. Οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι LED είναι ημιαγωγικές ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες παράγουν φωτεινή ακτινοβολία εκμεταλλευόμενες το φυσικό φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence). Η διαρκής εξέλιξη της τεχνολογίας των LEDs έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση του, ήδη μεγάλου, εύρους εφαρμογών τους, το οποίο εκτείνεται από την κατασκευή φωτεινών σηματοδοτών και οθονών οικιακών συσκευών ψυχαγωγίας, έως το γενικό φωτισμό και το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων.

2.4.2 Ιστορία

Η απαρχή της τεχνολογίας των LEDs χρονολογείται το 1907, όταν με την ανακάλυψη του φαινομένου της ηλεκτροφωταύγειας, από τον Βρετανό H.J. Round, τέθηκαν τα θεμέλια για την κατασκευή του πρώτου LED. Χρειάστηκε να περάσουν 54 χρόνια μέχρι να υπάρξουν τα πρώτα απτά αποτελέσματα. Το 1961 οι Robert Biard και Gary Pittman της Texas Instruments διαπιστώνουν ότι οι ημιαγωγοί αρσενικούχου γαλλίου εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία όταν διαρρέονται από ρεύμα. Ένα χρόνο αργότερα ο Nick Holonyak Jr της General Electric κατασκευάζει το πρώτο LED ορατής ακτινοβολίας, χρώματος κόκκινου, και ανακηρύσσεται ως ο «Πατέρας των LEDs». Ακολούθησαν τα πρώτα LEDs κίτρινου και πορτοκαλί χρώματος, ενώ παράλληλα τέθηκαν οι βάσεις για τη μαζική παραγωγή LEDs από την εταιρία Mosanto.



Εικόνα 2-7: Nick Holonyak Jr. , ο «Πατέρας των LEDs».

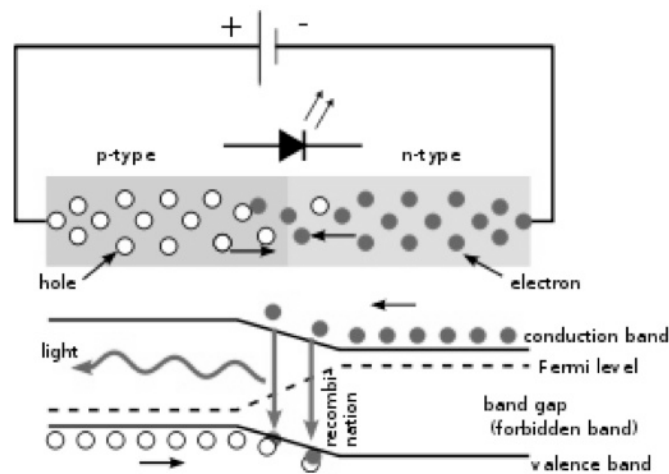
Τη δεκαετία του 1980 η εξέλιξη των LEDs συνεχίζεται, και έχει σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση του εκπεμπόμενου φωτός με ταυτόχρονη διατήρηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας. Η διαρκής αυτή εξέλιξη οδηγεί στην κατασκευή των πρώτων LEDs υψηλής φωτεινότητας μπλέ και πράσινου χρώματος από τη Nichia Corporation με φυσικό επακόλουθο την κατασκευή του πρώτου LED άσπρου χρώματος το 1995. Η απόδοση των LEDs συνεχίζει να αυξάνεται με ρυθμό διπλασιασμού κάθε 3 χρόνια και στις αρχές τις δεκαετίας του 2000 φτάνει την απόδοση των λαμπτήρων πυρακτώσεως. Το 2009, ερευνητές του πανεπιστημίου του Cambridge δημοσιεύουν μια νέα μέθοδο κατασκευής η οποία μειώνει το κόστος παραγωγής κατά 90% με αποτέλεσμα την έναρξη της «επανάστασης» στο φωτισμό με LED. Πλέον η νέα τεχνολογία τραβάει την προσοχή του κοινού και ανοίγει τον δρόμο προς τον οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον φωτισμό[19].



Εικόνα 2-8 : Διάφορες συσκευασίες εμπορικών LEDs

2.4.3 Τεχνολογία

Η αρχή λειτουργίας των LEDs βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας, κατά τη διάρκεια του οποίου ένα υλικό εκπέμπει φως ως συνέπεια της διαρροής του από ηλεκτρικό ρεύμα. Μια φωτοεκπέμπουσα δίοδος αποτελείται από ένα chip ημιαγωγικού υλικού, νοθευμένου με προσμίξεις ώστε να επιτευχθεί ο διαχωρισμός οπών και ηλεκτρονίων και να σχηματιστεί μια επαφή p-n. Όπως συμβαίνει και στις συμβατικές δίοδους, η διέλευση ρεύματος γίνεται εύκολα από την πλευρά-p (άνοδος) προς την πλευρά-n (κάθοδος) της επαφής ενώ εμποδίζεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οι φορείς του φορτίου, δηλαδή οι οπές και τα ηλεκτρόνια, ρέουν μέσα στην επαφή όταν παρουσιάζεται διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια της. Η επανασύνδεση ενός ηλεκτρονίου με μια οπή έχει σαν αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο να πέσει σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου. Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός και συνεπώς το χρώμα του, εξαρτάται από το ενεργειακό διάκενο των υλικών που σχηματίζουν την επαφή p-n.



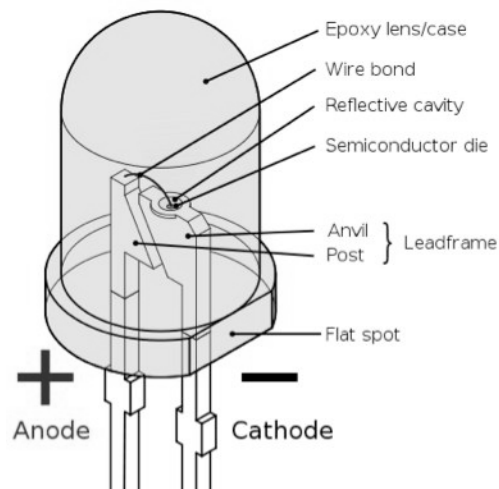
Εικόνα 2-9: Αρχή λειτουργίας των LEDs

Η μεγάλη ποικιλία υλικών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φωτοδίοδων επιτρέπει την παραγωγή φωτός σε όλο το φάσμα της ορατής ακτινοβολίας. Η παραγωγή λευκού φωτός επιτυγχάνεται με την προσθήκη φωσφόρου σε LED μπλέ φωτός.

Σήμερα κάποια από τα πιο δημοφιλή υλικά για την κατασκευή LEDs είναι τα νιτρίδια ινδίου και γαλλίου (InGaN) και τα φωσφίδια ινδίου, γαλλίου και αλουμινίου (InGaAlP).

Τα βασικά στοιχεία της κατασκευαστικής διαμόρφωσης ενός τυπικού LED είναι τα εξής:

- **semiconductor die:** Η ημιαγωγική επαφή p-n που συνδέεται με τους ακροδέκτες ενός μολύβδινου πλαισίου.
- **lead frame :** Το μολύβδινο πλαίσιο που στηρίζει την ημιαγωγική επαφή.
- **Encapsulation epoxy:** Προστατεύει την επαφή και βοηθάει στη διασπορά του φωτός.
- **Anvil & post:** Οι δύο ακροδέκτες του μολύβδινου πλαισίου που συγκρατεί την επαφή.



Εικόνα 2-10: Τα συστατικά στοιχεία ενός LED

2.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των LEDs

Όπως όλες οι τεχνολογίες λαμπτήρων, έτσι και τα LEDs παρουσιάζουν κάποια θετικά και κάποια αρνητικά στοιχεία.

Πιο συγκεκριμένα, τα πλεονεκτήματα των φωτοδιόδων συνοψίζονται ως εξής :

1. **Απόδοση:** Η φωτεινή απόδοση των LEDs βαίνει διαρκώς αυξανόμενη έχοντας ξεπεράσει κατά πολύ αυτήν των λαμπτήρων πυράκτωσης, ενώ είναι πλέον συγκρίσιμη με αυτή των λαμπτήρων φθορισμού, ξεπερνώντας τα 100lm/W. Μέχρι σήμερα επιβεβαιώνεται «ο νόμος του Haitz» σύμφωνα με τον οποίο η απόδοση των LEDs διπλασιάζεται κάθε 3 χρόνια.
2. **Μέγεθος:** Τα LEDs μπορούν να κατασκευαστούν σε πολύ μικρά μεγέθη, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά εύχρηστα.
3. **Διάρκεια ζωής:** Η διάρκεια ζωής των LEDs εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το ρεύμα οδήγησής τους και από την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κατά τη λειτουργία τους. Σωστή οδήγηση και απαγωγή θερμότητας μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά 30% μετά από 60000h. Αναλόγως με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία η διάρκεια αυτή μπορεί να αυξηθεί και περαιτέρω.
4. **Ανθεκτικότητα:** Το γεγονός ότι τα LED είναι συσκευές στερεάς κατάστασης τα καθιστά εξαιρετικά ανθεκτικά σε μηχανικές καταπονήσεις.
5. **Dimming :** Τα LEDs επιτρέπουν πολύ εύκολη ρύθμιση της φωτεινότητας τους με ηλεκτρονικό τρόπο.
6. **Cycling:** Τα LEDs είναι ιδανικά για εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται διαρκείς εναύσεις και διακοπές δεδομένου, αφενός, ότι αυτές δεν επηρεάζουν τη λειτουργία τους και τη διάρκεια ζωής τους και αφετέρου

ότι ο χρόνος επανέναυσης τους είναι πολύ μικρός, σε αντίθεση για παράδειγμα με τους λαμπτήρες φθορισμού.

7. **Φιλικά προς το περιβάλλον:** Προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας ενώ παράλληλα δεν περιέχουν τοξικές ουσίες όπως μόλυβδο και υδράργυρο.

Αντιστοίχως, τα μειονεκτήματα των LEDs συνοψίζονται στη συνέχεια:

1. **Υψηλό κόστος:** Τη δεδομένη στιγμή το κόστος των LEDs είναι πιο ψηλό από το αντίστοιχο των περισσότερων συμβατικών πηγών φωτισμού. Μέχρι το 2015 ωστόσο, το κόστος προβλέπεται να πέσει στα 2\$/klm.
2. **Εξάρτηση από τη θερμοκρασία:** Η απόδοση και η σωστή λειτουργία των LEDs εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία.
3. **Λαμπερτιανή κατανομή:** Σε αντίθεση με άλλες φωτεινές πηγές, τα LEDs δεν προσομοιάζουν σημειακή πηγή με σφαιρική κατανομή, αλλά η δέσμη φωτός τείνει να είναι περισσότερο κατευθυντική. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία τη χρήση πρόσθετων οπτικών σε εφαρμογές φωτισμού μεγάλων επιφανειών.

2.4.5 Φωτισμός δρόμων και εξωτερικών χώρων με LED

Με τη σταδιακή εξέλιξη της τεχνολογίας των LEDs άρχισε να διαφαίνεται η δυνατότητα εφαρμογής τους στο φωτισμό μεγάλων επιφανειών. Προέκυψε έτσι ένα νέο πεδίο εφαρμογών, στο οποίο αναφερόμαστε με τον όρο Solid State Lighting, και περιλαμβάνει το γενικό φωτισμό, το φωτισμό εσωτερικών χώρων, το διακοσμητικό και αρχιτεκτονικό φωτισμό καθώς και το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων, με τη χρήση LEDs. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του εν λόγω τομέα έπαιξε η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη, δεδομένου ότι ο φωτισμός καταλαμβάνει ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των ηλεκτρικών καταναλώσεων που σχετίζονται με τις ανθρώπινες ανάγκες και δραστηριότητες. Η διαρκώς αυξανόμενη απόδοση και η μεγάλη διάρκεια ζωής είναι τα δυο χαρακτηριστικά που προκρίνουν το φωτισμό στερεάς κατάστασης ως την ιδανικότερη λύση για βιώσιμο φωτισμό.

Όσον αφορά, το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων, τα LEDs είναι πλέον σε θέση να ικανοποιήσουν αλλά και να υπερβούν όλες τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές και τις φωτοτεχνικές απαιτήσεις, ενώ παράλληλα ένα σύνολο χαρακτηριστικών τους, καθιστά τη χρήση τους μια εξαιρετικά αξιόλογη επιλογή:

- ✓ Μεγάλη και προβλέψιμη διάρκεια ζωής
 - Μεγάλο διάστημα μεταξύ προγραμματισμένων συντηρήσεων
 - Χαμηλό κόστος συντήρησης
- ✓ Αξιοπιστία
 - Αυξημένη οδική ασφάλεια
- ✓ Χαμηλή κατανάλωση
- ✓ Dimming
 - Ρύθμιση σε συγκεκριμένα επίπεδα φωτισμού
 - Μείωση κατανάλωσης και περιττού φωτισμού

- ✓ Μικρό μέγεθος
 - Μικροί, συμπαγείς και εύχρηστοι λαμπτήρες
- ✓ Υψηλός δείκτης CRI
 - Καλή απόδοση χρωμάτων
- ✓ Μεγάλο εύρος θερμοκρασιών χρώματος
- ✓ Ταχεία έναυση και διακοπή λειτουργίας
- ✓ Ανθεκτικότητα και μηχανική αντοχή
- ✓ Συμβατά με την οδηγία περί περιορισμού επικίνδυνων υλικών (RoHS)
 - Εύκολη ανακύκλωση
- ✓ Υψηλή ποσότητα εκπεμπόμενου φωτός ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες
- ✓ Χαμηλότερη προσέλκυση εντόμων
 - Χαμηλότερο κόστος συντήρησης
- ✓ Εύκολος περιορισμός θάμβωσης
 - Μειωμένη «ρύπανση νυχτερινού φωτισμού»

Πίνακας 2-4: Σύγκριση συμβατικών πηγών φωτισμού, με την οικογένεια LED, Golden Dragon της Osram

Lamp Type	Power consumption [W]	Luminous Flux [x 1000 lm]	Efficacy [lm/W]	CRI (color reproduction index)	Lifetime [x 1000 hr]
High Pressure Sodium	35 - 400	1.3 - 55	39 - 140	20 - 40	24
Metal Halide	35 - 400	3.4 - 32	70 - 90	60 - 90	6
High Pressure Mercury	50 - 400	1.8 - 22	35 - 90	40 - 60	8 - 12
Low Pressure Sodium	18 - 90	1.8 - 15	100 - 160	<20	16 - 30
Compact Fluorescent	5 - 55	0.25 - 4.8	50 - 88	40 to >90	9
LED (Golden DRAGON with Oval lens, 100pcs. during operation at 350mA)	112	7	55	80	10 - 50 (50% light decrease)

Ένα επιπλέον στοιχείο που συνηγορεί στη χρήση των LEDs για το φωτισμό δρόμων είναι η σύγκριση τους με τις συμβατικές τεχνολογίες, της οποίας τα αποτελέσματα προκρίνουν σε πολλές περιπτώσεις την άμεση αντικατάσταση των υπαρχόντων λαμπτήρων.



Εικόνα 2-11: Φωτιστικά δρόμων και εξωτερικών χώρων με LEDs

2.5 Σχεδιασμός της πηγής

2.5.1 Γενικά

Όπως είδαμε, η σχεδίαση της φωτεινής πηγής ενός φωτιστικού δρόμου, θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα την ικανοποίηση συγκεκριμένων φωτομετρικών απαιτήσεων. Τα βασικότερα μεγέθη που ορίζουν τις απαιτήσεις αυτές είναι, η λαμπρότητα του οδοστρώματος και η ένταση φωτισμού σε αυτό, που αναφέρονται στη φωτεινή ισχύ του φωτιστικού, και η ομοιομορφία της λαμπρότητας και της έντασης φωτισμού, που αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η φωτεινή ισχύς στο οδόστρωμα. Έτσι, στην περίπτωση σχεδίασης φωτιστικού με LEDs, η απαίτηση για συγκεκριμένα επίπεδα λαμπρότητας και έντασης φωτισμού, μεταφράζεται σε απαίτηση για συγκεκριμένο αριθμό LEDs συγκεκριμένης ισχύος. Αντιστοίχως, η απαίτηση για συγκεκριμένα επίπεδα ομοιομορφίας, μεταφράζεται σε απαίτηση για συγκεκριμένη κατανομή της φωτεινής έντασης των χρησιμοποιούμενων LEDs.



Σχήμα 2-1: Διαδικασία σχεδιασμού του πολικού διαγράμματος και επιλογής του απαιτούμενου αριθμού LEDs του φωτιστικού.

Στην παρούσα εργασία, επιδιώκεται, ο σχεδιασμός της φωτεινής πηγής να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις όσο το δυνατόν περισσότερων κλάσεων φωτισμού, προκειμένου το σχεδιαζόμενο φωτιστικό να δύναται να χρησιμοποιηθεί σε πολλές διαφορετικές κατηγορίες δρόμων καθώς και σε διάφορα σενάρια τοποθέτησης των ιστών. Για το λόγο αυτό, δίνεται έμφαση στην κάλυψη των απαιτήσεων ομοιομορφίας, με κατάλληλο σχεδιασμό του πολικού διαγράμματος του φωτιστικού, ενώ παράλληλα παραμετροποιείται ο αριθμός των απαιτούμενων LEDs ανά εφαρμογή και γίνεται προσπάθεια για ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης, με μείωση του ύψους των ιστών και αύξηση της μεταξύ τους απόστασης.

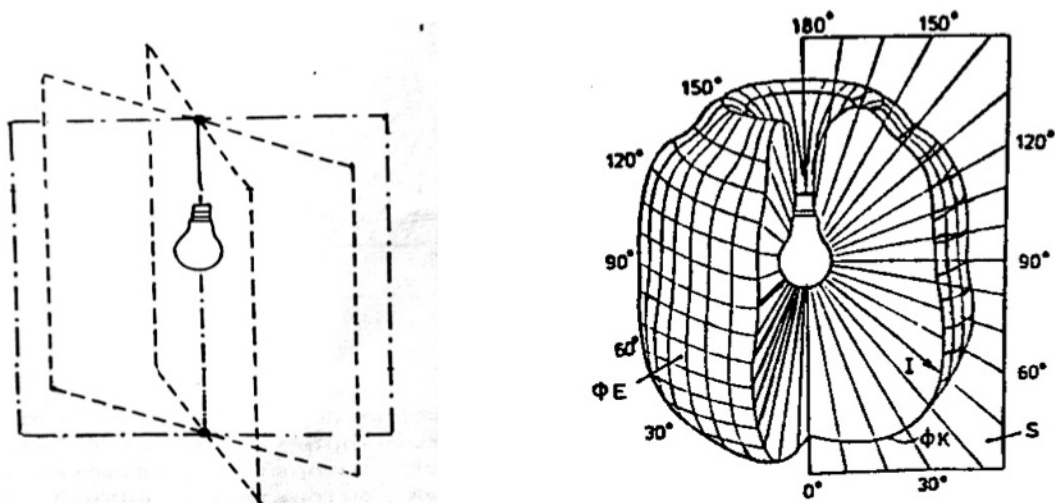
Τέλος, επιλέγεται η θερμοκρασία χρώματος της πηγής, με αντικειμενικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και άλλα κριτήρια και προσδιορίζεται η συνολική ισχύς και ενεργειακή κατανάλωση της φωτεινής πηγής.

Η επίδοση και η απόδοση της φωτεινής πηγής εξετάζονται μέσω της εφαρμογής της σε case studies μελετών φωτισμού, με τη βοήθεια του λογισμικού προσομοίωσης φωτισμού, **RELUX**.

2.5.2 Πολικό Διάγραμμα

Κάθε φωτεινή πηγή συνοδεύεται από τουλάχιστον ένα διάγραμμα πολικής κατανομής της φωτεινής της έντασης. Το διάγραμμα αυτό περιγράφει την κατανομή της φωτεινής έντασης σε ένα κατακόρυφο επίπεδο, του τρισδιάστατου χώρου, που διέρχεται από τον άξονα της φωτεινής πηγής και φωτίζεται από αυτή. Ο συνδυασμός όλων των πολικών διαγραμμάτων στα διάφορα κατακόρυφα επίπεδα που διέρχονται από την πηγή, συνθέτει μια τρισδιάστατη απεικόνιση της συνολικής κατανομής της φωτεινής έντασης, της πηγής, στο χώρο.

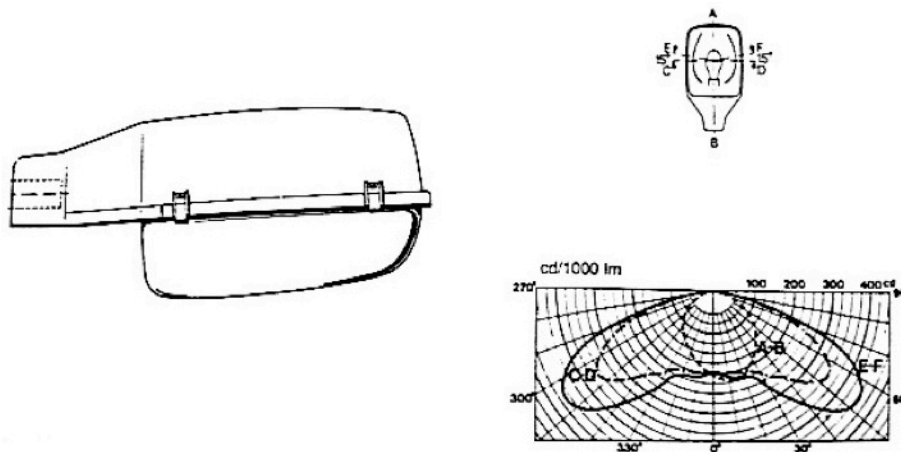
Μπορούμε λοιπόν, κατ' αυτόν τον τρόπο, να αντλήσουμε αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τη μορφή που θα έχει το εκπεμπόμενο φως, όταν αυτό προβληθεί πάνω στην επιφάνεια την οποία επιθυμούμε να φωτίσουμε.



Εικόνα 2-12: Συνδυασμός των πολικών διαγραμμάτων των διαφόρων κατακόρυφων επιπέδων

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές, ότι για την ικανοποίηση των διαφόρων απαιτήσεων διαφορετικών εφαρμογών φωτισμού, απαιτούνται κατάλληλα προσαρμοσμένα, στις εκάστοτε ανάγκες, πολικά διαγράμματα.

Σε μια εφαρμογή φωτισμού, εκτός από την κάλυψη των απαραίτητων προδιαγραφών, επιθυμούμε επίσης να πετύχουμε ποιοτικό φωτισμό με τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο και συνεπώς να ελαχιστοποιήσουμε τον αριθμό των απαιτούμενων φωτιστικών σωμάτων. Για να το πετύχουμε αυτό, στην περίπτωση που θέλουμε να φωτίσουμε επιφάνειες μεγάλου μήκους και μικρότερου πλάτους, όπως είναι για παράδειγμα ένας δρόμος, το φωτιστικό που θα επιλεγεί θα πρέπει να διαχέει το φως του κατά μήκος του διαμήκους άξονα του δρόμου. Για το λόγο αυτό, τα φωτιστικά δρόμων είναι συνήθως εφοδιασμένα με ειδικά σχεδιασμένο οπτικό εξοπλισμό, όπως φακούς και ανακλαστήρες, έτσι ώστε το φως να εκτρέπεται συμμετρικά προς τα δεξιά και τα αριστερά στη διεύθυνση του διαμήκους άξονα του δρόμου. Η δυνατότητα αυτή, εκτροπής του φωτός, αποτυπώνεται στο πολικό διάγραμμα του φωτιστικού, με την ύπαρξη δύο συμμετρικών λοβών στο κατακόρυφο επίπεδο που είναι παράλληλο με το διαμήκη άξονα του δρόμου και κάθετο προς το διαμήκη άξονα του φωτιστικού.



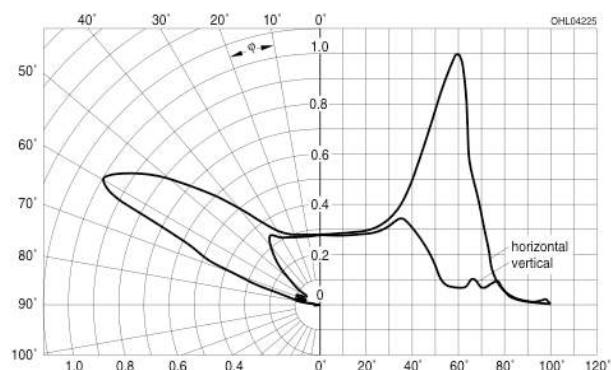
Εικόνα 2-13: Τυπικό πολικό διάγραμμα φωτιστικού δρόμων.

Η προβολή του εν λόγω πολικού διαγράμματος στη φωτιζόμενη επιφάνεια θα είναι ελλειπτικού σχήματος με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η αύξηση της απόστασης μεταξύ δύο φωτιστικών [3].

2.5.3 Επιλογή LED

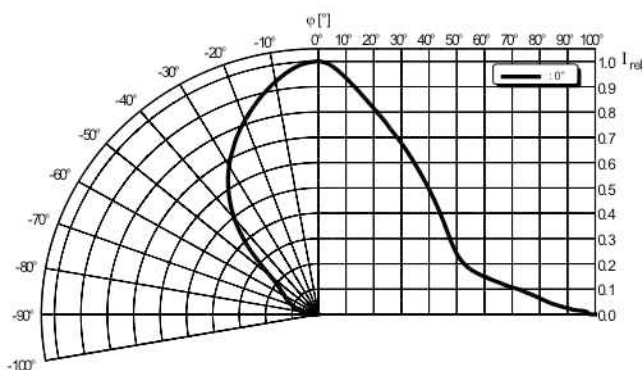
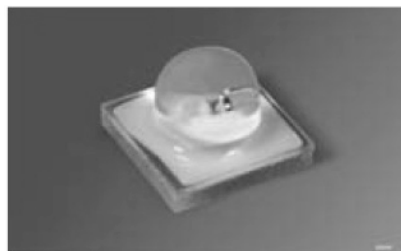
Τα εμπορικώς διαθέσιμα LEDs, στην πλειοψηφία τους είναι σχεδιασμένα να έχουν σφαιρικές κατανομές φωτεινής έντασης. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι οι κατασκευάστριες εταιρείες είναι κατά κόρον εταιρείες παραγωγής ημιαγωγών, οι οποίες δεν εξειδικεύονται στο σχεδιασμό οπτικών, και αφετέρου στο γεγονός ότι η χρήση των LEDs για το φωτισμό δρόμων δεν είναι ακόμα αρκετά διαδεδομένη. Υπάρχουν, ωστόσο, εταιρείες που κατασκευάζουν οπτικά συστήματα, φακούς, μάσκες φακών και ανακλαστήρες, ειδικά σχεδιασμένα για προσαρμογή στα διάφορα εμπορικά μοντέλα LEDs. Η χρήση των οπτικών αυτών προσφέρει μεγάλη σχεδιαστική ευελιξία, αλλά ταυτοχρόνως αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος της κατασκευής, ενώ παράλληλα εισάγει στο σύστημα τις επιπλέον απώλειες, στην φωτεινή ισχύ, τις οποίες συνεπάγεται η χρήση φακού. Σημειώνεται, μάλιστα, ότι συνήθως η χρήση του επιπλέον φακού θα πρέπει να γίνει πάνω από τον ήδη υπάρχοντα φακό που είναι ενσωματωμένος στο LED. Για τους λόγους αυτούς κρίνεται σκόπιμη η αναζήτηση μοντέλου LED που να φέρει, εκ κατασκευής, οπτικά σχεδιασμένα για φωτισμό δρόμων.

Η αντίστοιχη έρευνα αγοράς προκρίνει σαν ιδανική επιλογή το μοντέλο GoldenDragonOval+, της οικογένειας προϊόντων Golden Dragon Plus της OSRAM, το οποίο προσφέρει μεταξύ άλλων, υψηλή απόδοση, χαμηλή κατανάλωση, μεγάλη φωτεινή ισχύ, ευρύα γκάμα CCT, φέρει ενσωματωμένο φακό σιλικόνης και είναι σχεδιασμένο ειδικά για εφαρμογές φωτισμού δρόμων και εξωτερικών χώρων.



Εικόνα 2-14: LED τύπου-1, Golden Dragon Oval Plus

Η προσεκτική παρατήρηση του πολικού διαγράμματος του επιλεγθέντος μοντέλου LED, αποκαλύπτει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Το μειονέκτημα αυτό έγκειται στη μεγάλη ανισότητα που εμφανίζεται στην κατανομή της φωτεινής έντασης σε γωνίες μεταξύ 0° και 30° , σε σχέση με γωνίες μεγαλύτερες των 30° , όπου και εμφανίζεται, πολύ απότομα, το peak της φωτεινής έντασης. Το γεγονός αυτό ευνοεί τη δημιουργία σκοτεινών σημείων ακριβώς κάτω από το φωτιστικό, κάτι το οποίο δυσχεραίνει την επίτευξη της επιθυμητής ομοιομορφίας. Προκειμένου λοιπόν, να πετύχουμε την ομαλοποίηση της κατανομής της φωτεινής έντασης, θα επιχειρήσουμε τη σύνθεση του συνολικού πολικού διαγράμματος της πηγής, με το συνδυασμό δύο LEDs με «συμπληρωματικές» πολικές κατανομές. Για το λόγο αυτό επιλέγεται και το μοντέλο Oslon SSL 80, επίσης της OSRAM, το οποίο χαρακτηρίζεται από αυξημένη φωτεινή ισχύ και απόδοση, και συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό της φωτεινής του έντασης για γωνίες μεταξύ 0° και 30° .

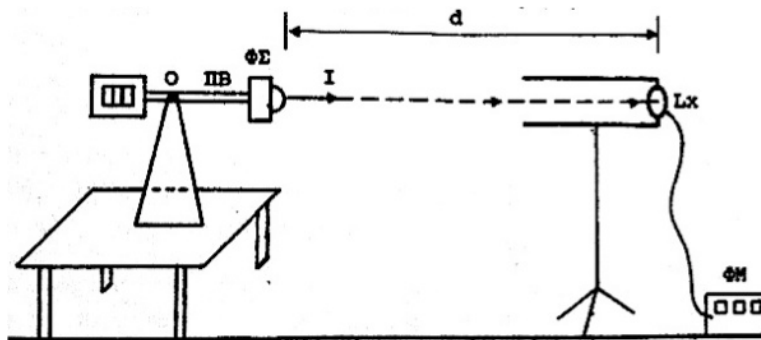


Εικόνα 2-15: LED τύπου-2 Oslon SSL 80

2.5.4 Σύνθεση Πολικού Διαγράμματος

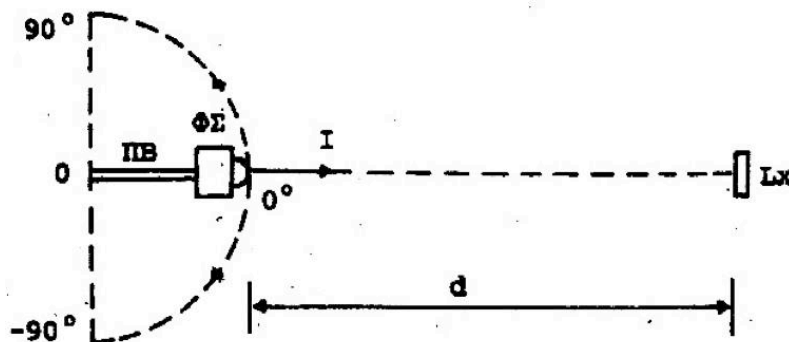
Όπως έγινε φανερό στην προηγούμενη ενότητα, η ανάγκη για συνδυασμό δυο διαφορετικών LEDs, στη σχεδίαση της φωτεινής πηγής, επιβάλλει την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τη σύνθεση δύο διαφορετικών πολικών διαγραμμάτων. Το νέο, ενιαίο πολικό διάγραμμα, που θα προκύπτει ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, θα αποτυπώνει τη συνολική κατανομή της φωτεινής έντασης της πηγής. Επιπλέον η μεθοδολογία αυτή θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν, το ποσοστό συμμετοχής, του κάθε ενός από τους δύο τύπους LEDs που θα χρησιμοποιηθούν, στη συνολική κατανομή. Μια τέτοια μεθοδολογία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η χάραξη του πολικού διαγράμματος ενός φωτιστικού σώματος (ΦΣ), γίνεται με τη βοήθεια μιας πειραματικής διάταξης αποτελούμενης από ένα φωτοστοιχείο (Lx), ένα περιστρεφόμενο βραχίονα (ΠΒ) και ένα όργανο μέτρησης Έντασης Φωτισμού (ΦΜ), όπως φαίνεται στην εικόνα (νούμερο εικόνας).



Εικόνα 2-16: Πειραματική διάταξη χάραξης πολικού διαγράμματος

Το φωτιστικό σώμα στερεώνεται στο βραχίονα ΠΒ, ο οποίος έχει τη δυνατότητα περιστροφής περί το κέντρο συμμετρίας Ο. Το φωτοστοιχείο Lx τοποθετείται κατακόρυφο και κάθετο προς τη Φωτεινή Ροή σε απόσταση d από το φωτιστικό σώμα. Ο βραχίονας ΠΒ περιστρέφεται, με κάποιο σταθερό βήμα γωνίας, στις γωνίες -90° έως 0° και 0° έως 90° , ή από -180° έως 180° , αναλόγως με τον τύπο του φωτιστικού και αν αυτός επιτρέπει την εκπομπή φώτος για γωνίες μεγαλύτερες των 90° , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-17. Με τη βοήθεια του οργάνου μέτρησης της Έντασης Φωτισμού, μετράται η ένταση φωτισμού E επί του φωτοστοιχείου, για κάθε θέση του περιστρεφόμενου φωτιστικού σώματος.



Εικόνα 2-17: Κάτοψη πειραματικής διάταξης χάραξης πολικού διαγράμματος

Στη συνέχεια, σύμφωνα με το «Φωτομετρικό Νόμο των Αποστάσεων», η φωτεινή ένταση I σε μια συγκεκριμένη γωνία, γ , υπολογίζεται ως

$$I_{\gamma}(cd) = E \cdot d^2 \quad (2.5.4.1)$$

Γνωρίζοντας τη συνολική φωτεινή ροή του φωτιστικού, Φ , μπορούμε να αναγάγουμε τις υπολογιζόμενες τιμές φωτεινής έντασης σε φωτεινή ροή 1000lumens, ως

$$I_{\gamma} \left(\frac{cd}{klm} \right) = \frac{1000 \cdot I_{\gamma}(cd)}{\Phi} \quad (2.5.4.2)$$

Σύμφωνα με τις ανηγμένες τιμές που προκύπτουν, χαράσσεται η καμπύλη που εκφράζει την κατανομή της φωτεινής έντασης συναρτήσει της γωνίας γ .

Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί περιστρέφοντας το φωτιστικό σώμα $\Phi\Sigma$ γύρω από τον άξονα συμμετρίας του, με κάποιο σταθερό βήμα γωνίας, προκειμένου να προσδιοριστεί η πολική κατανομή της φωτεινής έντασης στα διάφορα επίπεδα που διέρχονται από το $\Phi\Sigma$ και φωτίζονται από αυτό.

Στην περίπτωση την οποία μελετάμε, το ζητούμενο είναι, με δεδομένα τα πολικά διαγράμματα των δύο διαφορετικών LEDs, να παραγάγουμε το πολικό διάγραμμα που θα προκύψει από τη σύνθεσή τους. Για το σκοπό αυτό, μπορούμε να αντλήσουμε τις διάφορες τιμές $I_{\gamma_1} \left(\frac{cd}{klm} \right)$, από το πολικό διάγραμμα του LED τύπου-1 και τις αντίστοιχες τιμές $I_{\gamma_2} \left(\frac{cd}{klm} \right)$, από το πολικό διάγραμμα τύπου-2, για κάποια δεδομένη γωνία γ και κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο. Από τις τιμές αυτές, εύκολα υπολογίζονται οι τιμές φωτεινής έντασης που αντιστοιχούν στην πραγματική φωτεινή ροή του κάθε LED ως

$$I_{\gamma_1}(cd) = \frac{\Phi_1 \cdot I_{\gamma_1} \left(\frac{cd}{klm} \right)}{1000} \quad (2.5.4.3)$$

και

$$I_{\gamma_2}(cd) = \frac{\Phi_2 \cdot I_{\gamma_2} \left(\frac{cd}{klm} \right)}{1000} \quad (2.5.4.4)$$

Δεδομένου ότι οι διαστάσεις των LEDs και οι αποστάσεις μεταξύ τους, όταν αυτά θα τοποθετηθούν στο φωτιστικό, είναι πολύ μικρές σε σχέση με την απόσταση d στην οποία λαμβάνονται οι μετρήσεις έντασης φωτισμού, μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να εφαρμόσουμε την αρχή της επαλληλίας για να υπολογίσουμε τη συνολική ένταση φωτισμού, για δεδομένη γωνία και συγκεκριμένο επίπεδο, σε απόσταση d από το φωτιστικό, που προκαλείται από n_1 LEDs τύπου-1 και από n_2 LEDs τύπου-2. Έτσι, θεωρώντας κάθε φορά την επίδραση ενός μόνο LED και αγνοώντας τα υπόλοιπα, η ένταση φωτισμού σε απόσταση d θα είναι

$$E = \frac{I_{\gamma_1}(cd)}{d^2} \quad (2.5.4.5)$$

ή

$$E = \frac{I_{\gamma_2}(cd)}{d^2} \quad (2.5.4.6)$$

αναλόγως με τον τύπο του εκάστοτε LED. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της συνολικής έντασης φωτισμού που οφείλεται στα $n_1 + n_2$ LEDs, αθροίζουμε τις επιμέρους εντάσεις φωτισμού

$$E_{o\lambda\gamma} = \sum_{k=1}^{n_1+n_2} \frac{I_{\gamma_k}(cd)}{d^2} = n_1 \cdot \frac{I_{\gamma_1}(cd)}{d^2} + n_2 \cdot \frac{I_{\gamma_2}(cd)}{d^2} \quad (2.5.4.7)$$

από τις (2.5.4.3) και (2.5.4.4) προκύπτει

$$E_{o\lambda\gamma} = \frac{n_1 \cdot \Phi_1 \cdot I_{\gamma_1} \left(\frac{cd}{klm} \right) + n_2 \cdot \Phi_2 \cdot I_{\gamma_2} \left(\frac{cd}{klm} \right)}{1000 \cdot d^2} \quad (2.5.4.8)$$

Συνεπώς, η συνολική φωτεινή ένταση σε γωνία γ , σε κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο και η οποία αντιστοιχεί στην πραγματική, συνολική φωτεινή ροή του φωτιστικού, $\Phi_{o\lambda} = n_1 \cdot \Phi_1 + n_2 \cdot \Phi_2$, θα δίνεται ως

$$I_{o\lambda\gamma}(cd) = E_{o\lambda\gamma} \cdot d^2 = \frac{n_1 \cdot \Phi_1 \cdot I_{\gamma_1} \left(\frac{cd}{klm} \right) + n_2 \cdot \Phi_2 \cdot I_{\gamma_2} \left(\frac{cd}{klm} \right)}{1000} \quad (2.5.4.9)$$

Τελικά οι ανηγμένες τιμές σε φωτεινή ένταση 1000lumens, από τις οποίες προκύπτει το συνολικό πολικό διάγραμμα υπολογίζονται ως

$$I_{o\lambda\gamma} \left(\frac{cd}{klm} \right) = \frac{n_1 \cdot \Phi_1 \cdot I_{\gamma_1} \left(\frac{cd}{klm} \right) + n_2 \cdot \Phi_2 \cdot I_{\gamma_2} \left(\frac{cd}{klm} \right)}{n_1 \cdot \Phi_1 + n_2 \cdot \Phi_2} \quad (2.5.4.10)$$

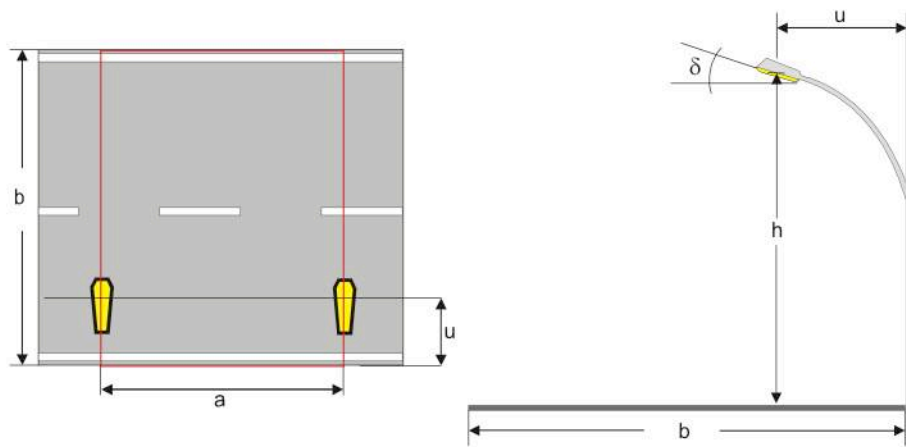
Τα n_1 και n_2 , στην εξίσωση (2.5.4.10) μπορούν να αντικατασταθούν από τις ποσότητες $\frac{100 \cdot n_1}{n_1+n_2}$ και $\frac{100 \cdot n_2}{n_1+n_2}$, αντιστοίχως, οι οποίες εκφράζουν το, επί τοις εκατό, ποσοστό συμμετοχής του καθενός εκ των δύο τύπων LED στη συνολική σύνθεση της φωτεινής πηγής.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία για κάθε γωνία γ , παράγουμε το συνολικό πολικό διάγραμμα σε κάποιο επίπεδο. Επαναλαμβάνοντας για όλα τα επίπεδα, σχηματίζουμε την τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της φωτεινής έντασης του φωτιστικού.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να παραγάγει το πολικό διάγραμμα οποιουδήποτε συνδυασμού των δύο διαφορετικών τύπων LED, με την προϋπόθεση φυσικά, ότι τα n_1 και n_2 είναι ακέραιοι, ώστε η σχεδίαση να έχει νόημα και να είναι πρακτικά υλοποιήσιμη.

2.5.5 Έλεγχος Απαιτήσεων και Επιλογή Πολικού Διαγράμματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κατά την επιλογή της βέλτιστης κατανομής της φωτεινής έντασης της πηγής, θα μας απασχολήσουν οι φωτομετρικές απαιτήσεις που έχουν να κάνουν με την ομοιομορφία της λαμπρότητας και της εντάσεως φωτισμού. Συγκεκριμένα, επιλέγεται μια τυπική διάταξη ελληνικού δρόμου, για την οποία γίνονται οι υπολογισμοί των φωτομετρικών μεγεθών, με τη βοήθεια του προγράμματος Η/Υ **RELUX**, για διάφορα ύψη των ιστών φωτισμού και για διάφορες αποστάσεις μεταξύ τους. Στη συνέχεια συντάσσεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας των υπολογισμένων τιμών και ελέγχεται η κάλυψη των προδιαγραφών για μερικές από τις πιο απαιτητικές κλάσεις φωτισμού, τις κλάσεις ΜΕ.



Εικόνα 2-18: Διάταξη τοποθέτησης ιστών φωτισμού

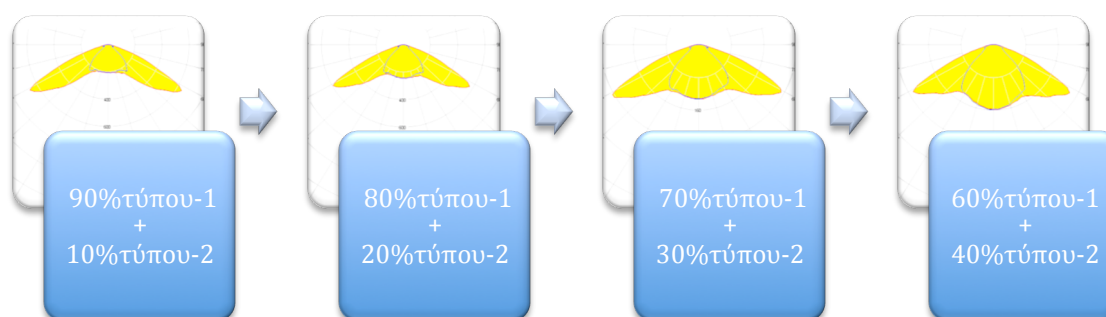
Τα βασικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση διάταξης έχουν ως εξής:

- **Πλάτος Δρόμου(b):** Ένα τυπικό πλάτος ελληνικού δρόμου είναι τα 8m.
- **Αριθμός Λωρίδων:** Τυπική περίπτωση είναι η ύπαρξη δύο λωρίδων κυκλοφορίας.
- **Ασφαλτικό Σκυρόδεμα:** Τυπική περίπτωση είναι η χρήση υλικού ανακλαστικότητας τάξης R3 με συντελεστή μέσης λαμπρότητας $q_0=0.08$.
- **Κλίση Φωτιστικού(δ):** Θεωρούμε μια κλίση 10° .
- **Outreach:** Η θέση της φωτεινής πηγής στον κάθετο άξονα του δρόμου. Θεωρούμε outreach 0.5m.
- **Διάταξη Φωτιστικών:** Θεωρείται ότι τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα από τη δεξιά πλευρά του δρόμου.
- **Φωτομετρικό Ύψος:** Το ύψος στο οποίο βρίσκεται η οπ πηγή. Θα το μεταβάλλουμε από 6 έως 12 μέτρα με βήμα μισού μέτρου.
- **Απόσταση μεταξύ Ιστών:** Θα μεταβάλλεται από 25 έως 35 μέτρα με βήμα 2.5 μέτρων.

Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους, θα υπολογίζονται για κάθε περίπτωση τα εξής φωτομετρικά μεγέθη:

1. Συνολική ομοιομορφία της Λαμπρότητας, U_0
2. Συνολική ομοιομορφία της Έντασης Φωτισμού, E_{U_0}
3. Διαμήκης ομοιομορφία της Λαμπρότητας, U_1
4. Threshold Increment, TI
5. Surround Ratio, SR

Η αυτοματοποίηση, με τη βοήθεια λογιστικών φύλλων EXCEL, της μεθοδολογίας σύνθεσης πολικών διαγραμμάτων, που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, μας δίνει τη δυνατότητα να εκτελέσουμε την παραπάνω διαδικασία υπολογισμού των φωτομετρικών μεγεθών για πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς των δύο διαθέσιμων μοντέλων LED. Η σύγκριση των συγκεντρωτικών πινάκων θα μας οδηγήσει στην επιλογή της καταλληλότερης λύσης. Οι δοκιμές θα ξεκινήσουν για πηγές με μεγάλη περιεκτικότητα σε LEDs τύπου-1 (GoldenDragonOval+) και μικρότερη περιεκτικότητα σε LEDs τύπου-2 (OSLON SSL). Σταδιακά και με βήμα 10% θα αυξάνουμε το ποσοστό συμμετοχής των LEDs τύπου-2 και αντιστοίχως θα μειώνουμε αυτό των LEDs τύπου-1.



Σχήμα 2-2: Διαφορετικοί συνδυασμοί των δύο τύπων LEDs

Από τους υπολογισμούς των φωτομετρικών μεγεθών, παρατηρούμε ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, η σχεδίαση της πηγής με μικρή περιεκτικότητα σε LEDs τύπου-2 παρουσιάζει προβλήματα στην επίτευξη των επιθυμητών επιπέδων ομοιομορφίας. Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν, όταν η περιεκτικότητα των LEDs τύπου-2, ξεπεράσει κατά πολύ αυτή των LEDs τύπου-1. Ως οι δύο επικρατέστεροι, προκρίνονται οι συνδυασμοί με περιεκτικότητες :

- 60% τύπου-1 + 40% τύπου-2 (συνδυασμός «60-40»)
- 50% τύπου-1 + 50% τύπου-2 (συνδυασμός «50-50»)

Οι συγκεντρωτικοί πίνακες με βάση τους οποίους γίνεται η σύγκριση των διαφόρων συνδυασμών, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Ενδεικτικά παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί πίνακες για τους δύο επικρατέστερους συνδυασμούς:

Πίνακας 2-5: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «60-40»

60% Oval +40% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,42	0,46	0,48	0,5	0,51	0,53	0,54	0,55	0,56
E_{U_0}	0,46	0,51	0,55	0,59	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71
U_1	0,66	0,68	0,71	0,71	0,73	0,74	0,76	0,77	0,76
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,42	0,46	0,48	0,49	0,52	0,53	0,55	0,56	0,57
E_{U_0}	0,43	0,48	0,53	0,57	0,61	0,63	0,66	0,68	0,7
U_1	0,6	0,62	0,66	0,68	0,7	0,71	0,73	0,74	0,75
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,41	0,45	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,56	0,58
E_{U_0}	0,39	0,45	0,5	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,68
U_1	0,52	0,57	0,6	0,63	0,66	0,69	0,7	0,71	0,73
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.81
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,39	0,43	0,47	0,48	0,5	0,52	0,54	0,55	0,57
E_{U_0}	0,35	0,41	0,47	0,52	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66
U_1	0,46	0,51	0,55	0,57	0,61	0,66	0,66	0,67	0,69
TI%	9.00	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,37	0,41	0,44	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57
E_{U_0}	0,31	0,37	0,42	0,48	0,52	0,56	0,6	0,62	0,65
U_1	0,4	0,45	0,49	0,52	0,56	0,59	0,62	0,65	0,66
TI%	10.00	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81

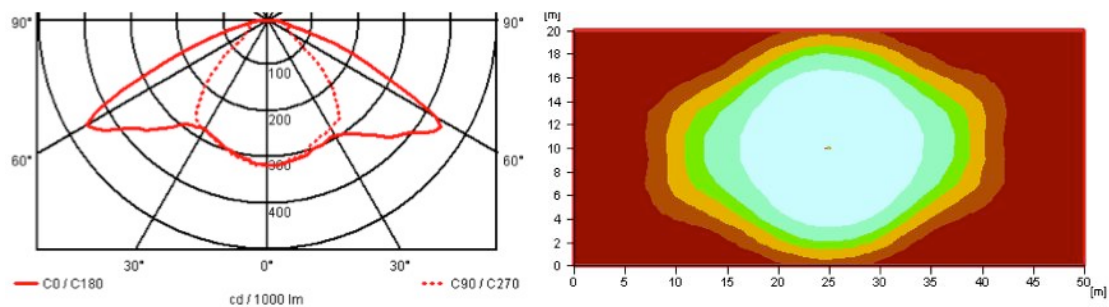
ME1 ME2 ME3a
 ME3b ME4a
 ME3c ME4b

Πίνακας 2-6: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «50-50»

50% Oval +50% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,4	0,43	0,46	0,48	0,5	0,52	0,53	0,54	0,55
E_{U_0}	0,41	0,46	0,5	0,53	0,57	0,6	0,62	0,64	0,66
U_1	0,73	0,78	0,8	0,8	0,81	0,81	0,79	0,78	0,78
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,39	0,43	0,46	0,48	0,5	0,52	0,54	0,55	0,56
E_{U_0}	0,38	0,43	0,47	0,51	0,54	0,57	0,6	0,62	0,64
U_1	0,66	0,69	0,75	0,78	0,79	0,8	0,81	0,81	0,8
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,38	0,42	0,46	0,48	0,51	0,53	0,55	0,56	0,57
E_{U_0}	0,35	0,39	0,44	0,48	0,52	0,55	0,57	0,59	0,62
U_1	0,57	0,62	0,67	0,71	0,77	0,78	0,79	0,8	0,81
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,37	0,4	0,44	0,47	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58
E_{U_0}	0,31	0,36	0,41	0,45	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59
U_1	0,5	0,55	0,59	0,62	0,66	0,73	0,77	0,78	0,79
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,34	0,38	0,42	0,45	0,48	0,5	0,52	0,54	0,57
E_{U_0}	0,27	0,32	0,37	0,41	0,45	0,49	0,52	0,55	0,57
U_1	0,44	0,5	0,54	0,57	0,61	0,65	0,68	0,74	0,77
TI%	9.00	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79

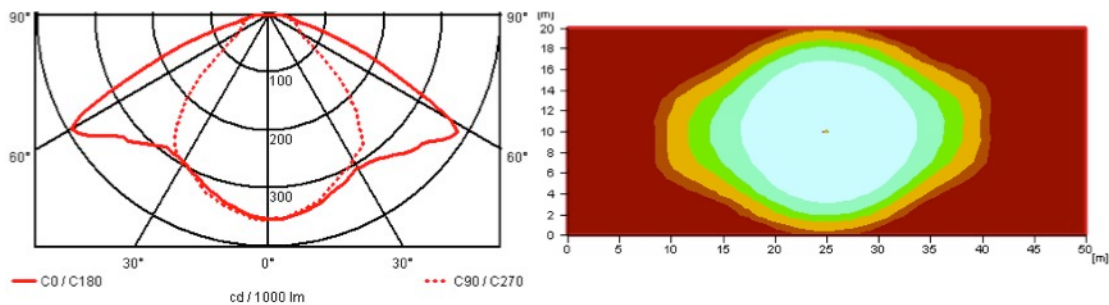
ME1	ME2	ME3a
ME3b	ME4a	
ME3c	ME4b	

Από τη σύγκριση των συγκεντρωτικών πινάκων, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τη μεταβολή της ομοιομορφίας, την οποία μπορεί να πετύχει ο κάθε συνδυασμός LED, αναλόγως με την απόσταση μεταξύ των ιστών και με το ύψος αυτών. Μπορούμε επίσης να αποφανθούμε για την καταλληλότητα του κάθε συνδυασμού, όσον αφορά την κάλυψη των προδιαγραφών μιας συγκεκριμένης κλάσης φωτισμού, για διάφορα ύψη και αποστάσεις μεταξύ ιστών. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που έχουμε 50% περιεκτικότητα σε LED τύπου-1 και τύπου-2, απαιτείται μικρότερο ύψος ιστού, προκειμένου να καλυφθούν οι πιο απαιτητικές κλάσεις φωτισμού, ME1, ME2, ME3α, για δεδομένη απόσταση μεταξύ των ιστών. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για τις κλάσεις ME3b και ME4α.



Εικόνα 2-19 : Πολικό διάγραμμα και προβολή αυτού, για το συνδυασμό «60-40».

Ωστόσο, στις λιγότερο απαιτητικές κλάσεις φωτισμού, ME3c και ME4b, παρατηρούμε μια ταύτιση, σε αρκετά μεγάλο ποσοστό, των δύο εξεταζόμενων συνδυασμών. Όσον αφορά τη θάμβωση και το σχετικό με αυτή δείκτη, TI, καθώς και το δείκτη SR, οι δύο συνδυασμοί LEDs είναι ισοδύναμοι.



Εικόνα 2-20 : Πολικό διάγραμμα και προβολή αυτού, για το συνδυασμό «50-50».

Σε γεν

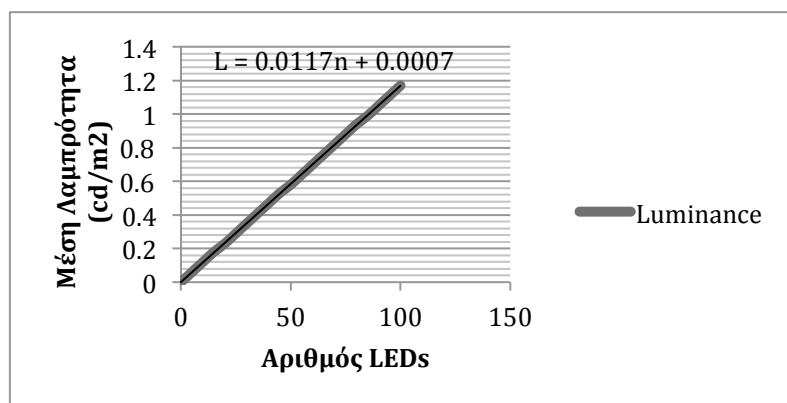
ικές γραμμές, μια φωτεινή πηγή αποτελούμενη από τον ίδιο αριθμό LEDs τύπου-1 και τύπου-2, είναι ικανή να πετύχει υψηλότερα επίπεδα ομοιομορφίας με οικονομικότερη εγκατάσταση. Θα πρέπει ωστόσο, κατά την επιλογή της καταλληλότερης φωτεινής πηγής, να είμαστε πολύ προσεκτικοί και να λάβουμε υπόψιν κάποιους επιπλέον παράγοντες. Τη νύχτα, ο ανθρώπινος οφθαλμός, χάνει την ικανότητα της διάκρισης χρωμάτων και αντιθέσεων, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αντίληψη του βάθους και η περιφερειακή όραση. Ο φωτισμός, η σκίαση, ο τρόπος που αντανακλάται το φως από ένα αντικείμενο και οι σκιές των αντικειμένων, γίνονται τα βασικά στοιχεία που βοηθούν τον ανθρώπινο εγκέφαλο να αντιληφθεί το σχήμα των αντικειμένων και τη θέση τους στο χώρο. Για το λόγο αυτό, η απαίτηση υψηλών επιπέδων ομοιομορφίας, σε μια

προσπάθεια αναπαραγωγής και μίμησης των συνθηκών φωτισμού που επικρατούν κατά τη διάρκεια της μέρας, είναι λανθασμένη πρακτική. Η πολύ υψηλή ομοιομορφία, κατά τη διάρκεια της νύχτας, δυσχεραίνει την όραση, απαλείφοντας τις αντιθέσεις και τις σκιές. Αντιθέτως, οι αντιθέσεις που δημιουργούνται από τον λιγότερο ομοιόμορφο φωτισμό, αυξάνουν την ικανότητα διάκρισης των διερχομένων οχημάτων. Σχετικές έρευνες δείχνουν ότι, ένα μοτίβο φωτισμού από επικαλυπτόμενα οβάλ, προτιμάται από αυτό ενός πολύ ομοιόμορφου φωτισμού.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, ο μηχανικός φωτισμού, θα πρέπει στην εκάστοτε περίπτωση, να εξισορροπεί τον οικονομικό παράγοντα, την ανάγκη για κάλυψη των προδιαγραφών και τον παράγοντα της οδικής ασφάλειας, προκειμένου να επιλέξει την καταλληλότερη φωτεινή πηγή. Στη δεδομένη περίπτωση, μια προτεινόμενη πρακτική, είναι η επιλογή του συνδυασμού 50-50, για φωτισμό δρόμων με πολύ υψηλές απαιτήσεις, και η επιλογή του συνδυασμού 60-40 για λιγότερο απαιτητικές περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η επιλογή των δύο αυτών πολικών διαγραμμάτων της φωτεινής πηγής με βάση τις πιο απαιτητικές κλάσεις φωτισμού, καθιστά τους εν λόγω συνδυασμούς κατάλληλους για όλο το φάσμα των κλάσεων φωτισμού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το σχεδιαζόμενο φωτιστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε κλάση φωτισμού προσδιορίζοντας κάθε φορά τον απαραίτητο αριθμό LEDs [5],[6],[7],[8].

2.5.6 Αριθμός LEDs

Όπως είδαμε, η επιλογή του απαραίτητου αριθμού LEDs, εξαρτάται από το επίπεδο της λαμπρότητας και της έντασης φωτισμού που θέλουμε να πετύχουμε σε κάθε περίπτωση. Ο αριθμός αυτός μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί μέσω δοκιμών στο πρόγραμμα Η/Υ **RELUX**. Μπορούμε ωστόσο να παρατηρήσουμε, ότι για δεδομένο ύψος και συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ ιστών, η σχέση μεταξύ της μέσης Λαμπρότητας και της μέσης Εντάσεως Φωτισμού, με τον αριθμό των LEDs είναι γραμμική. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης λαμπρότητας $L(\text{cd}/\text{m}^2)$ συναρτήσει του αριθμού των LEDs, για απόσταση μεταξύ των ιστών 25m, ύψος ιστού 9m και περιεκτικότητα σε LEDs τύπου-1, 60%.



Σχήμα 2-3: Μέση Λαμπρότητα οδοστρώματος συναρτήσει του αριθμού των LEDs

Βλέπουμε λοιπόν ότι οι ζητούμενες σχέσεις είναι γραμμικές, της μορφής

$$y = a \cdot x + b$$

Ωστόσο, μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να παραλείψουμε τον όρο b , ο οποίος είναι αφενός πολύ μικρός και αφετέρου δεν προσφέρει στην ακρίβεια του υπολογισμού του αριθμού των LEDs, δεδομένου ότι αυτός θα πρέπει να στρογγυλοποιηθεί στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο που επιτρέπει την κατασκευή του συνδυασμού «60-40». Το γεγονός ότι ο αριθμός των LEDs είναι κβαντισμένος, αναλόγως με τον συνδυασμό που θέλουμε να πετύχουμε, μας επιτρέπει να κάνουμε μια χονδροειδή εκτίμηση του συντελεστή a , ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με τον αριθμό των LEDs θα μας δίνει το επίπεδο Λαμπρότητας ή Έντασης Φωτισμού. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να γίνει από μια μοναδική μέτρηση με δεδομένα, το ύψος, την απόσταση μεταξύ ιστών και τον αριθμό LEDs. Ενδεικτικά παρατίθεται ο Πίνακας 2-7 που συγκεντρώνει τους συντελεστές $1/a$, που προκύπτουν για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα και οι οποίοι όταν πολλαπλασιαστούν με το ζητούμενο επίπεδο Λαμπρότητας δίνουν, κατά προσέγγιση, τον απαιτούμενο αριθμό LEDs για την περίπτωση του συνδυασμού «60-40». Αντίστοιχος πίνακας μπορεί να κατασκευαστεί και με βάση τις μετρήσεις της Έντασης Φωτισμού.

Πίνακας 2-7: Οι συντελεστές $1/a$ εφράζουν το ρυθμό μεταβολής του αριθμού των led ως προς τη μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος.

Υψος Ιστού	Απόσταση μεταξύ Ιστών				
	25m	27.5m	30m	32.5m	35m
6m	70.42	76.9	84.75	90.91	98.04
6.5m	72.46	79.37	87.72	94.34	102.04
7m	74.63	81.97	89.29	98.04	104.17
7.5m	76.92	84.75	92.59	100	108.7
8m	80.64	87.72	96.15	104.17	111.11
8.5m	83.33	90.91	100	108.7	116.28
9m	86.21	94.34	102.04	111.11	119.05
9.5m	87.72	96.15	96.15	113.64	121.95
10m	90.91	100	108.7	119.05	128.21
10.5m	94.34	102.04	113.64	121.95	131.58
11m	96.15	106.38	116.28	125	135.14
11.5m	100	108.7	119.05	128.21	138.89
12m	102.04	113.64	121.95	131.58	142.86

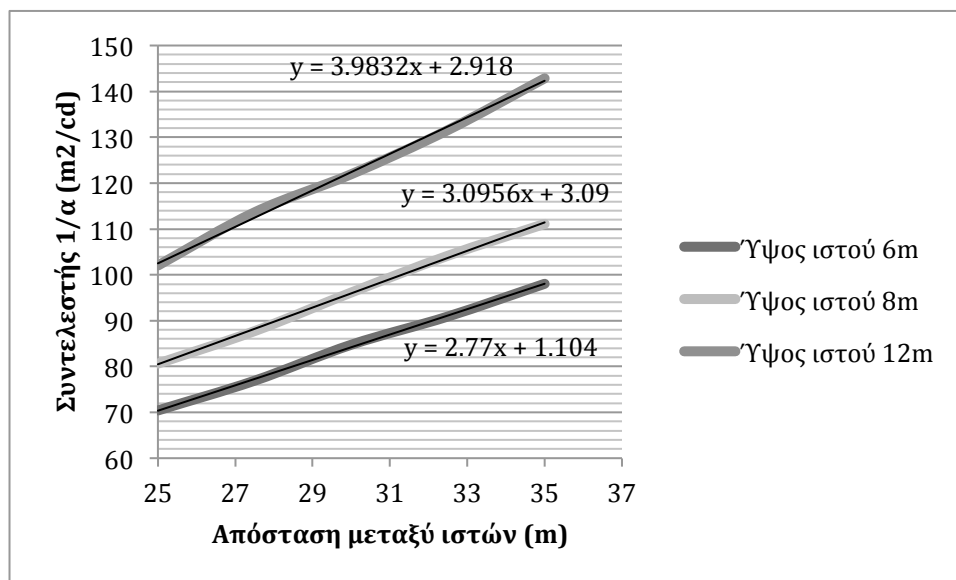
Έτσι, αν για παράδειγμα, θέλουμε να πετύχουμε λαμπρότητα $L=0.75 \text{ cd/m}^2$, με ύψος ιστού 8m και απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ιστών, 30m, με το συνδυασμό «60-40», σύμφωνα με τον πίνακα, θα χρειαστούμε

$$n = 0.75 \cdot 96.15 \approx 72 \text{ LEDs}$$

Ο αμέσως μεγαλύτερος ακέραιος, ο οποίος επιτρέπει την κατασκευή φωτιστικού με 60% LEDs τύπου-1 και 40% LEDs τύπου-2 είναι το 75. Επομένως θα

χρειαστούν, για τη συγκεκριμένη σχεδίαση, 45 LEDs τύπου-1 και 30 LEDs τύπου-2.

Παρατηρούμε, τέλος, ότι οι αντίστοιχοι συντελεστές για συγκεκριμένο ύψος ιστού και για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των ιστών, μπορούν επίσης να προσδιοριστούν από γραμμικές σχέσεις. Αντίστοιχες γραμμικές σχέσεις προκύπτουν, κρατώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ των ιστών και μεταβάλλοντας το ύψος.



Σχήμα 2-4: Συντελεστής 1/α συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των ιστών φωτισμού

Μπ ορούμε λοιπόν, σε κάθε περίπτωση, με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, να επεκτείνουμε τον Πίνακα 2-6 για περισσότερους συνδυασμούς ύψους ιστών και απόστασης μεταξύ αυτών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4, προσεγγίζοντας το συντελεστή $1/\alpha$, ο οποίος, πολλαπλασιαζόμενος με την τιμή της Λαμπρότητας που θέλουμε να πετύχουμε, θα δίνει το αριθμό των LEDs που απαιτείται κάθε φορά. Αντίστοιχη διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί και για την Ένταση Φωτισμού.

2.5.7 Θερμοκρασία Χρώματος

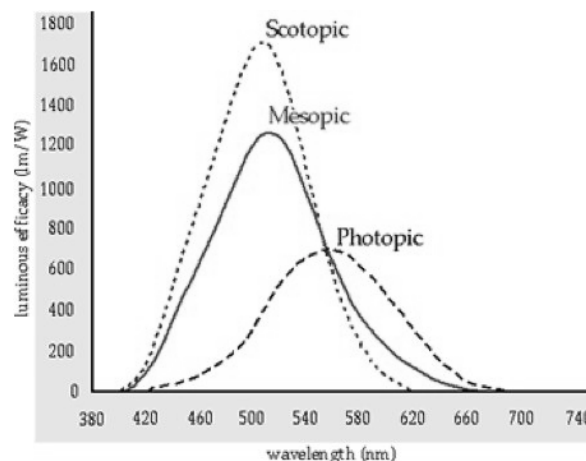
Ο σωστός σχεδιασμός της θερμοκρασίας χρώματος της φωτεινής πηγής, είναι μεγάλης σημασίας καθώς έχει αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα, την απόδοση και την ποιότητα του φωτισμού, ενώ όπως αποδεικνύεται από σχετικές έρευνες, μια λάθος επιλογή μπορεί να εγείρει και σημαντικά θέματα υγείας και κοινωνιολογικής φύσης.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα των LEDs είναι η ευρύτατη γκάμα θερμοκρασιών χρώματος την οποία προσφέρουν. Συγκεκριμένα στην περιοχή του λευκού φωτός, που μας ενδιαφέρει για το φωτισμό δρόμων, οι προσφερόμενες θερμοκρασίες χρώματος κυμαίνονται από warm white (CCT<3500K), έως neutral (3500K<CCT<4500K) και cool white (CCT>4500K). Η ευρύα αυτή γκάμα αποχρώσεων του άσπρου προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του καταλληλότερου CCT για εφαρμογή στο φωτισμό δρόμων και

εξωτερικών χώρων. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η απόδοση δεν διατηρείται σταθερή όταν αλλάζει το CCT. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα LEDs που προορίζονται για παραγωγή λευκού φωτός είναι σχεδιασμένα στην περιοχή του μπλέ με υψηλά CCT που ξεπερνούν τα 5000K. Η παραγωγή λευκού φωτός επιτυγχάνεται με την προσθήκη φωσφόρου, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα, ένα ποσοστό του μπλέ φωτός να υποστεί μετατόπιση-Stokes (Stokes shift) και να αυξηθεί το μήκος κύματος του προς την περιοχή του κίτρινου. Η μίξη του μπλέ και του κίτρινου φωτός έχει σαν αποτέλεσμα κάποια απόχρωση του άσπρου. Η διαδικασία αυτή, αυξάνει το ποσοστό των lumens που απορροφώνται πριν προλάβουν να εκπεμφθούν. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η μείωση του CCT συνεπάγεται ταυτόχρονη μείωση της φωτεινής απόδοσης των LEDs.

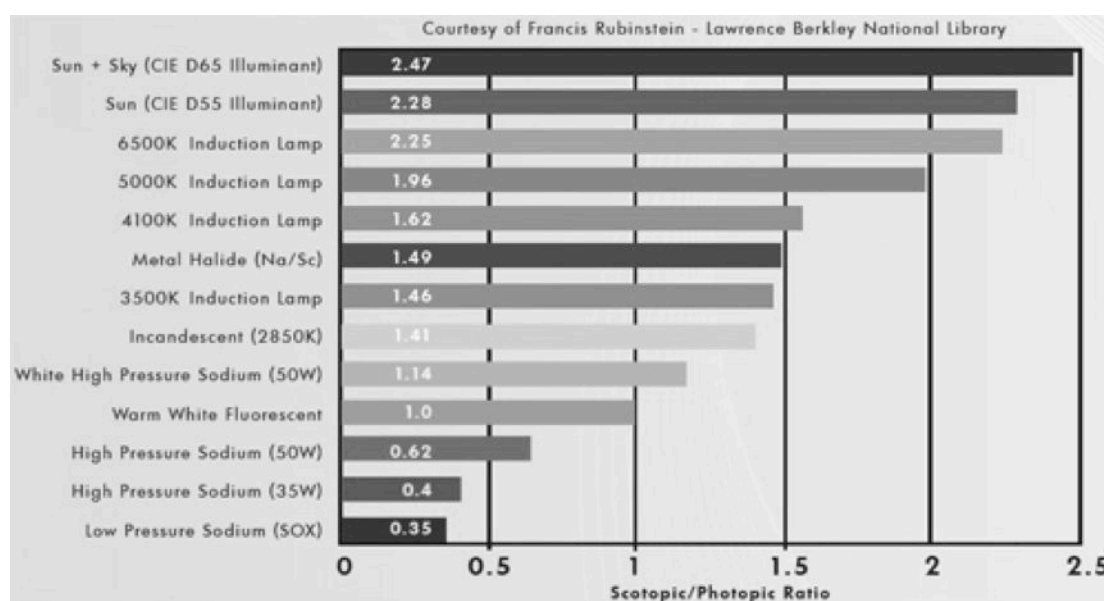
Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπόψιν κατά την επιλογή της θερμοκρασίας χρώματος μιας φωτεινής πηγής, που προορίζεται για νυχτερινό φωτισμό εξωτερικών χώρων, είναι η μεταβολή του τρόπου με τον οποίο αντλαμβάνεται ο ανθρώπινος οφθαλμός τα χρώματα, υπό διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος φωτισμού.

Το αίσθημα της όρασης προκαλείται από τα αισθητήρια του ανθρώπινου οφθαλμού. Τα αισθητήρια αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα κωνία και τα ραβδία. Τα ραβδία διεγείρονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού και η απόκρισή τους φτάνει σε κορεσμό όταν ο φωτισμός αυξηθεί αρκετά. Η όραση που οφείλεται στη διέγερση των ραβδίων ονομάζεται σκοτοπική (10^{-2} - 10^{-6} cd/m²). Τα κωνία, αντιθέτως, διεγείρονται σε υψηλά επίπεδα φωτισμού και η όραση που οφείλεται στη διέγερσή τους καλείται φωτοπική (1 - 10^6 cd/m²). Την ενδιάμεση κατάσταση στην οποία μετέχουν και οι δύο ομάδες αισθητηρίων οργάνων, την ονομάζουμε μεσοπική όραση (10^{-2} - 1 cd/m²). Οι περισσότερες περιπτώσεις νυχτερινού φωτισμού εξωτερικών χώρων κατατάσσονται στις συνθήκες μεσοπικής όρασης. Η ικανότητα διάκρισης χρωμάτων σε συνθήκες φωτοπικής όρασης είναι άριστη και ο οφθαλμός παρουσιάζει τη μέγιστη ευαισθησία του σε μήκη κύματος στην περιοχή του πράσινου(555nm). Αντιστοίχως, σε συνθήκες σκοτοπικής όρασης η ικανότητα διάκρισης χρωμάτων είναι πρακτικά ανύπαρκτη, ενώ η μέγιστη ευαισθησία του οφθαλμού μετατοπίζεται σε μήκη κύματος στην περιοχή του μπλέ. Στη μεσοπική όραση έχουμε μια ενδιάμεση κατάσταση, με τον οφθαλμό να παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία στο μπλέ χρώμα.



Εικόνα 2-21: Ευαισθησία του οφθαλμού στα διάφορα μήκη κύματος αναλόγως με τις συνθήκες φωτισμού

Οι διάφορες φωτεινές πηγές, αναλόγως με τη φασματική κατανομή τους, παρουσιάζουν διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο στα διάφορα μήκη κύματος του ορατού φάσματος. Αν ορίσουμε ως φωτοπική απολαβή φωτεινής ισχύος μιας πηγής, την ποσότητα εκείνη της φωτεινής ισχύος, η οποία γίνεται αντιληπτή σε συνθήκες φωτοπικής όρασης, και ως σκοτοπική απολαβή φωτεινής ισχύος, την ποσότητα εκείνη της φωτεινής ισχύος, η οποία γίνεται αντιληπτή σε συνθήκες σκοτοπικής όρασης, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το λόγο της σκοτοπικής απολαβής προς την φωτοπική απολαβή ισχύος (scotopic to photopic ratio S/P) σαν ένα μέτρο της ωφέλιμης φωτεινής ισχύος σε συνθήκες μεσοπικής και σκοτοπικής όρασης. Πράγματι, πηγές με μεγάλο S/P, όσο πλησιάζουμε δηλαδή στην περιοχή του cool white, μπορούν να πετύχουν την ίδια αίσθηση φωτεινότητας με λιγότερη συνολική φωτεινή ισχύ.



Εικόνα 2-22 : S/P ratio διαφόρων φωτεινών πηγών

Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιώντας «μεσοπική σχεδίαση» (mesopic design) της φωτεινής πηγής, μπορούμε να πετύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα στο νυχτερινό φωτισμό εξωτερικών χώρων, με μικρότερες απαιτήσεις σε συνολική φωτεινή ισχύ και συνεπώς μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Από τα προηγούμενα, είναι σαφές ότι οι υψηλές θερμοκρασίες χρώματος στην περιοχή του cool white, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας. Υπάρχουν ωστόσο κάποια σοβαρά θέματα τα οποία εγείρονται από τη χρήση ψυχρών χρωμάτων για το φωτισμό εξωτερικών χώρων :

- **Lighting Pollution:** Η υψηλή περιεκτικότητα σε μπλέ (μεγάλο CCT) έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού του φωτός, το οποίο διαχέεται από τα ατμοσφαιρικά σωματίδια (Rayleigh scattering) με συνέπεια την αύξηση των επιπέδων του ανεπιθύμητου φωτισμού και του φαινομένου της θάμβωσης. Η ρύπανση φωτισμού αποτελεί παράγοντα όχλησης, παρεμποδίζει τις αστρονομικές παρατηρήσεις και δραστηριότητες, προκαλεί σπατάλη ενέργειας ενώ παράλληλα έχει

σημαντικές επιπτώσεις στην ψυχική και σωματική υγεία των ανθρώπων (κόπωση, άγχος κ.α.) και παρεμβαίνει στην φυσιολογική λειτουργία των οικοσυστημάτων (αποπροσανατολισμός αποδημητικών πτηνών, παρεμπόδιση ανάπτυξης νυχτολούλουδων κ.α.).

- **Προβλήματα υγείας:** Το πολύ φωτεινό λευκό φως με υψηλή περιεκτικότητα σε μπλέ παρεμποδίζει τη παραγωγή και σωστή λειτουργία της μελατονίνης, της ορμόνης που ρυθμίζει και καταστέλλει τους όγκους στον ανθρώπινο οργανισμό. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην παρεμβολή που ασκεί το μπλέ φως στους «κιρκαδικούς ρυθμούς» (circadian clocks) των ανθρώπων, των ζώων και των φυτών, τους βιοχημικούς δηλαδή μηχανισμούς που συντονίζουν τη λειτουργία των οργανισμών με την κυκλική εναλλαγή της ημέρας με τη νύχτα.
- **Ποιότητα Φωτισμού:** Οι υψηλές θερμοκρασίες χρώματος εξασφαλίζουν γενικά καλύτερη αποτύπωση των χρωμάτων και καλή απεικόνιση σημάτων και πινακίδων, δεν αποδίδουν όμως τόσο καλά στο χρωματισμό αυτοκινήτων και κτηρίων καθώς και στην απεικόνιση των αποχρώσεων του δέρματος. Άνθρωποι που ρωτήθηκαν στα πλαίσια ερευνών, είπαν ότι αφενός βελτιώθηκε ο φωτισμός μετά από μετάβαση από χαμηλό σε υψηλό CCT αφετέρου όμως, τους προκαλεί αίσθημα μοναξιάς και καταπίεσης.

Συνοψίζοντας καταλήγουμε ότι κατά το σχεδιασμό της φωτεινής πηγής και την επιλογή του CCT, θα πρέπει να εξισορροπήσουμε τα θετικά και τα αρνητικά στοιχεία που παρουσιάζουν οι υψηλές θερμοκρασίες χρώματος. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο, η επιλογή του CCT της πηγής να γίνει στο πεδίο του neutral white (3500K-4500K), όπου βρίσκεται και το φως της Σελήνης, όπως άλλωστε υποδεικνύουν και οι διεθνείς τάσεις για το φωτισμό δρόμων και εξωτερικών χώρων [8],[13],[14].

2.5.8 Μοντέλο Φορτίου

Υψίστης σημασίας, κατά το σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, είναι ο, κατά το δυνατό ακριβέστερος, προσδιορισμός της συμπεριφοράς και των διαφόρων χαρακτηριστικών του φορτίου. Συγκεκριμένα, κρίνεται απαραίτητη η χάραξη μιας τυπικής ημερήσιας καμπύλης φορτίου, από την οποία θα μπορούμε να αντλήσουμε στοιχεία για τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η ζήτηση κατά τη διάρκεια ενός 24-ώρου, καθώς και η χάραξη μιας καμπύλης μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας.

Έχοντας προσδιορίσει τους αριθμούς των LED τύπου-1 και τύπου-2, n_1 και n_2 αντιστοίχως, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τη συνολική ηλεκτρική ισχύ της φωτεινής πηγής ως

$$P_{\phi}(W) = \frac{n_1 \cdot P_1 + n_2 \cdot P_2}{n_{driver}} \quad (2.5.8.1)$$

όπου P_1 και P_2 είναι τα ποσά ισχύος που καταναλώνουν, ένα LED τύπου-1 και ένα LED τύπου-2 αντιστοίχως, και τα οποία εξαρτώνται από τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, από την τάση δηλαδή στην οποία έχουμε επιλέξει να τα

πολώσουμε και το αντίστοιχο ρεύμα που τα διαπερνάει. Η ποσότητα, n_{driver} , είναι ο συντελεστής απόδοσης του ηλεκτρονικού κυκλώματος που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των LEDs, το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

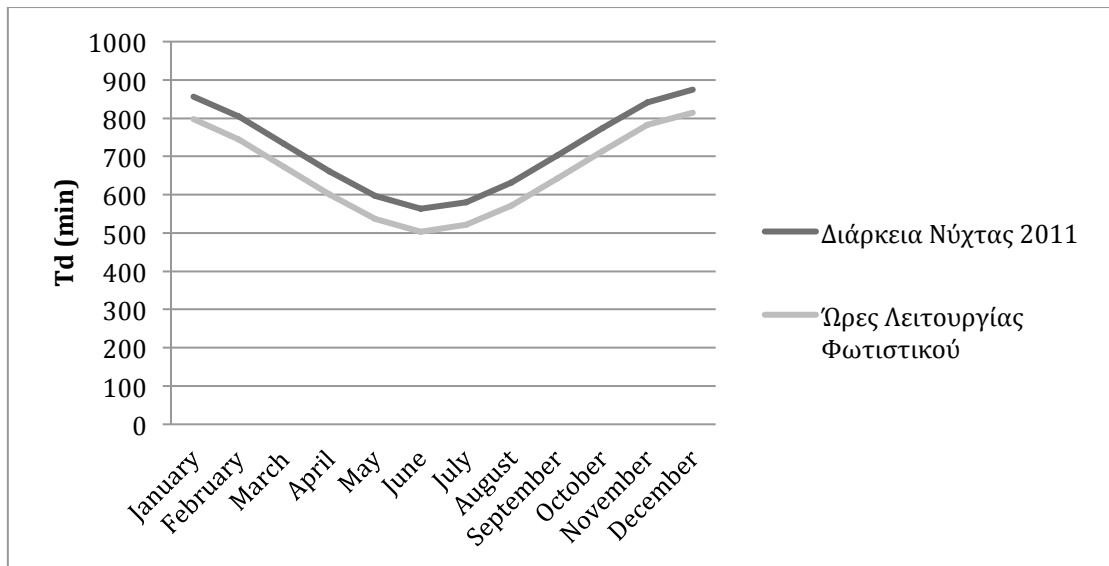
Στην περίπτωση του συστήματος φωτισμού εξωτερικών χώρων και δρόμων, είναι εύκολο να τοποθετήσουμε χρονικά τη ζήτηση, δεδομένου ότι αυτή θα υπάρχει αποκλειστικά κατά τη διάρκεια της νύχτας και επιπλέον δε θα παρουσιάζει διακυμάνσεις.

Η ημερήσια καμπύλη φορτίου, θα διαφέρει για κάθε μήνα, αναλόγως με τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας κατά το μήνα αυτό.



Σχήμα 2-5: Η γενική μορφή της ημερήσιας καμπύλης φορτίου του φωτιστικού

Ο προσδιορισμός της καταναλισκόμενης, από το φορτίο, ενέργειας, προϋποθέτει τον υπολογισμό των συνολικών ωρών λειτουργίας του φωτιστικού. Η μεταβολή, ωστόσο, της διάρκειας της νύχτας κατά τη διάρκεια ενός έτους, συνεπάγεται και μεταβολή των ωρών λειτουργίας του φωτιστικού. Παραδοσιακά, ο δημόσιος φωτισμός, δρόμων και εξωτερικών χώρων, τίθεται σε λειτουργία, 30 λεπτά μετά από την ημερολογιακά οριζόμενη δύση του ηλίου, και τίθεται εκτός λειτουργίας 30 λεπτά πριν από την ημερολογιακά οριζόμενη ανατολή του ηλίου. Ανατρέχοντας σε αντίστοιχα στοιχεία αστρονομικών μετρήσεων για το έτος 2011, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μέση διάρκεια νύχτας για κάθε μήνα και συνεπώς τις αντίστοιχες ώρες λειτουργίας του φωτιστικού ανά ημέρα, T_d , αφαιρώντας 60 λεπτά σε κάθε περίπτωση.

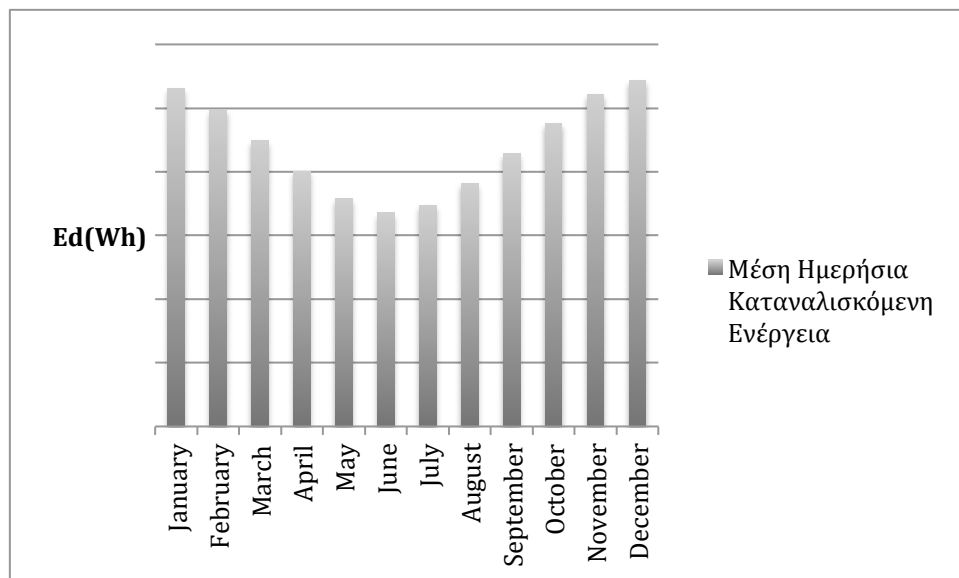


Σχήμα 2-6: Διάρκεια νύχτας και ώρε λειτουργίας του φωτιστικού κατά τη διάρκεια του έτους

Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας του συστήματος, για κάθε μήνα, ως:

$$E_d(Wh) = \frac{P_\phi \cdot T_d}{60} \quad (2.5.8.2)$$

Η γενική μορφή της κατανομής της ζήτησης ενέργειας, κατά τη διάρκεια ενός έτους, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7: Γενική μορφή της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά μήνα.

Η αιχμή της ζήτησης, όπως ήταν αναμενόμενο, εμφανίζεται το μήνα με τη μεγαλύτερη διάρκεια νύχτας, το Δεκέμβριο.

2.6 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ

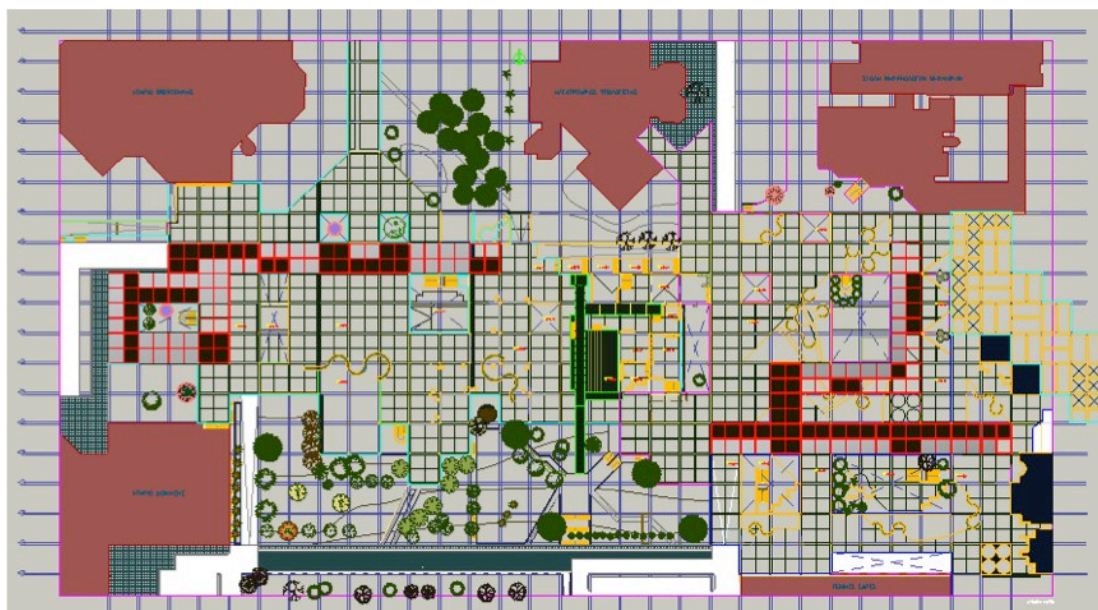
2.6.1 Περιγραφή

Σκοπός της παρούσης ενότητας, είναι η εφαρμογή των συμπερασμάτων, που εξήχθησαν στο τρέχον κεφάλαιο, στη διεξαγωγή μελέτης φωτισμού των πλατειών κέντρου του συγκροτήματος της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Πρόκειται για μια έκταση 14.000 m² περίπου, σχεδιασμένη ώστε να εξυπηρετεί πεζούς και ποδηλάτες, στις μετακινήσεις τους μέσα στην Πολυτεχνειούπολη, να συνδέει διοικητικά κτήρια και κτήρια σχολών μεταξύ τους καθώς και να φιλοξενεί δραστηριότητες των φοιτητών. Οι χώροι για τους οποίους θα σχεδιαστεί και θα προσομοιωθεί ο φωτισμός, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες :

1. Πλατείες Κέντρου (μη στεγαζόμενες περιοχές)
2. Στέγαστρα δύο τύπων, ύψους 2.85m και 4.10m
3. Υπαίθριο αναγνωστήριο στην περιοχή της Κεντρικής Βιβλιοθήκης ΕΜΠ

Για το φωτισμό των εν λόγω χώρων θα χρησιμοποιηθούν τα φωτιστικά LED υψηλής απόδοσης που σχεδιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Ειδικά στην περίπτωση των μη στεγαζόμενων περιοχών, ο φωτισμός θα επιτευχθεί με τη χρήση αυτόνομων ιστών εφοδιασμένων με φ/β πάνελ.

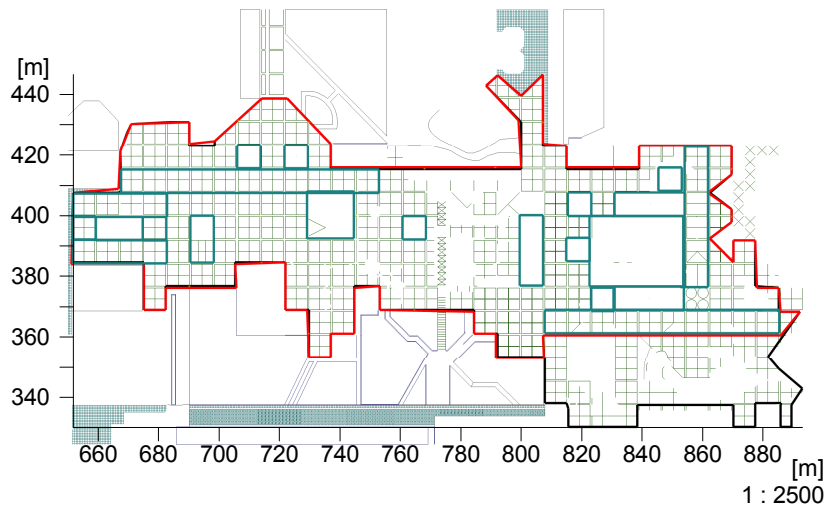
Στα πλαίσια της μελέτης, θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό σχεδιασμού και προσομοίωσης φωτισμού **RELUX**, με το οποίο υπολογίστηκαν τα επίπεδα φωτισμού καθώς και οι υπόλοιπες φωτομετρικές παράμετροι στους υπό μελέτη χώρους. Θα πραγματοποιηθούν επίσης, οι αντίστοιχες προσομοιώσεις-φωτορεαλισμοί για την αναπαράσταση του οπτικού αποτελέσματος στους αντιπροσωπευτικούς χώρους.



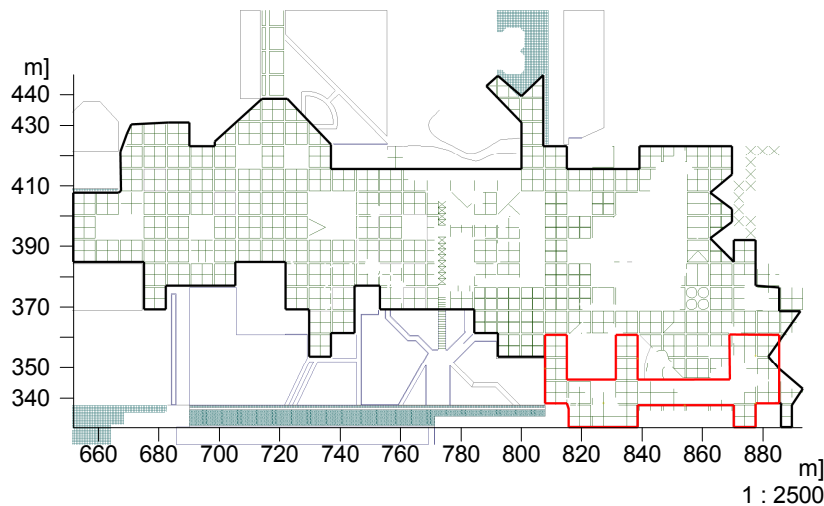
Εικόνα 2-23: Κάτοψη του χώρου των πλατειών κέντρου του ΕΜΠ.

2.6.2 Πλατείες Κέντρου (Μη στεγαζόμενες περιοχές)

Οι μη στεγαζόμενες περιοχές των πλατειών κέντρου αποτελούνται από τις δύο κεντρικές πλατείες, οι οποίες εκτείνονται από την Κεντρική Βιβλιοθήκη του ΕΜΠ, έως το χώρο των εστιατορίων και από το δώμα που οδηγεί στις Γενικές έδρες. Οι εν λόγω χώροι φαίνονται με κόκκινο περίγραμμα στις αντίστοιχες κατόψεις.



Εικόνα 2-24: Κεντρικές Πλατείες ΕΜΠ

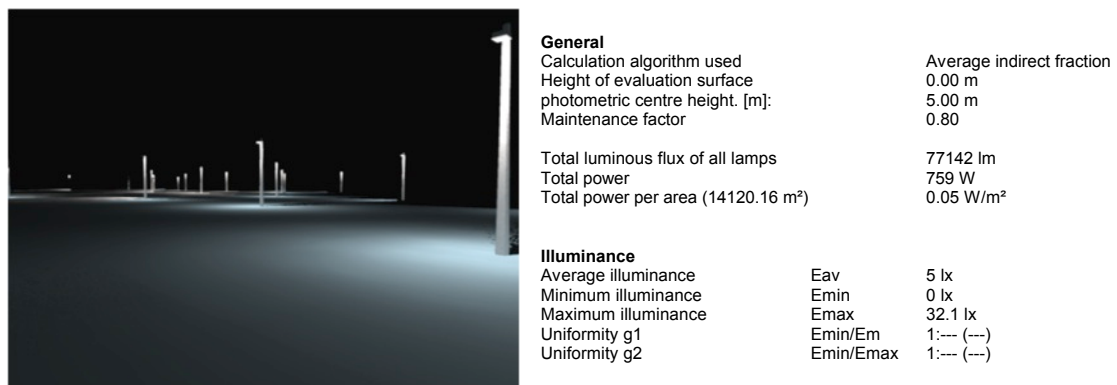


Εικόνα 2-25: Δώμα

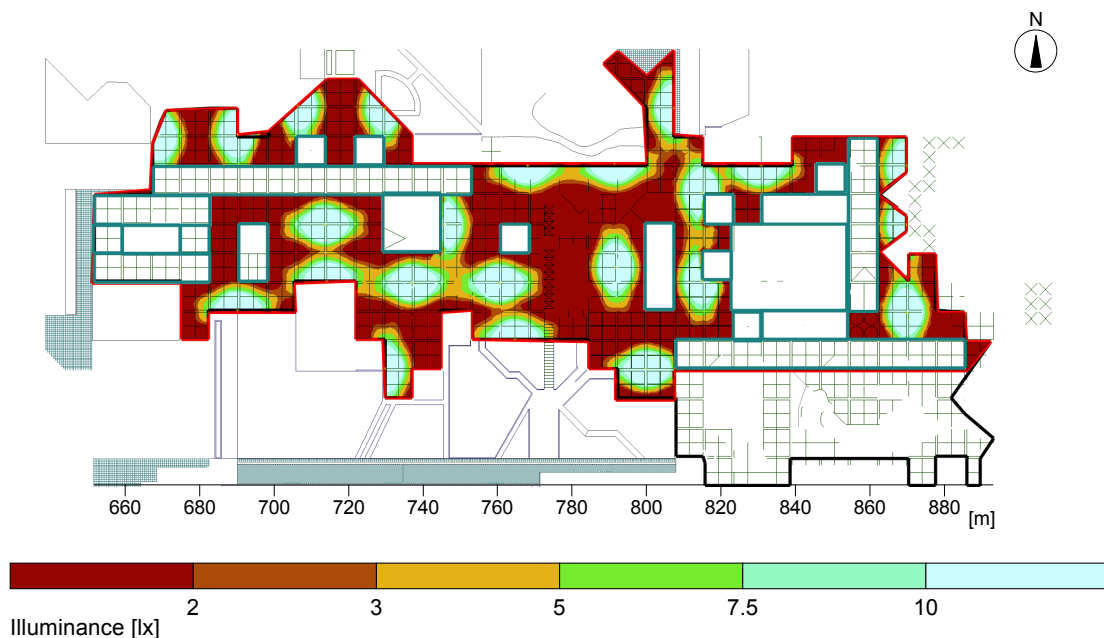
Οι υπό εξέταση χώροι, όπως αναφέρθηκε, εξυπηρετούν πεζούς και ποδηλάτες, με χαμηλή μέση ταχύτητα ($<30\text{km/h}$) και κανονική κυκλοφοριακή ροή, η δυσκολία πλοήγησης, η πολυπλοκότητα του οπτικού πεδίου, ο περιβάλλον φωτισμός καθώς και ο κίνδυνος εγκληματικότητας βρίσκονται σε κανονικά επίπεδα, ενώ κατά τον υπολογισμό των επιπέδων φωτισμού, δε χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν, μέτρα ρύθμισης της κυκλοφορίας ή

σταθμευμένα οχήματα και η αναγνώριση προσώπων δεν κρίνεται αναγκαία. Σύμφωνα με τα παραπάνω, και δεδομένου ότι η μελέτη αφορά δημόσιες πλατείες, κατατάσσουμε τους εξεταζόμενους χώρους στις κλάσεις φωτισμού S4-S5. Η μελέτη φωτισμού θα έχει σαν σκοπό την επίτευξη των επιπέδων έντασης φωτισμού που ορίζονται από τις εν λόγω κλάσεις και κυμαίνονται μεταξύ 3lx και 6lx.

Ο συνολικά απαιτούμενος αριθμός ιστών, για το φωτισμό των κεντρικών πλατειών, εκτιμήθηκε σε 29. Η φωτεινή πηγή που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου «60-40», αποτελούμενη από 30, συνολικά, LEDs, ενώ το ύψος ανάρτησης τέθηκε στα 5m. Η μέση Ένταση φωτισμού που επιτεύχθηκε είναι 5lx. Τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

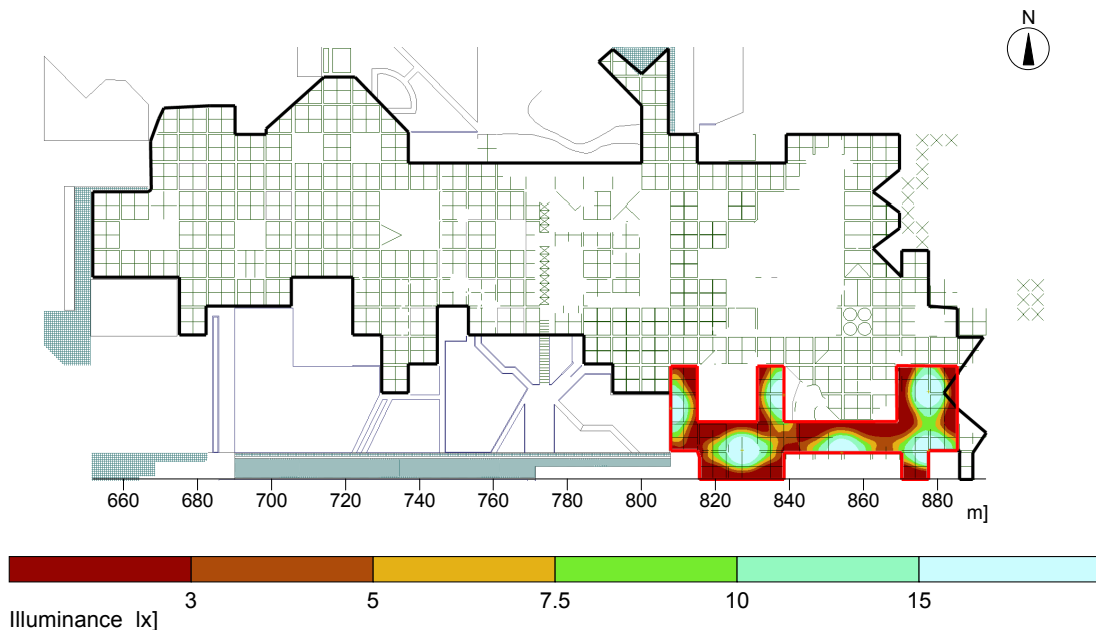


Εικόνα 2-26: Περίληψη αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτισμού των κεντρικών πλατειών



Εικόνα 2-27: Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτισμού των κεντρικών πλατειών με ψευδοχρώματα

Αντιστοίχως, για το φωτισμό του δώματος απαιτήθηκε η χρήση 6 ιστών, με τα ίδια χαρακτηριστικά. Σε αυτή την περίπτωση επιτεύχθηκε μέση Ένταση Φωτισμού 5lx.



Εικόνα 2-29: Απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτισμού του δώματος με ψευδοχρώματα

General

Calculation algorithm used	Average indirect fraction
Height of evaluation surface	0.10 m
photometric centre height. m]:	5.00 m
Maintenance factor	0.80
Total luminous flux of all lamps	20124 lm
Total power	198 W
Total power per area (14120.16 m ²)	0.01 W/m ²

Illuminance

Average illuminance	Eav	8 lx
Minimum illuminance	Emin	0.3 lx
Maximum illuminance	Emax	35.8 lx
Uniformity g1	Emin/Em	1:23.9 (0.04)
Uniformity g2	Emin/Emax	1:107 (0.01)

Εικόνα 2-28 : Περίληψη αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτισμού των κεντρικών πλατειών

Όπως αναφέρθηκε, ο φωτισμός των συγκεκριμένων περιοχών, θα επιτευχθεί με τη χρήση αυτόνομων φωτιστικών, εξοπλισμένων με Φ/Β πλαίσιο. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει αναλυτικός προσδιορισμός των διαφόρων χαρακτηριστικών του φορτίου, προκειμένου τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, να χρησιμοποιηθούν στη διαστασιολόγηση του συνολικού υβριδικού συστήματος φωτισμού.

Τα φωτιστικά που χρησιμοποιήθηκαν, φέρουν 30 LEDs έκαστο, κάθε ένα εκ των οποίων, οδηγούμενο στα ονομαστικά του μεγέθη, καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ

1.1W. Για τα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος που απαιτούνται για την οδήγηση των LEDs, θα θεωρήσουμε συντελεστή απόδοσης $n_{driver} = 0.93$. Προκύπτει έτσι, από την (2.5.8.1), η συνολική ισχύς του φωτιστικού σώματος ως

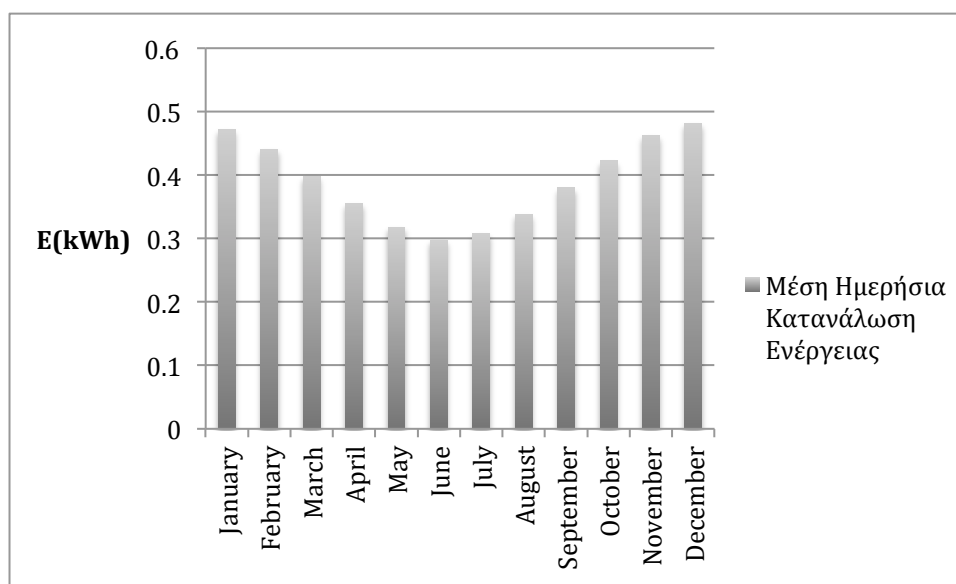
$$P_{\varphi} = \frac{30 \cdot 1.1W}{0.93} \approx 35.5W$$

Η μέση ημερήσια διάρκεια της νύχτας, ανά μήνα, προσδιορίζεται από τα αντίστοιχα μετεωρολογικά στοιχεία, τα οποία αντλούνται από την Μετεωρολογική Υπηρεσία του ΕΜΠ. Αντιστοίχως, υπολογίζονται οι ώρες λειτουργίας του φωτιστικού ανά μήνα.

Πίνακας 2-8: Μέση διάρκεια νύχτας και ώρες λειτουργίας του φωτιστικού

Μήνας	Διάρκεια Νύχτας (h)	Ώρες Λειτουργίας (h)
Ιανουάριος	15	14
Φεβρουάριος	14	13
Μάρτιος	13	12
Απρίλιος	12	11
Μάιος	10	9
Ιούνιος	10	9
Ιούλιος	10	9
Αύγουστος	11	10
Σεπτέμβριος	12	11
Οκτώβριος	13	12
Νοέμβριος	14	13
Δεκέμβριος	15	14

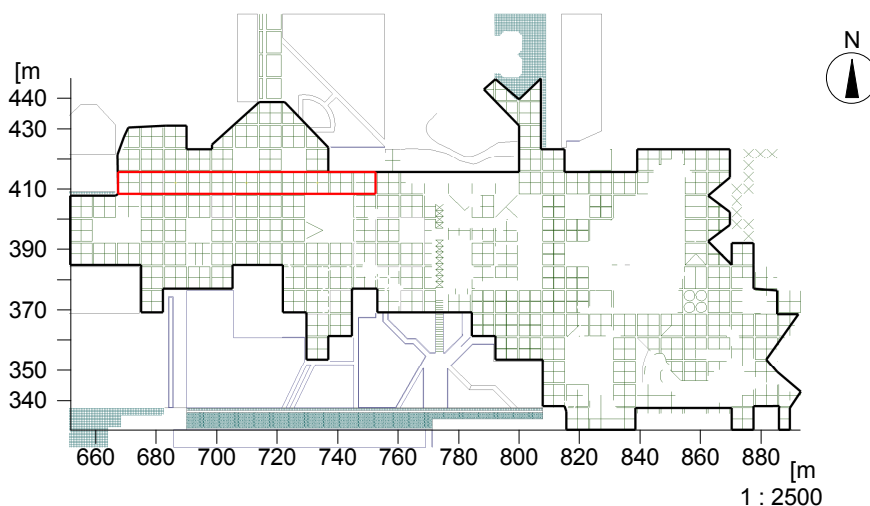
Υπολογίζεται, τέλος, από την (2.5.8.2), η μέση ημερήσια ζήτηση ενέργειας για κάθε μήνα.



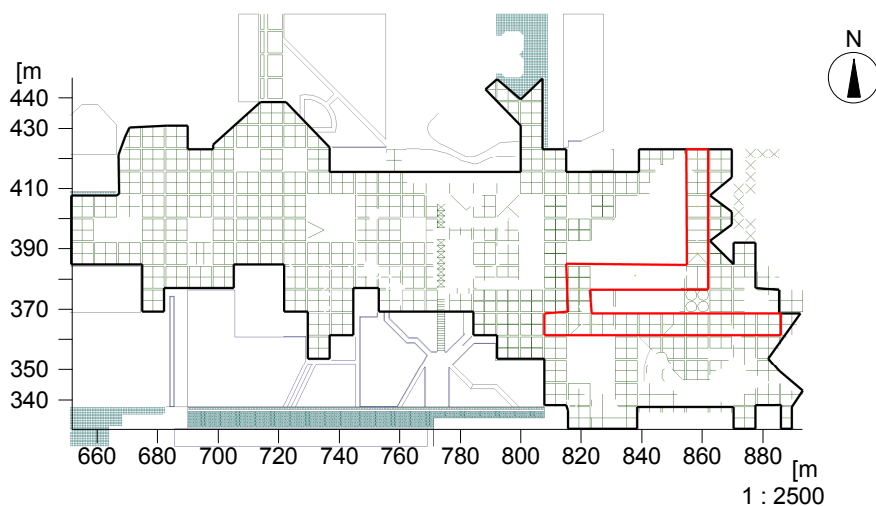
Σχήμα 2-8

2.6.3 Στέγαστρα

Οι διάφορες στεγαζόμενες περιοχές, καλύπτονται με στέγαστρα ύψους 2.85m και 4.10m κατά περίπτωση. Ο σκελετός των στεγαστρών είτε καλύπτεται από λαμαρίνα είτε παραμένει ακάλυπτος ενώ σε ορισμένα σημεία τοποθετούνται πέργκολες. Οι περιοχές αυτές είναι δύο, η μια εκ των οποίων βρίσκεται πλησίον της Κεντρικής Βιβλιοθήκης ΕΜΠ και η δεύτερη, μπροστά από τη φοιτητική λέσχη.



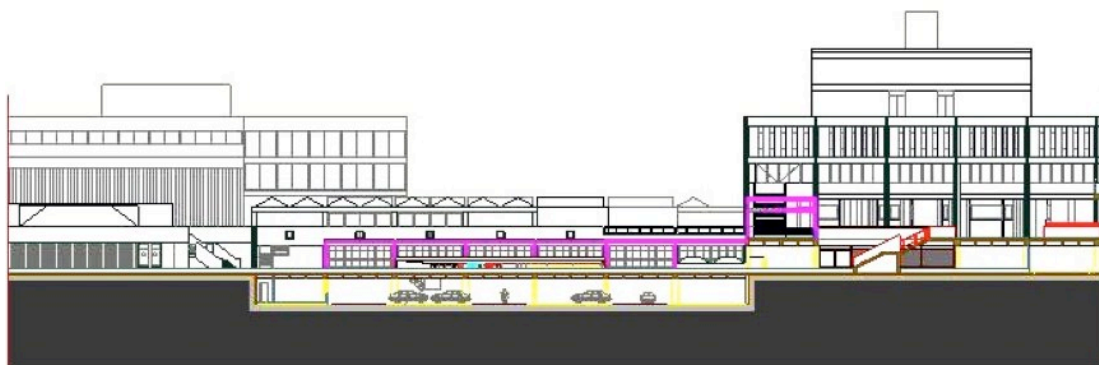
Εικόνα 2-30: Με κόκκινο περίγραμμα φαίνεται η κάτοψη του στεγάστρου της Βιβλιοθήκης ΕΜΠ.



Εικόνα 2-31: Με κόκκινο περίγραμμα φαίνεται η κάτοψη του στεγάστρου μπροστά από τη φοιτητική λέσχη.

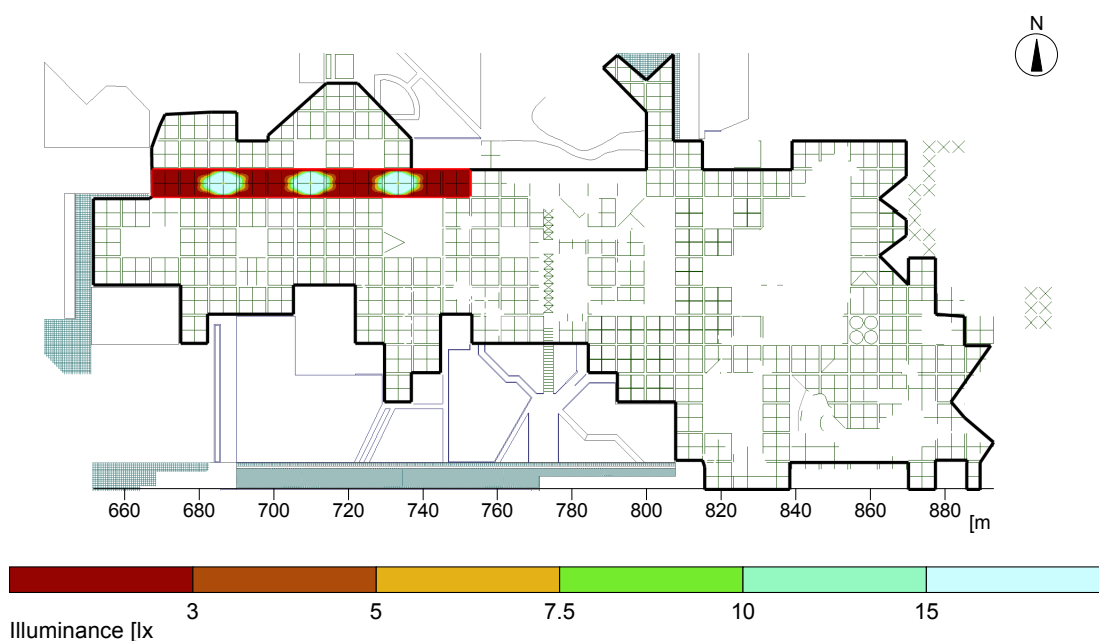
Οι στεγαζόμενοι χώροι φαίνονται στις εικόνες(...) με κόκκινο περίγραμμα.

Για το φωτισμό των στεγαζόμενων χώρων, χρησιμοποιήθηκαν φωτιστικά τύπου «60-40», ισχύος 22W, εφοδιασμένα με, συνολικά, 20 LEDs έκαστο. Το ύψος ανάρτησης των φωτιστικών, είναι το μέγιστο δυνατό σε κάθε περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση του πρώτου στεγάστρου, 2.85m, ενώ στην περίπτωση του δεύτερου στεγάστρου, είτε 2.85, είτε 4.10m.



Εικόνα 2-32: Τομή του στεγάστρου μπροστά από τη φοιτητική λέσχη.

Ο συνολικά απαιτούμενος αριθμός φωτιστικών, εκτιμήθηκε σε 11. Τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια.



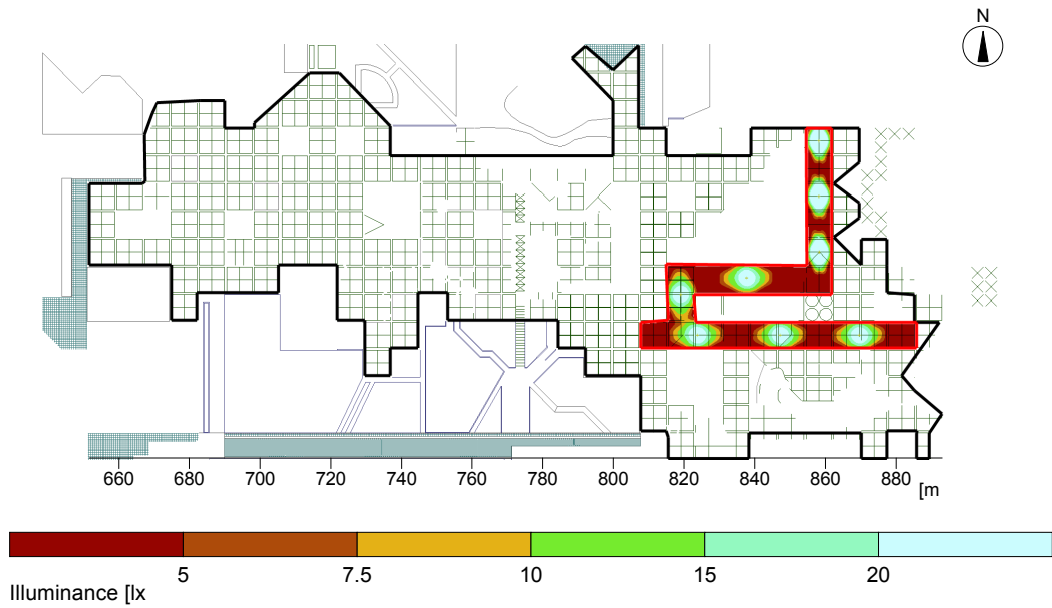
General

Calculation algorithm used	Average indirect fraction with light colours
Height of evaluation surface	0.10 m
photometric centre height. [m :	2.85 m
Maintenance factor	0.80
Total luminous flux of all lamps	6708 lm
Total power	66 W
Total power per area (14120.16 m ²)	0.00 W/m ²

Illuminance

Average illuminance	Eav	7.6 lx
Minimum illuminance	Emin	0 lx
Maximum illuminance	Emax	74.7 lx
Uniformity g1	Emin/Em	1:367 (0)
Uniformity g2	Emin/Emax	1:3620 (0)

Εικόνα 2-33: Περίληψη των αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτισμού του στεγάστρου της Βιβλιοθήκης ΕΜΠ.



General

Calculation algorithm used	Average indirect fraction with light colours
Height of evaluation surface	0.10 m
Maintenance factor	0.80
Total luminous flux of all lamps	17888 lm
Total power	176 W
Total power per area (14120.16 m ²)	0.01 W/m ²

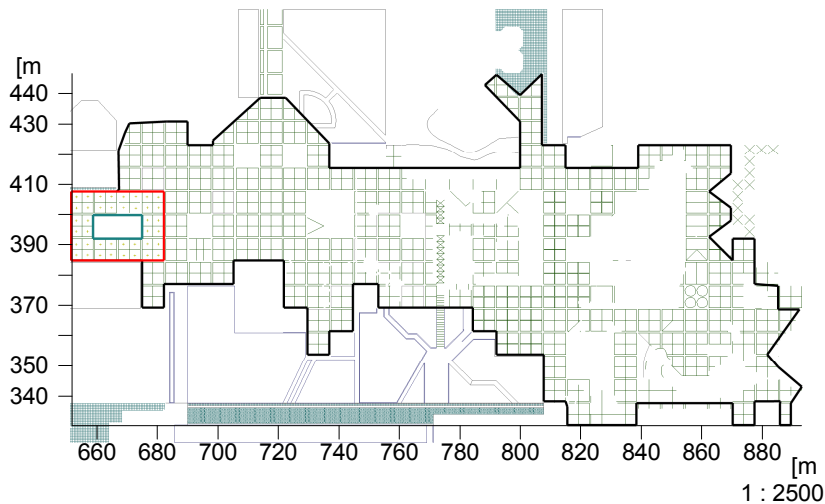
Illuminance

Average illuminance	Eav	9.3 lx
Minimum illuminance	Emin	0.1 lx
Maximum illuminance	Emax	74.8 lx
Uniformity g1	Emin/Em	1:102 (0.01)
Uniformity g2	Emin/Emax	1:823 (0)

Εικόνα 2-34: Περίληψη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης φωτισμού του στεγάστρου της φοιτητικής λέσχης.

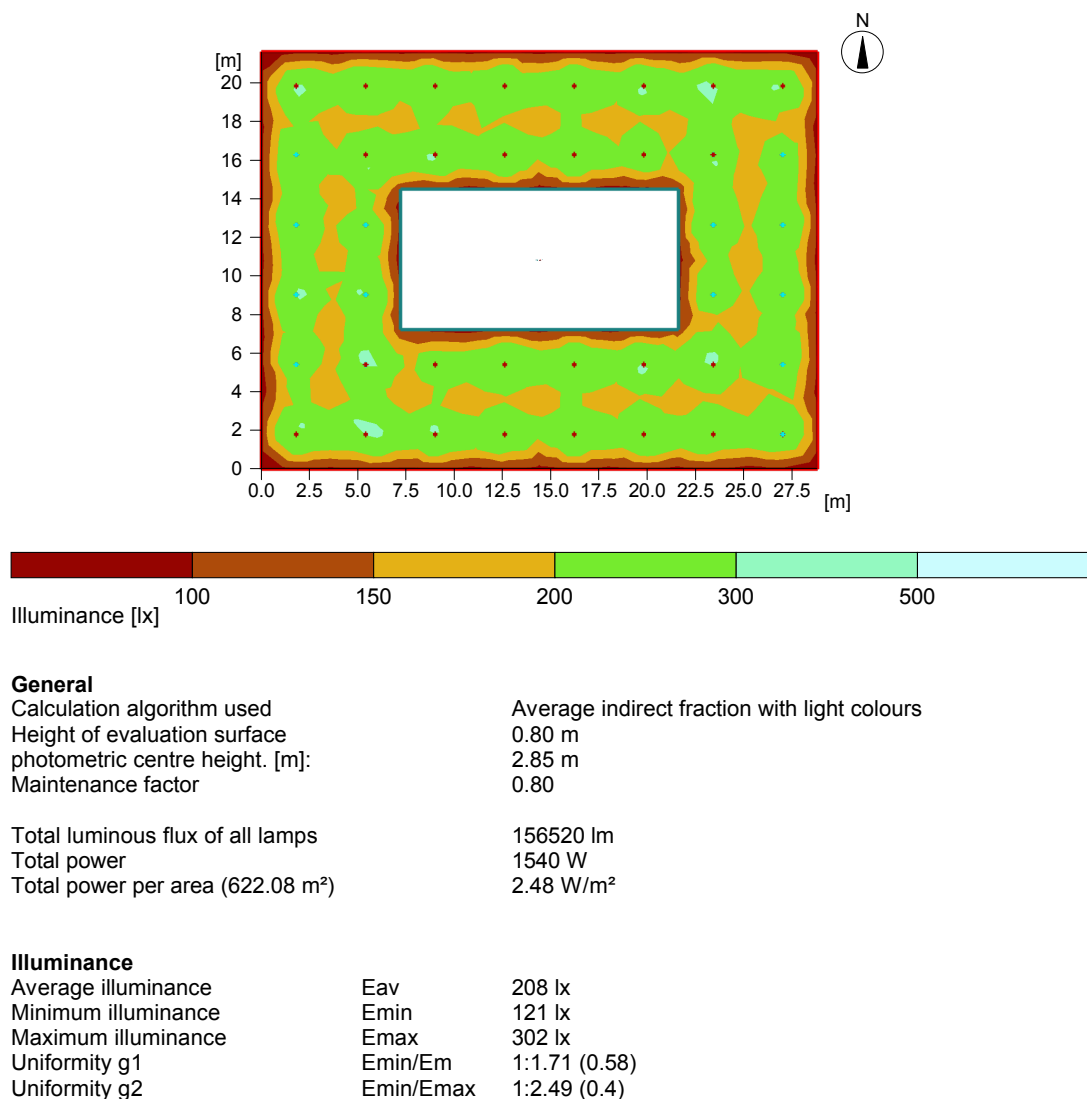
2.6.4 Υπαίθριο Αναγνωστήριο

Ο χώρος του αναγνωστηρίου βρίσκεται πλησίον της κεντρικής βιβλιοθήκης, και στεγάζεται από στέγαστρο ύψους 2.85m.

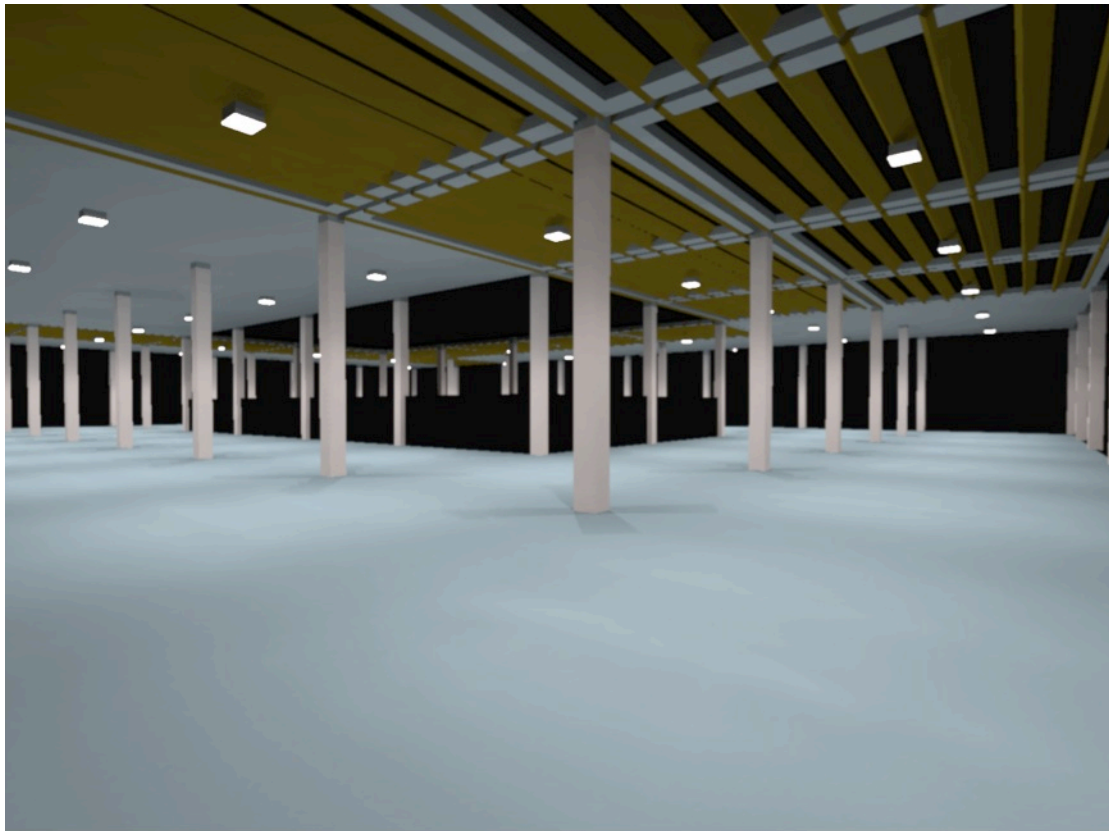


Εικόνα 2-35: Υπαίθριο αναγνωστήριο

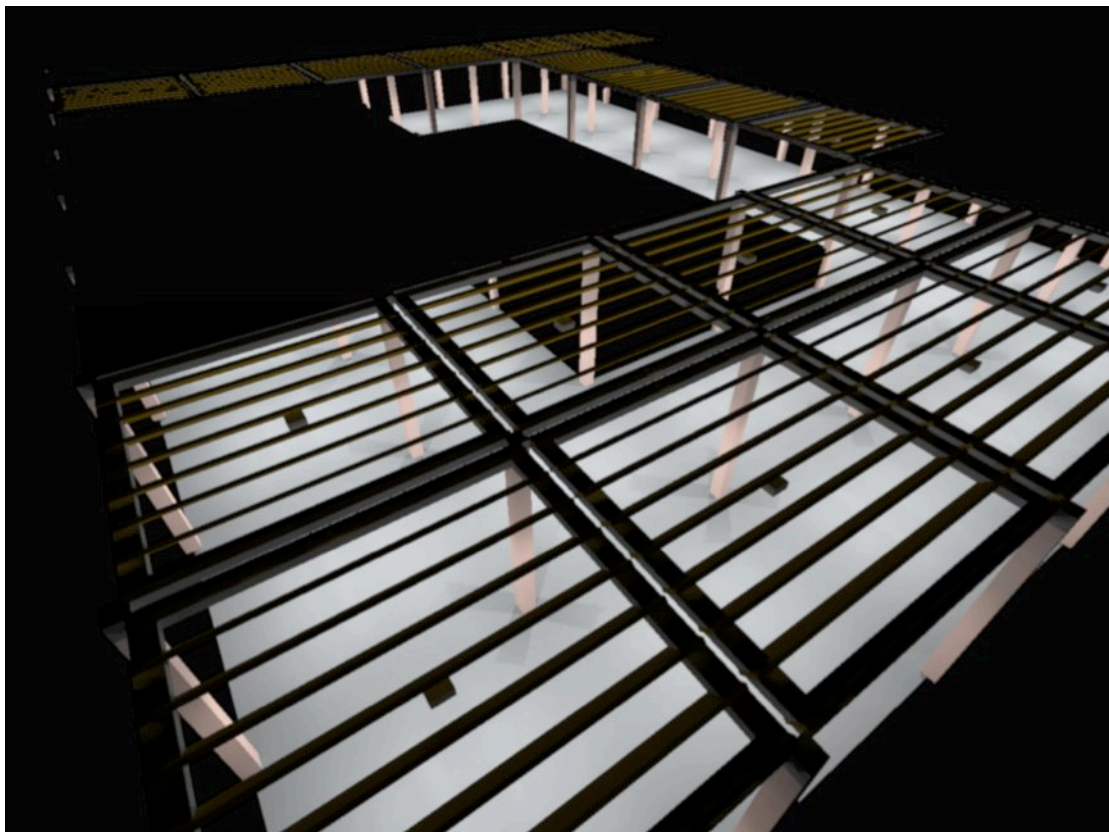
Οι προδιαγραφές φωτισμού για τον εν λόγω χώρο, είναι αρκετά απαιτητικές, δεδομένου ότι θα πρέπει ο χώρος να είναι κατάλληλος για μελέτη. Για τον λόγο αυτό, ως στόχος της μελέτης φωτισμού του χώρου του αναγνωστηρίου, τίθεται ένα επίπεδο Έντασης Φωτισμού 200lx στο επίπεδο ανάγνωσης (0.8m από το δάπεδο). Για την επίτευξη του στόχου αυτού, χρησιμοποιήθηκαν 40 φωτιστικά τύπου «60-40», εξοπλισμένα με 35 LEDs έκαστο, αναρτημένα σε ύψος 2.85m και τοποθετημένα ανά 3.6m. Οι αναπαραστάσεις φωτισμού καθώς και τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 2-36: Περίληψη αποτελεσμάτων προσομοίωσης φωτισμού του υπαίθριου αναγνωστηρίου.



Εικόνα 2-37: Τρισδιάστατη απεικόνιση του αναγνωστηρίου.



Εικόνα 2-38: Τρισδιάστατη απεικόνιση του αναγνωστηρίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΠΗΓΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Γενικά

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός, η αξιόπιστη και σωστή λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας και συνεπώς η βιωσιμότητα επενδύσεων σχετικών με την αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, εξαρτάται από την προσεκτική ανάλυση του, εκάστοτε διαθέσιμου, ενεργειακού δυναμικού, την αποτελεσματική εκμετάλλευση αυτού και την αξιόπιστη πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας.

Στην περίπτωση των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, το ρόλο της πηγής ενέργειας παίζει ο ήλιος και είναι η ηλιακή ενέργεια που πρέπει να αξιοποιηθεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο, προκειμένου να καλύπτεται, ανά πάσα στιγμή, η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος από το φορτίο.

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθούν θέματα που αφορούν την

- Αξιολόγηση του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού
- Βέλτιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας
- Διαστασιολόγηση του συστήματος

Τα συμπεράσματα που θα προκύψουν θα εφαρμοστούν σε αντίστοιχη μελέτη περίπτωσης.

3.2 Ενεργειακό Δυναμικό

3.2.1 Ηλιακή Ενέργεια

Ο ήλιος, είναι μια σφαίρα που αποτελείται από καυτές αέριες μάζες και έχει διάμετρο 1.5×10^8 km. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του υπολογίζεται από 8×10^6 έως 40×10^6 K.

Όλα τα σώματα, τα στερεά, τα υγρά και τα αέρια, όταν βρίσκονται σε θερμοκρασίες υψηλότερες του απόλυτου μηδέν (-273 °C), εκπέμπουν ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση του ηλίου η εκπεμπόμενη ενέργεια προκύπτει ως παράγωγο της θερμοπυρηνικής σύντηξης στην οποία υπόκεινται οι αέριες μάζες που τον αποτελούν. Αν παρομοιάζαμε τον ήλιο με μέλαν σώμα, η θερμοκρασία του θα ήταν 5777K και το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θα ήταν σχεδόν συνεχές.

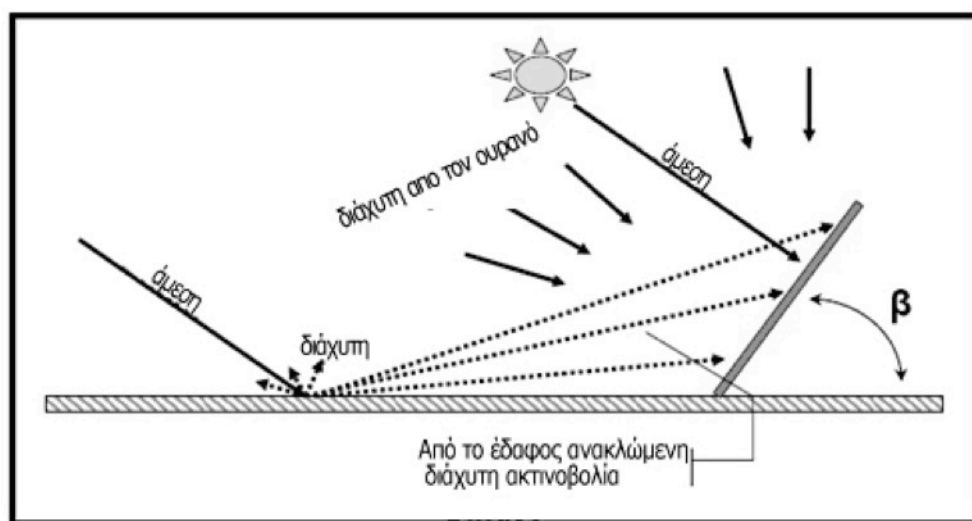
Ωστόσο, η ακτινοβολία που μας ενδιαφέρει όταν εξετάζουμε εφαρμογές φωτοβολταϊκών και ηλιακής ενέργειας είναι αυτή που κυμαίνεται μεταξύ της υπεριώδους, της ορατής και της υπέρυθρης. Για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούμε τον όρο «Πυκνότητα Ισχύος της Ηλιακής

Ακτινοβολίας», με μονάδα μέτρησης το W/m^2 . Με αυτόν τον τρόπο εκφράζουμε το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια συγκεκριμένου εμβαδού. Αντιστοίχως ορίζουμε και την «Πυκνότητα Ενέργειας της Ηλιακής Ακτινοβολίας» την οποία μετράμε σε Wh/m^2 .

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διαχωριστεί στην εκτός γήινης ατμόσφαιρας ακτινοβολία (extraterrestrial) και σε αυτήν που τελικά φτάνει στη γη (terrestrial). Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη, είναι μικρότερη από την εξωγήινη ακτινοβολία, λόγω της επίδρασης που ασκεί σε αυτή η ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, ένα ποσοστό της ακτινοβολίας ανακλάται προς το διάστημα, ένα ποσοστό αυτής απορροφάται από την ατμόσφαιρα, ενώ η υπόλοιπη είτε σκεδάζεται είτε διαπερνάει την ατμόσφαιρα και φθάνει κατευθείαν στη γη.

Γίνεται φανερό ότι μπορούμε να χωρίσουμε τη συνολική ακτινοβολία που φθάνει στη γη σε επιμέρους συνιστώσες :

- **Άμεση Ακτινοβολία G_B :** Καλούμε την ακτινοβολία που διαπερνάει την ατμόσφαιρα και φθάνει κατευθείαν στη γη.
- **Διάχυτη Ακτινοβολία G_D :** Καλούμε το ποσοστό της συνολικής σκεδαζόμενης ακτινοβολίας που φθάνει στη γη.
- **Ανακλώμενη Ακτινοβολία G_r :** Καλούμε την ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος ή άλλες επιφάνειες(κτίρια κτλ).



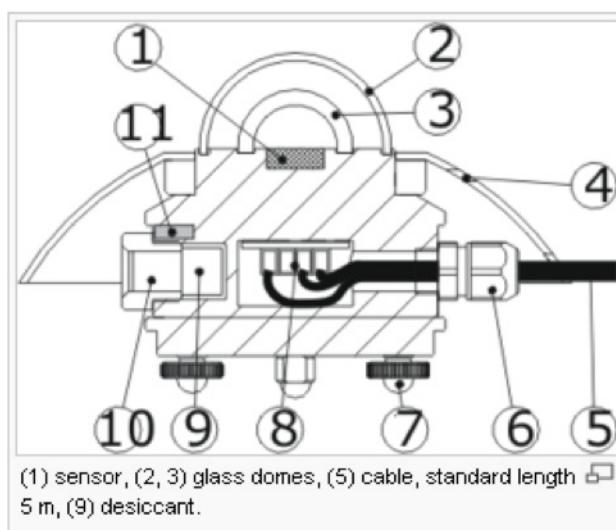
Εικόνα 3-1: Απεικόνιση των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας.

3.2.2 Μετρήσεις Ηλιακής Ακτινοβολίας

Για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση του ηλιακού δυναμικού σε κάποια περιοχή, είναι απαραίτητη η συλλογή και η επεξεργασία μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας, στην εξεταζόμενη περιοχή, για κάποιο ενδεικτικό χρονικό διάστημα. Οι απαραίτητες αυτές πληροφορίες, μπορούν να αντληθούν από χρονοσειρές μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας, η καταγραφή, η ταξινόμηση και η αρχειοθέτηση των οποίων, πραγματοποιείται από διάφορους οργανισμούς και

φορείς όπως είναι η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία ,το Εθνικό Αστεροσκοπείο καθώς και εκπαιδευτικά ιδρύματα και κέντρα ερευνών στα πλαίσια τη έρευνας.

Το πιο ευρέως διαδεδομένο όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το πυρανόμετρο. Τα σύγχρονα πυρανόμετρα αποτελούνται από δύο ομόκεντρους γυάλινους θόλους και στο εσωτερικό τους υπάρχει μία μαύρη επιφάνεια με κεραμικό υπόστρωμα κάτω από την οποία υπάρχουν εκατοντάδες θερμοστοιχεία . Το σήμα του πυρανομέτρου είναι της τάξης mV και οδηγείται σε κατάλληλη συσκευή μέτρησης η οποία ταυτόχρονα κάνει και ολοκλήρωση του σήματος . Τα όργανα αυτά λέγονται ηλιακοί ολοκληρωτές (Solar integrators).



Εικόνα 3-2: Τομή πυρανομέτρου.

Το πυρανόμετρο, μετράει το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο,

$$G(W/m^2) = G_b + G_d$$

ενώ με κατάλληλη ρύθμιση μπορεί να μετρήσει και μόνο τη διάχυτη ακτινοβολία.

3.2.3 Επεξεργασία των Μετρήσεων

Προκειμένου να εξάγουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το ηλιακό δυναμικό της περιοχής την οποία εξετάζουμε, απαιτείται η επεξεργασία των μετρήσεων που λαμβάνουμε από τα μετρητικά όργανα.

Στη διάρκεια μιας ημέρας λαμβάνονται απο το πυρανόμετρο, η μετρήσεις πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, με κάποιο συγκεκριμένο χρονικό βήμα t . Η ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας προσδιορίζεται ως

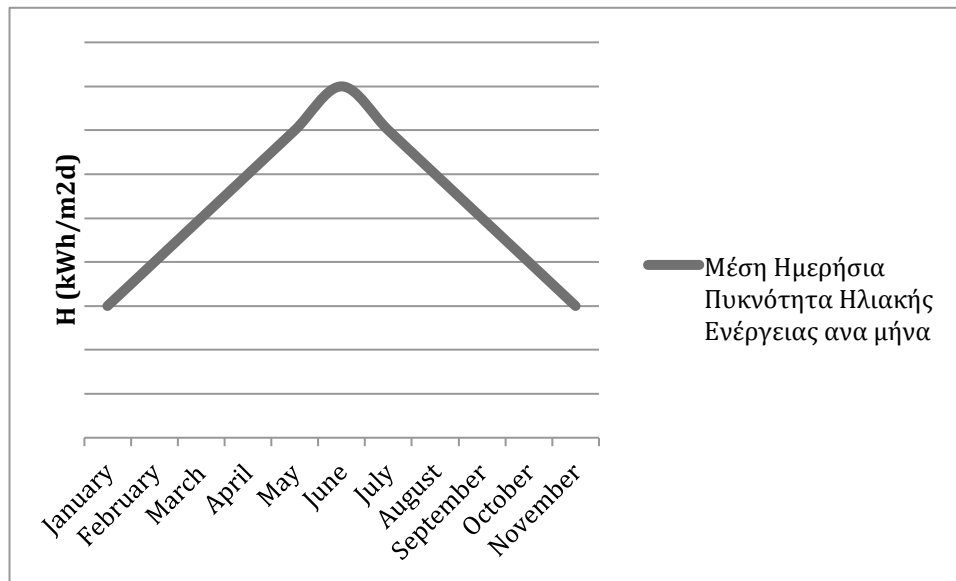
$$H_{\eta\mu\epsilon\rho\eta\sigma\iota\alpha} (kWh/m^2 \cdot d) = 10^{-3} \sum_{k=1}^n G_k(W/m^2) \cdot t (h) \quad (3.2.3.1)$$

Η μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας, σε οριζόντιο επίπεδο, για κάποιο μήνα υπολογίζεται ως

$$\bar{H}_{\etaμερήσια} (kWh/m^2 \cdot d) = \frac{1}{DOM} \sum_{k=1}^{DOM} H_{\etaμερήσια_k} (kWh/m^2 \cdot d) \quad (3.2.3.2)$$

όπου DOM: ο αριθμός των ημερών του μήνα

Η γενικευμένη μορφή της καμπύλης της μέσης ημερήσιας πυκνότητας ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους φαίνεται στο Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1

Η ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας, σε κάποια περιοχή με γεωγραφικό πλάτος L και για κάποια μέρα DOY, του έτους υπολογίζεται ως

$$H_{ex} = \frac{24 \cdot 1366}{10^3 \cdot \pi} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot DOY}{365}\right)\right) \cdot (\cos L \cdot \cos \delta \cdot \sin h_{ss} + h_{ss} \cdot \sin L \cdot \sin \delta)$$

$$DOY = 1 \dots 365 \quad (3.2.3.3)$$

όπου η ηλιακή απόκλιση δ και το h_{ss} δίνονται αντιστοίχως από τις σχέσεις:

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(DOY + 284)\right) \quad (3.2.3.4)$$

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan L \cdot \tan \delta) \quad (3.2.3.5)$$

Κατα συνέπεια, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας για κάποιο μήνα ως

$$\bar{H}_{ex}(kWh/m^2 \cdot d) = \frac{1}{DOM} \sum_{k=0}^{DOM} H_{exk} \quad (3.2.3.6)$$

Σαν ένα μέτρο του ποσοστού της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γή, ορίζουμε το μέσο συντελεστή καθαρότητας (monthly clearness index), για κάποιο μήνα ως

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_{ex}} \quad (3.2.3.7)$$

Μπορούμε, τέλος, σύμφωνα με το μοντέλο των Erbs et al., να προσεγγίσουμε τη μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργεια, λόγω διάχυσης, για κάποιο μήνα ως

$$\bar{H}_d = \bar{H} \cdot (1.391 - 3.56 \cdot \bar{K}_T + 4.189 \cdot \bar{K}_T^2 - 2.137 \bar{K}_T^3) \quad (3.2.3.8)$$

για $h_{ss} \leq 81.4^\circ$ και $0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8$

ή

$$\bar{H}_d = \bar{H} \cdot (1.311 - 3.022 \cdot \bar{K}_T + 3.427 \cdot \bar{K}_T^2 - 1.821 \bar{K}_T^3) \quad (3.2.3.9)$$

για $h_{ss} > 81.4^\circ$ και $0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8$

Για την μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας, που οφείλεται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία, για κάποιον μήνα, ισχύει [1], [9]:

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (3.2.3.10)$$

3.3 Εκμετάλλευση Ηλιακής Ενέργειας

3.3.1 Γενικά

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, έγκειται είτε στην άμεση αξιοποίηση της, είτε στη μετατροπή της σε κάποια άλλη αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας. Υπ' αυτή την έννοια, οι εφαρμογές ηλιακής ενέργειας διακρίνονται στις παθητικές και τις ενεργητικές, αντιστοίχως.

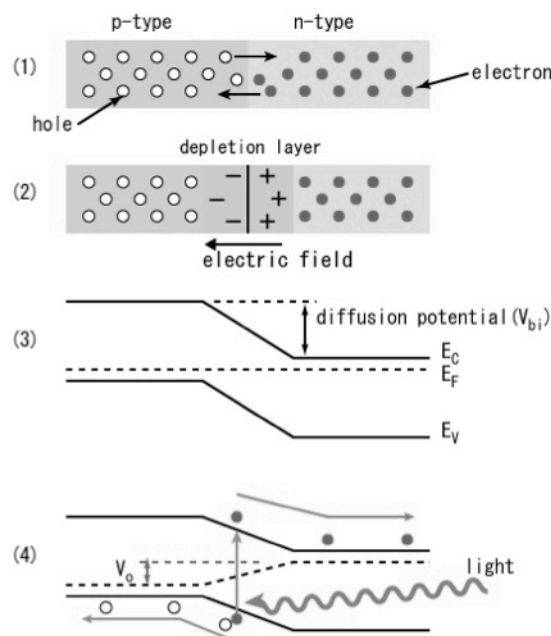
Χαρακτηριστικές περιπτώσεις παθητικής εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, είναι η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού και η επιλογή υλικών με κατάλληλες θερμικές ιδιότητες ώστε να πετυχαίνεται η θερμοκρασιακή ρύθμιση ενός χώρου,

στην αρχιτεκτονική, η κατασκευή θερμοκηπίων στη γεωργία, η χρήση αποστακτήρων για την απολύμανση του νερού καθώς και η θέρμανση του νερού.

Οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές ενεργητικής εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, είναι τα συστήματα CSP (concentrating solar power systems), τα οποία χρησιμοποιούν φακούς και ανακλαστήρες για να συγκεντρώσουν μεγάλες ποσότητες ηλιακού φωτός σε στενές δέσμες, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως θερμαντικά μέσα σε συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ισχύος, η χρήση ηλιακής ενέργειας για την οδήγηση χημικών αντιδράσεων και διεργασιών και τέλος η χρήση φωτοβολταϊκών συλλεκτών για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

3.3.2 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, έγκειται στη χρησιμοποίηση κατάλληλων ημιαγωγικών υλικών, τα οποία, εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα όταν εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία. Τέτοια υλικά είναι το μονοκρυσταλλικό, το πολυκρυσταλλικό και το άμορφο πυρίτιο, το τελλουριούχο κάδμιο και το αρσενικούχο γάλλιο. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ημιαγωγικών επαφών p-n, οι οποίες όταν εκτεθούν σε φως, το απορροφούν, με αποτέλεσμα τη διέγερση των ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους και τη μεταπήδησή τους στη ζώνη αγωγιμότητας με την ταυτόχρονη δημιουργία οπών. Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται έχει σαν αποτέλεσμα η επαφή να διαρρέεται από ρεύμα.

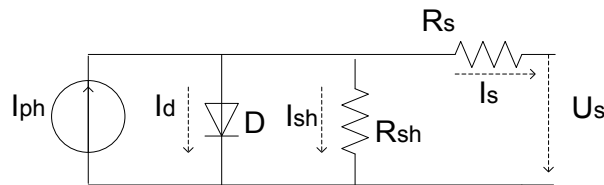


Εικόνα 3-3: Απεικόνιση του φ/β φαινομένου.

Οι συσκευές που πετυχαίνουν τη φωτοβολταϊκή μετατροπή ονομάζονται φωτοβολταϊκά κύτταρα και είναι τα δομικά συστατικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

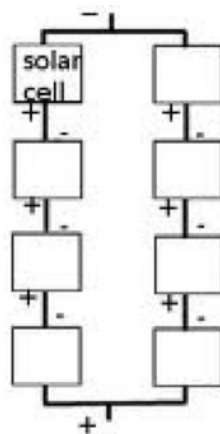
3.3.3 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

Όπως αναφέρθηκε, το δομικό συστατικό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, είναι το φωτοβολταϊκό κύτταρο, το οποίο όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία παράγει στους ακροδέκτες του διαφορά δυναμικού και μπορεί κατ' αυτόν τον τρόπο να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ισχύ κάποιο φορτίο. Το ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός τέτοιου στοιχείου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-4.



Εικόνα 3-4: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β κυττάρου.

Το φωτόρευμα I_{ph} , δημιουργείται όταν προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία στο φ/β στοιχείο και είναι ευθέως ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του στοιχείου. Για το λόγο αυτό το φ/β στοιχείο αναπαρίσταται ως μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από μια δίοδο, μια αντίσταση σειράς, R_s , η οποία εμποδίζει την κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} η οποία εμφανίζεται λόγω διαρροών ρεύματος. Ωστόσο, η ικανότητα παραγωγής ισχύος, ενός φ/β στοιχείου είναι περιορισμένη. Προκειμένου λοιπόν, να αυξήσουμε την ισχύ εξόδου του συστήματος μπορούμε να φτιάξουμε σειρές φ/β στοιχείων (strings), συνδέοντας πολλά επιμέρους στοιχεία σε σειρά μεταξύ τους, καθώς και πίνακες ή πλαίσια, συνδέοντας τις επιμέρους σειρές φ/β στοιχείων παράλληλα μεταξύ τους.



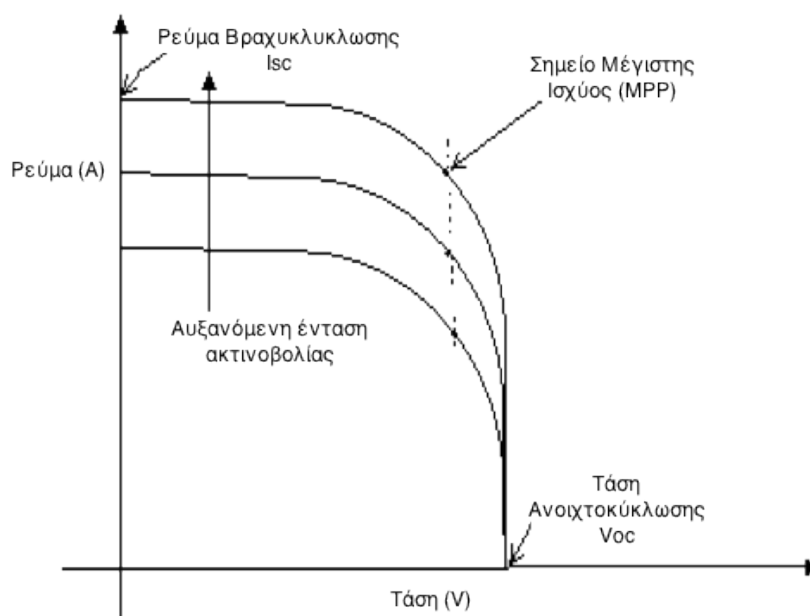
Εικόνα 3-5: Παράλληλες σειρές φ/β κυττάρων

Αυξάνοντας τον αριθμό των εν σειρά φ/β στοιχείων, αυξάνουμε την τάση εξόδου, ενώ αυξάνοντας των αριθμό των παράλληλων strings αυξάνουμε το ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να προσαρμόσουμε τα λειτουργικά

χαρακτηριστικά της φ/β γεννήτριας, αναλόγως με τις ανάγκες του εκάστοτε φορτίου, που επιθυμούμε να τροφοδοτήσουμε.

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός φ/β πλαισίου είναι τα εξής:

- **Ισχύς Αιχμής P_a (W_p):** Η ηλεκτρική ισχύς την οποία αποδίδει το φ/β πλαίσιο, όταν σε αυτό προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία $1kW/m^2$, σε τυπικές, δηλαδή, συνθήκες μέτρησης (STC).
- **Τάση Ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} (V):** Η μέγιστη τάση εξόδου σε STC. Η τάση αυτή λαμβάνεται, όταν στην έξοδο του φ/β πλαισίου δεν υπάρχει συνδεδεμένο φορτίο.
- **Ρεύμα Βραχυκύκλωσης I_{sc} (A):** Το μέγιστο ρεύμα σε STC. Το ρεύμα αυτό μετράται όταν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες του φ/β πλαισίου.
- **Τάση Μέγιστης Ισχύος V_{mpp} (V):** Η τάση για την οποία έχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος προς το φορτίο σε STC.
- **Ρεύμα Μέγιστης Ισχύος I_{mpp} (A):** Το ρεύμα εξόδου, 'ταν έχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος προς το φορτίο σε STC.
- **Καμπύλες I-V:** Αποτυπώνουν τη σχέση μεταξύ της τάσης και του ρεύματος εξόδου ενός φ/β πλαισίου, για διάφορες τιμές της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 3-6: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V φ/β πλαισίου για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παρατήρηση των χαρακτηριστικών I-V του φ/β πλαισίου, είναι ότι για διαφορετικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας, μεταβάλλεται ο βέλτιστος συνδυασμός ρεύματος-τάσης, ο οποίος μεγιστοποιεί το γινόμενο $V \cdot I$ και άρα την ισχύ εξόδου.

3.3.4 Προσανατολισμός Φ/Β Πλαισίου

Όπως σε όλες τις εφαρμογές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, έτσι και στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών, ζητούμενη είναι βέλτιστη εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού και η μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Ένας παράγοντας, του οποίου η επίδραση είναι καθοριστική στη βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά, είναι ο προσανατολισμός της φ/β γεννήτριας. Αναλόγως με τον προσανατολισμό του, και την περιοχή στην οποία βρίσκεται, ένα φ/β πλαίσιο εκτίθεται σε διαφορετικά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα η δυνατότητα του για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει αποδειχθεί ότι, για τις χώρες του βορείου ημισφαιρίου, ο βέλτιστος προσανατολισμός του φ/β πλαισίου, είναι ο νότιος, ενώ η βέλτιστη κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο ποικίλει αναλόγως με το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής. Αντιστοίχως, για τις χώρες του νοτίου ημισφαιρίου, η βέλτιστη εγκατάσταση των φ/β επιτυγχάνεται με προσανατολισμό προς το βορά.

Προκειμένου να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την επίδραση της κλίσης του φ/β πλαισίου, στην παραγωγή ενέργειας, θα πρέπει να αναγάγουμε τις μετρήσεις της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένα επίπεδα διαφόρων γωνιών.

Έτσι, για κάποιο κεκλιμένο επίπεδο γωνίας, β , σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο η μέση ημερήσια πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας για κάποιο μήνα, θα είναι:

$$\bar{H}_{tilt}(\beta) = \bar{H}_b^{tilt}(\beta) + \bar{H}_d^{tilt}(\beta) + \bar{H}_r^{tilt}(\beta) \quad (3.3.4.1)$$

όπου

$$\bar{H}_d^{tilt}(\beta) = \bar{H}_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (3.3.4.2)$$

και

$$\bar{H}_r^{tilt}(\beta) = \rho \cdot \bar{H} \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right), \rho: \text{συντελεστής ανάκλασης} \quad (3.3.4.3)$$

Η μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας που οφείλεται στην άμεση ακτινοβολία υπολογίζεται ως

$$\bar{H}_b^{tilt}(\beta) = \frac{1}{DOM} \sum_{k=1}^{DOM} H_b^{tilt}(\beta)_k \quad (3.3.4.4)$$

όπου η πυκνότητα ηλιακής ενέργειας για κάθε ημέρα του εξεταζόμενου μήνα υπολογίζεται ως

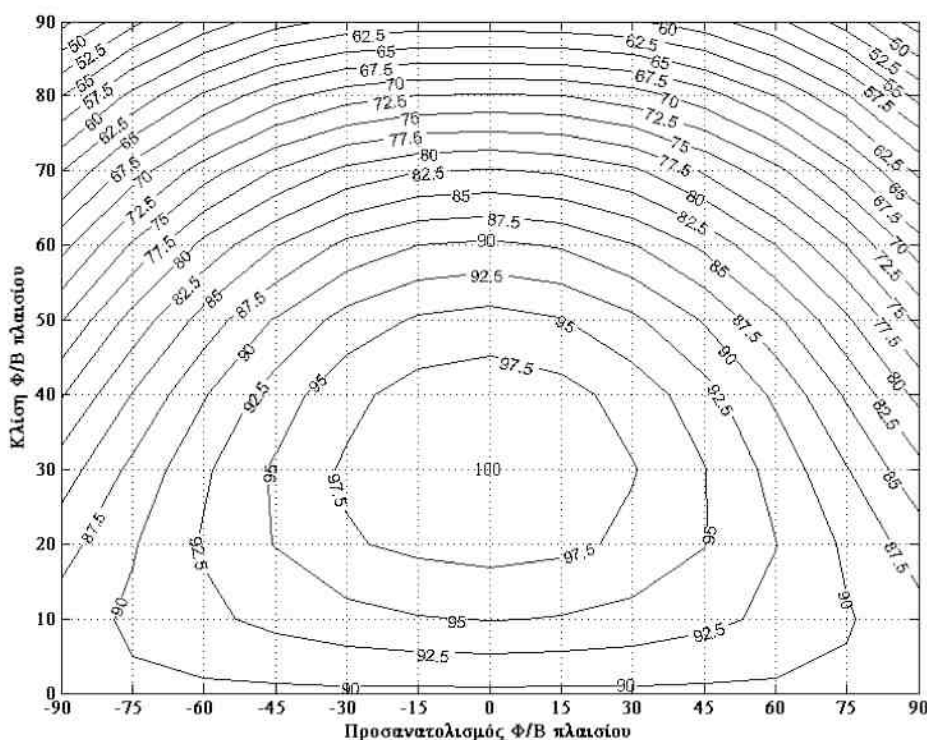
$$H_b^{tilt}(\beta) = H_b \cdot \frac{\cos(L - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sinh'_{ss} + h'_{ss} \cdot \sin(L - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos L \cdot \cos\delta \cdot \sinh_{ss} + h_{ss} \cdot \sin L \cdot \sin\delta} \quad (3.3.4.5)$$

όπου

$$H'_{ss} = \min\{h_{ss}, \cos^{-1}(-\tan(L - \beta) \cdot \sin\delta)\} \quad (3.3.4.6)$$

Σε πολλές περιπτώσεις, όπως και στην εξεταζόμενη, η τοποθέτηση του Φ/Β σε μία αρχικά σχεδιαζόμενη θέση, δεν είναι δυνατή ή επιθυμητή για αισθητικούς ή άλλους λόγους, με αποτέλεσμα η απολαβή του να τροποποιείται κατά τη διάρκεια του έτους. Ενδεικτικές της διακύμανσης της απολαβής ενέργειας, για κεκλιμένα επίπεδα σε διάφορους προσανατολισμούς, είναι οι αντίστοιχες καμπύλες που υπολογίστηκαν για την περιοχή της Αττικής, όπου η βέλτιστη τοποθέτηση ενός Φ/Β πλαισίου, για την παραγωγή ενέργειας, είναι σε κλίση 30° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και προσανατολισμένο προς το Νότο.

Θεωρώντας ως μέτρο σύγκρισης τη συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υπολογίστηκε η μείωση αυτής με παραμέτρους την κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο και τον προσανατολισμό του. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για κλίσεις από 10° έως 90° με βήμα 10° και για προσανατολισμούς από -90° (ανατολικά) έως 90° (δυτικά) με βήμα 15° και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2: Παραγωγή ενέργειας συναρτήσει του προσανατολισμού και της κλίσης του φ/β

Το σύστημα το οποίο μελετάται καλείται να λειτουργεί αυτόνομα καθ' όλο το έτος. Αυτό προϋποθέτει ότι η ενέργεια που θα παράγεται κάθε ημέρα του έτους θα επαρκεί για τη λειτουργία του συστήματος φωτισμού καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας. Έτσι, σε αντίθεση με την τυπική διαστασιολόγηση ενός συστήματος με φωτοβολταϊκά, ζητούμενο στην περίπτωση αυτή είναι η επάρκεια της ενέργειας κάθε ημέρα, παρά η παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερης ενέργειας, αθροιστικά στη διάρκεια του έτους. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος φωτισμού, επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε την παραγωγή ενέργειας, το μήνα κατά τη διάρκεια του οποίου, παρουσιάζεται η μεγαλύτερη ζήτηση. Ο μήνας αυτός κατά κύριο λόγο ταυτίζεται και με το μήνα κατά τον οποίο το ηλιακό δυναμικό είναι το ελάχιστο

στη διάρκεια ενός έτους. Συνήθως, ο εν λόγω μήνας είναι ο Δεκέμβριος και για αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμη η εύρεση εκείνης της κλίσης του φ/β πλαισίου, στην οποία μεγιστοποιείται η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας κατά το μήνα Δεκέμβριο. Η εύρεση αυτής της επιθυμητής κλίσης προκύπτει από επεξεργασία των αντίστοιχων χρονοσειρών, με τη βοήθεια των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

3.3.5 Διαστασιολόγηση του Φ/Β Πλαισίου

Τα εμπορικά φ/β πλαίσια χαρακτηρίζονται κυρίως από την ισχύ αιχμής τους, η οποία αποτελεί και το βασικό μέτρο με το οποίο διαστασιολογείται, μια φ/β γεννήτρια. Το κριτήριο για την επιλογή της απαραίτητης ισχύος αιχμής, είναι η ποσότητα της ενέργειας την επιθυμούμε να παράγουμε σε ημερήσια βάση, $E_{\text{παραγόμενη}} (kWh/d)$.

Σε τυπικές συνθήκες μετρήσεων (STC), θερμοκρασίας $25^{\circ}C$ και ηλιακής ακτινοβολίας $1kW/m^2$, δίνεται ο συντελεστής απόδοσης φ/β πάνελ επιφάνειας S και ισχύος αιχμής P_a ως

$$n_{\pi} = \frac{P_a(W_p)}{S(m^2) \cdot 1kW/m^2} \quad (3.3.5.1)$$

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του πάνελ, ο συντελεστής αυτός μειώνεται κατά ένα ποσοστό, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας των φ/β στοιχείων και λόγω της επικάλυψης σκόνης, φύλλων, χιονιού και άλλων ακαθαρσιών στο φ/β πλαίσιο. Ορίζονται οι συντελεστές θερμοκρασίας και ρύπανσης, σ_{θ} και σ_{ρ} αντιστοίχως, οι οποίοι είναι μικρότεροι της μονάδας και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη συχνότητα συντήρησης της εγκατάστασης. Τυπική θεώρηση για το θερμοκρασιακό συντελεστή των ηλιακών στοιχείων πυριτίου του εμπορίου, είναι ότι ισούται με τη μονάδα, όταν τα φ/β στοιχεία λειτουργούν στη συμβατική θερμοκρασία των $25^{\circ}C$ και ότι μειώνεται κατά περίπου 0.005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή. Θεωρώντας περιοδική συντήρηση και καθαρισμό των φ/β πλαισίων, μπορούμε να θεωρήσουμε μια σταθερή και υψηλή τιμή για τον συντελεστή ρύπανσης, η οποία ωστόσο μειώνεται με τη μείωση της κλίσης των πάνελ. Τότε ισχύει

$$n_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho} = \frac{P_{\text{παραγόμενη}}(W)}{S(m^2) \cdot G \left(\frac{W}{m^2} \right)} = \frac{E_{\text{παραγόμενη}}(Wh)}{S(m^2) \cdot H \left(\frac{Wh}{m^2} \right)} \quad (3.3.5.2)$$

Έτσι, αν η μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας είναι, $H \left(\frac{Wh}{m^2 \cdot d} \right)$, και επιθυμούμε να παράγουμε κατά μέσο όρο ημερησίως $E_{\text{παραγόμενη}} (Wh/d)$, θα πρέπει να επιλέξουμε φ/β πάνελ ισχύος αιχμής

$$P_a(kW_p) = \frac{E_{\text{παραγόμενη}}(Wh/d) \cdot 1kW/m^2}{H \left(\frac{Wh}{m^2 \cdot d} \right) \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho}} \quad (3.3.5.3)$$

3.4 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ

3.4.1 Περιγραφή

Σκοπός της παρούσης ενότητας, είναι η εφαρμογή των συμπερασμάτων του παρόντος κεφαλαίου, για την αξιολόγηση του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού, στην περιοχή του συγκροτήματος της Πολυτεχνειούπολης στου Ζωγράφου, και την κατάλληλη αξιοποίηση αυτού, για την επίτευξη αυτονομίας στην τροφοδότηση των φωτιστικών που προορίζονται για το φωτισμό των κεντρικών πλατειών. Η αντίστοιχη μελέτη, διαστασιολόγηση και βελτιστοποίηση του φ/β συστήματος θα πραγματοποιηθεί για ένα φωτιστικό και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, μπορούν εν συνεχεία να επεκταθούν για το σύνολο της εγκατάστασης φωτισμού.

3.4.2 Συλλογή και Επεξεργασία Μετρήσεων

Η άντληση των απαραίτητων μετεωρολογικών δεδομένων μπορεί να γίνει από τα αρχεία μετρήσεων της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας του ΕΜΠ. Συγκεκριμένα, επιλέγεται η χρονοσειρά, που αφορά στη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης με γεωγραφικό πλάτος, $37^{\circ}58'26''$ N και μήκος, $23^{\circ}47'16''$ E σε υψόμετρο 219m, για το έτος 2011. Οι εν λόγω μετρήσεις, λαμβάνονται κάθε 10 λεπτά, καθ' όλη τη διάρκεια του 24-ώρου, με τη βοήθεια του αναλογικού πυρανομέτρου Kipp & Zonen CM6B και δίνονται σε W/m^2 .

Η αξιοποίηση των μετρήσεων, στη διαστασιολόγηση του συστήματος, επιβάλλει κατάλληλη επεξεργασία τους σε λογιστικά φύλλα Excel, μέσω εφαρμογής Visual Basic, απ' όπου προκύπτει ο υπολογισμός και η αντίστοιχη απεικόνιση του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού για κάθε ημέρα του έτους, καθώς και η αντίστοιχη μέση πυκνότητα ηλιακής ενέργειας για κάθε μήνα, σε οριζόντιο επίπεδο. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3-3.

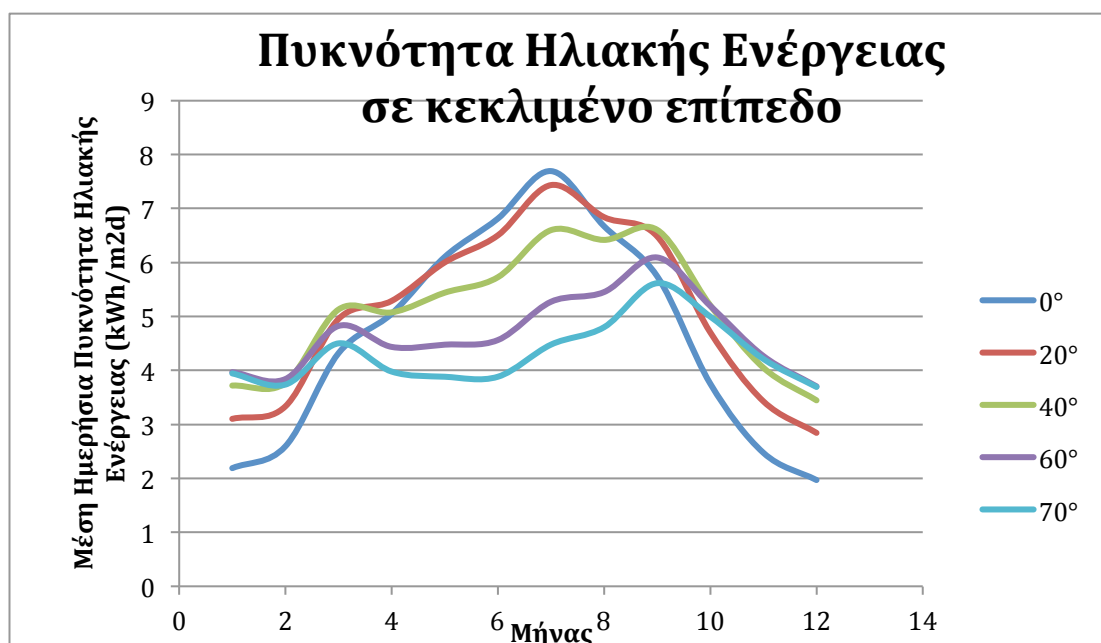


Σχήμα 3-3: Ημερήσια και μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους

Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τις εξισώσεις αναγωγής των μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένα επίπεδα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαθέσιμη ενέργεια για διάφορες κλίσεις του φ/β πάνελ. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να αξιοποιηθούν για την επιλογή της καταλληλότερης κλίσης αναλόγως με την περίπτωση. Τέλος, γνωρίζοντας το διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό για κάθε μήνα του έτους, και για την επιλεγμένη κλίση του πλαισίου, μπορούμε να εκτιμήσουμε την παραγόμενη ενέργεια και να επιλέξουμε την ισχύ αιχμής του φ/β πλαισίου αναλόγως με τις ανάγκες του φορτίου.

3.4.3 Επιλογή κλίσης και Ισχύος Αιχμής του Φ/β Πάνελ

Όπως επισημάνθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το ζητούμενο κατά τη σχεδίαση ενός αυτόνομου συστήματος είναι η δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ανά πάσα στιγμή, και όχι η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή κατάλληλης κλίσης του πάνελ, τέτοιας ώστε, να ομαλοποιείται η καμπύλη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους, μεταφέροντας ουσιαστικά την περίσσεια ενεργειακού δυναμικού, από τη θερινή, στην χειμερινή περίοδο κατά τη διάρκεια της οποίας εμφανίζεται και η μέγιστη ζήτηση. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 3-4:



Σχήμα 3-4: Μέση ημερησια πυκνότητα ενέργειας ανά μήνα, συναρτήσει της κλίσης του φ/β

Παρατηρούμε, ότι αυξανόμενης της κλίσης του πάνελ, αυξάνεται η πυκνότητα ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται κατά τους θερινούς μήνες, και η αντίστοιχη καμπύλη τείνει να ομαλοποιηθεί.

Ωστόσο, για γωνίες μεγαλύτερες των 70° , η παρατηρούμενη μείωση του ηλιακού δυναμικού, των θερινών μηνών, είναι τόσο μεγάλη ώστε η προσπίπτουσα στο πάνελ, ηλιακή ακτινοβολία, το χειμώνα να είναι περισσότερη από αυτήν του

καλοκαιριού, ενώ παράλληλα, περαιτέρω αύξηση της κλίσης, έχει σαν αποτέλεσμα την, εκ νέου, μείωση του ηλιακού δυναμικού το χειμώνα.

Γνωρίζοντας το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό για κάθε μήνα και για διάφορες κλίσεις του πλαισίου, μπορούμε να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ του πλαισίου ώστε, το ποσοστό εκμετάλλευσης του δυναμικού αυτού να επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου.

Για μια μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος 11°C , κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου, και θεωρώντας ότι, σε κάθε περίπτωση, η θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β πλαισίου, είναι ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος προσαυξημένη κατά 25°C , για το συντελεστή θερμοκρασίας ισχύει:

$$\sigma_{\theta} = 1 - ((11^{\circ}\text{C} + 25^{\circ}\text{C}) - 25^{\circ}\text{C}) \cdot 0.5\%/^{\circ}\text{C} \approx 0.95$$

Θεωρώντας περιοδικούς καθαρισμούς της επιφάνειας του πάνελ, αλλά και δεδομένου ότι το ποσοστό ρύπανσης στην εξεταζόμενη περιοχή είναι χαμηλό, μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε για το συντελεστή ρύπανσης ότι :

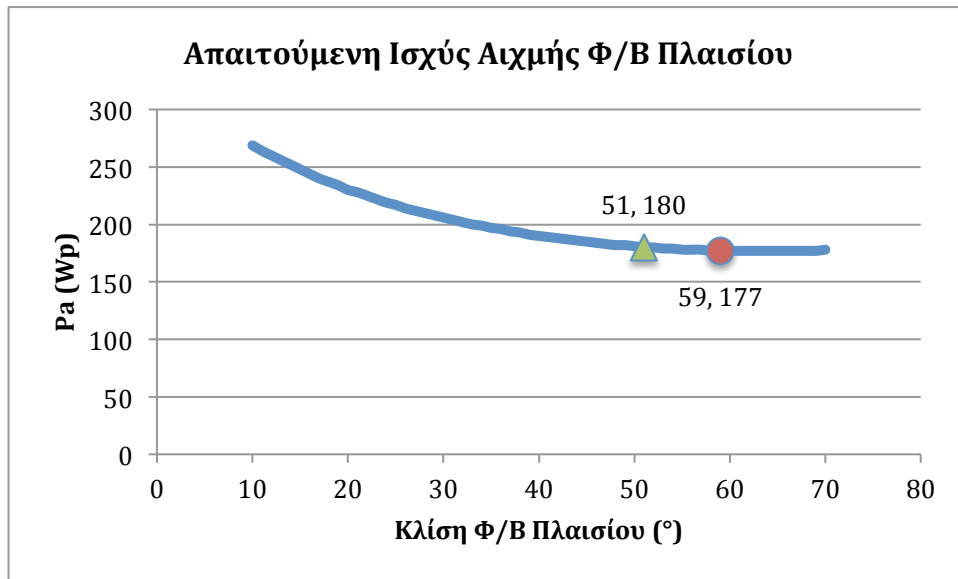
$$\sigma_{\rho} = 0.95$$

Στον υπολογισμό της Ισχύος Αιχμής, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν, ότι η κατανάλωση είναι πλήρως ετεροχρονισμένη σε σχέση με την παραγωγή, γεγονός το οποίο επιβάλλει την αποθήκευση και εν συνεχεία την ανάκτηση της παραγόμενης ενέργειας. Θεωρούμε συντελεστή απόδοσης κατά τη διαδικασία της ανάκτησης της ηλεκτρικής ενέργειας $n_{bat} = 0.85$. Τότε η ενέργεια που πρέπει να παράγεται θα είναι

$$E_{\text{παραγόμενη}} = \frac{E_{\text{ζητούμενη}}}{0.85}$$

Η εφαρμογή της σχέσης (3.3.5.3), μας επιτρέπει τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος αιχμής του φ/β πλαισίου, συναρτήσει της κλίσης τοποθέτησής του για κάθε μήνα του έτους, προκειμένου να καλύπτεται η ζήτηση. Η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια του απαιτητικότερου, από άποψη κατανάλωσης, μήνα, έχει σαν αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος αιχμής και άρα την ελαχιστοποίηση του κόστους και της επιφάνειας του φ/β πλαισίου.

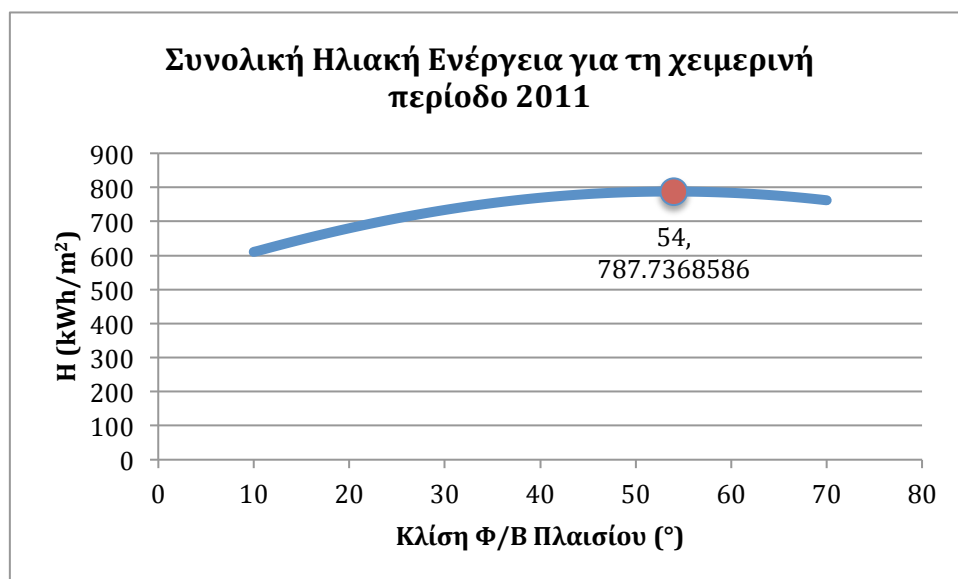
Στην προκειμένη περίπτωση, ο μήνας αυτός είναι ο Δεκέμβριος. Η εξάρτηση της ονομαστικής ισχύος του πάνελ, από την κλίση τοποθέτησής του, για το μήνα Δεκέμβριο του 2011, φαίνεται στο Σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-5: Απαιτούμενη ισχύς αιχμής συναρτήσει της κλίσης του φ/β

Παρατηρούμε ότι, η ελαχιστοποίηση του μεγέθους του πάνελ επιτυγχάνεται στις 59°. Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής παραμένει σταθερή, στην ελάχιστη τιμή της, των 177 Wp, για γωνίες μέχρι τις 69° και στη συνέχεια αυξάνεται.

Η κοντινότερη τιμή ονομαστικής ισχύος εμπορικού φ/β πλαισίου είναι τα 180Wp. Αυτή η τιμή ισχύος αιχμής είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες κατανάλωσης του Δεκεμβρίου για γωνίες από 51° έως 69°. Με δεδομένο, πλέον το μέγεθος του πάνελ και το επιτρεπτό εύρος γωνιών, περαιτέρω βελτιστοποίηση της κλίσης, μπορεί να επιτευχθεί με την απαίτηση της μεγιστοποίησης του συνολικού ηλιακού δυναμικού για τη χειμερινή περίοδο, η οποία ορίζεται, κατά σύμβαση, ως το εξάμηνο από τον Οκτώβριο έως και το Μάρτιο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6: Συνολική ηλιακή ενέργεια χειμερινής περιόδου, συναρτήσει της κλίσης του φ/β

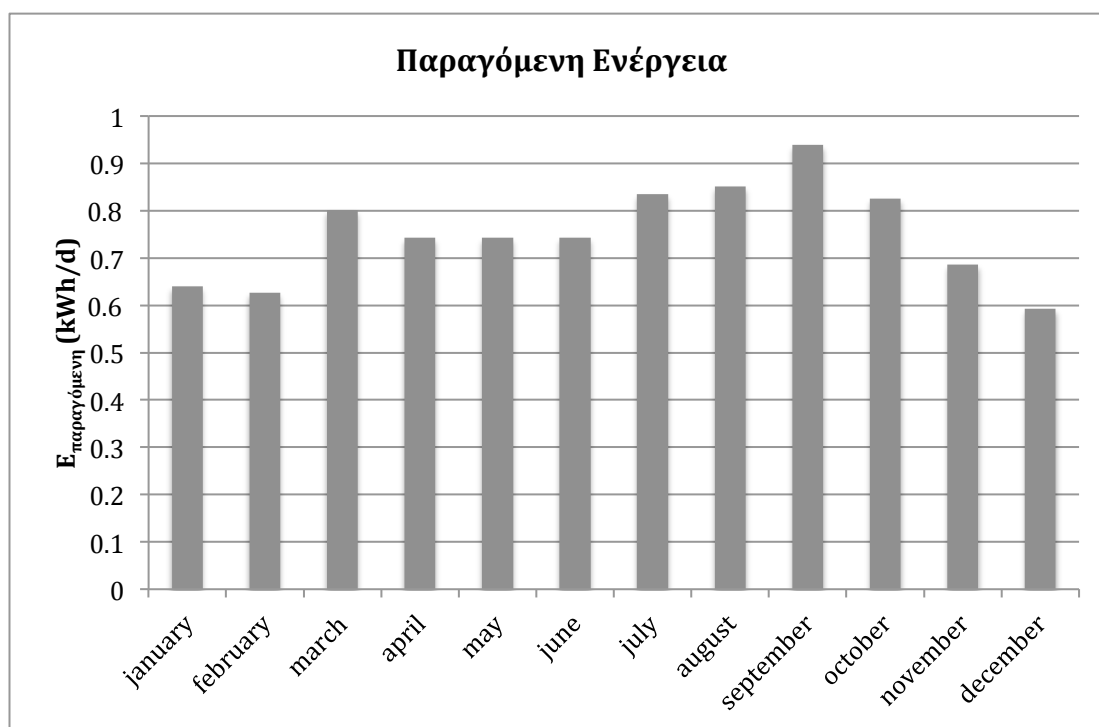
Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέγεται ως βέλτιστος συνδυασμός Ονομαστικής Ισχύος-Κλίσης το ζεύγος (180Wp-54°).

Ακολουθεί υπολογισμός της μέσης, ημερησίως παραγόμενης ενέργειας για κάθε μήνα του έτους, στον Πίνακα 3-1.

Πίνακας 3-1: Ημερήσια παραγόμενη ενέργεια

Μήνας	H (kWh/m ² d)	T (°C)	σ_{θ}	E _{παραγόμενη} (kWh/d)
January	3.94	10	0.95	0.64
February	3.86	10	0.95	0.63
March	4.96	11	0.945	0.8
April	4.67	14	0.93	0.74
May	4.8	19	0.905	0.74
June	4.94	24	0.88	0.74
July	5.71	29	0.855	0.83
August	5.79	28	0.86	0.85
September	6.31	26	0.87	0.94
October	5.25	16	0.92	0.83
November	4.25	11	0.945	0.69
December	3.67	11	0.945	0.59

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3-7.



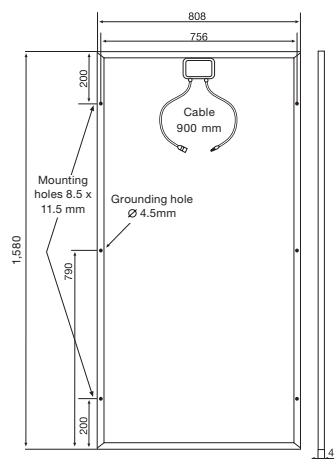
Σχήμα 3-7: Μέση ημερησίως παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα

3.4.4 Επιλογή εμπορικού Φ/Β Πάνελ

Για τις ανάγκες της εξεταζόμενης εφαρμογής, επιλέγεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο P 180M της οικογένειας προϊόντων P 170-180M της Conergy AG.



Εικόνα 3-7: Το φ/β πλαίσιο



All dimensions in mm

Εικόνα 3-8: Διαστάσεις του πλαισίου

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της επιλεγμένης οικογένειας προϊόντων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου

Electrical specifications	P 170 M	P 175 M	P 180 M
Nom. power (P_{NOM}) as per STC ²	170 W	175 W	180 W
Tolerance	±3 %	±3 %	±3 %
Module efficiency	13.3 %	13.7 %	14 %
MPP voltage (V_{MPP})	35.9 V	36 V	36 V
MPP current (I_{MPP})	4.74 A	4.86 A	5 A
Open circuit voltage (V_{OC})	44.5 V	44.8 V	45 V
Short circuit current (I_{SC})	5.12 A	5.17 A	5.2 A
Temperature coefficient (P_{MPP})	-0.4 %/°C	-0.4 %/°C	-0.4 %/°C
Temperature coefficient (V_{OC})	-0.169 V/°C	-0.17 V/°C	-0.171 V/°C
Temperature coefficient (V_{OC})	-0.38 %/°C	-0.38 %/°C	-0.38 %/°C
Temperature coefficient (I_{SC})	2 mA/°C	2 mA/°C	2 mA/°C
Temperature coefficient (I_{SC})	0.04 %/°C	0.04 %/°C	0.04 %/°C
Maximum system voltage	748 V	748 V	748 V
Cells specifications			
Cells	monocrystalline	monocrystalline	monocrystalline
Number of cells	72	72	72
Cell dimensions	125 × 125 mm	125 × 125 mm	125 × 125 mm
Module dimensions			
Dimensions (L × W × H)	1,580 × 808 × 45 mm	1,580 × 808 × 45 mm	1,580 × 808 × 45 mm
Weight	15 kg	15 kg	15 kg
Junction box			
Dimensions (L × W × H)	143 × 140 × 28 mm	143 × 140 × 28 mm	143 × 140 × 28 mm
Safety rating	IP 65	IP 65	IP 65
DC plugs	MC IV	MC IV	MC IV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

4.1 Γενικά

4.1.1 Η Ανάγκη για Αποθήκευση

Χαρακτηριστικό στοιχείο των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, είναι η στοχαστική τους φύση. Το διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό, που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, μοντελοποιείται, κατά περίπτωση, με τη βοήθεια στατιστικών κατανομών. Κατά συνέπεια, μόνο προσεγγιστικά μπορεί κανείς να προσδιορίσει το διαθέσιμο ποσό ενέργειας. Χαρακτηριστική επίσης, είναι η εποχικότητα την οποία εμφανίζουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από τα διάφορα φυσικά φαινόμενα, που συνοδεύουν την κυκλική εναλλαγή των εποχών. Το γεγονός αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα, το ενεργειακό δυναμικό, που προέρχεται από τέτοιες πηγές, να είναι διαθέσιμο, συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, ή συγκεκριμένες εποχές του χρόνου, αφήνοντας στενά περιθώρια για την κατά βούληση παραγωγή ενέργειας και ευνοώντας τον ετεροχρονισμό μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Η φύση, ωστόσο, της ηλεκτρικής ενέργειας, επιβάλλει τον ταυτοχρονισμό της παραγωγή με την κατανάλωση, προκειμένου να υπάρχει υψηλή απόδοση. Προκειμένου λοιπόν, να είναι δυνατή η αποδοτική αξιοποίηση του ανανεώσιμου ενεργειακού δυναμικού, κρίνεται απαραίτητη η αποθήκευση ενέργειας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια παράγεται όταν υπάρχει διαθέσιμο δυναμικό, ανεξαρτήτως της ζήτησης, ένα μέρος της καταναλώνεται και το υπόλοιπο αποθηκεύεται, αναλόγως με τις ανάγκες του συστήματος. Το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύτηκε, ανακτάται κατά βούληση και αναλόγως με τη ζήτηση, όταν κριθεί αναγκαίο.

4.1.2 Μέθοδοι Αποθήκευσης

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στη μετατροπή της σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, η οποία μπορεί να αποθηκευτεί και η οποία αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια όταν απελευθερωθεί υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Ο τομέας της αποθήκευσης ενέργειας, βρίσκεται στο επίκεντρο των επιστημονικών ερευνών και μελετώνται διαρκώς νέες εναλλακτικές. Ορισμένες από τις επικρατέστερες, τεχνολογικά ωριμότερες και οικονομικά βιωσιμότερες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας είναι οι εξής :

- **Αντλιοσταμείωση (Pumped Hydro):** Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται σε αντλίες, οι οποίες μεταφέρουν ποσότητες νερού μεταξύ δεξαμενών τοποθετημένων σε σημεία με μεγάλη διαφορά ύψους, μετατρέποντας την έτσι σε δυναμική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί μέσω υδροηλεκτρικής εγκατάστασης.

- **Πεπιεσμένου Αέρα (CAES):** Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση αέρα και την αποθήκευσή του σε δεξαμενές. Για την ανάκτηση της ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται, εκτονώνεται και οδηγείται μέσω αεριοστροβίλων σε συμβατικές γεννήτριες.
- **Συσσωρευτές:** Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή χημικής ενέργειας και ανακτάται μέσω της αντίστροφης χημικής διεργασίας.
- **Ηλεκτρόλυση:** Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης. Η χρήση κυψελών καυσίμου για την εκμετάλλευση του υδρογόνου έχει σαν αποτέλεσμα την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας.
- **Flywheel:** Η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική και αποθηκεύεται σε περιστρεφόμενους σφονδύλους οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να εκφορτιστούν στο δρομέα μιας γεννήτριας.

Οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, ενώ η υλοποίησή τους είναι αρκετά πολύπλοκη και δαπανηρή. Για την περίπτωση του αυτόνομου φωτιστικού, εξοπλισμένο με φ/β πλαίσιο, η οποία μελετάται στην παρούσα εργασία, ως η ιδανικότερη μέθοδος αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, προκρίνεται η χρήση συσσωρευτών.

4.2 Συσσωρευτές

4.2.1 Γενικά

Ηλεκτρικός συσσωρευτής είναι μια συσκευή η οποία επιτρέπει την απευθείας μετατροπή χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντιστρόφως. Η συσκευή αυτή αποτελείται από έναν αριθμό «βολταϊκών κυττάρων», καθένα από τα οποία αποτελείται από δύο ημιστοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά μέσω αγώγιμου ηλεκτρολύτη που περιέχει ανιόντα και κατιόντα. Το ένα ημιστοιχείο αποτελείται από τον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο στο οποίο επικάθονται τα ανιόντα (άνοδος). Το δεύτερο ημιστοιχείο αποτελείται από τον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο στο οποίο επικάθονται τα κατιόντα (κάθοδος).

Η οξειδοαναγωγική χημική διεργασία, που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του συσσωρευτή, έχει σαν αποτέλεσμα την προσθήκη ηλεκτρονίων στα κατιόντα της καθόδου και την οξείδωση των ανιόντων της ανόδου. Σε κάθε ημιστοιχείο εμφανίζεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη η οποία καθορίζεται από την ικανότητα του να ωθεί ηλεκτρικό ρεύμα από το εσωτερικό του κυττάρου, στο εξωτερικό του. Η συνολική ηλεκτρεγερτική δύναμη του κυττάρου ορίζεται ως η διαφορά των επιμέρους ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων των δύο ημιστοιχείων και αποτελεί την τάση ακροδεκτών ή τάση ανοιχτοκυκλώματος του συσσωρευτή. Η τάση αυτή διαφέρει από την τάση που μετράται στους ακροδέκτες της μπαταρίας, όταν αυτή τροφοδοτεί κάποιο φορτίο λόγω της εσωτερικής αντίστασης την οποία εμφανίζει.

Αναλόγως με τα χημικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρόδια και ως ηλεκτρολύτες, προκύπτουν διάφορα είδη μπαταριών.

4.2.2 Τεχνολογίες Συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές κατατάσσονται σε δύο ευρύες κατηγορίες αναλόγως με τη δυνατότητα επαναφόρτισης τους :

1. **Πρωτεύοντες Μπαταρίες:** Μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική με τρόπο μη αναστρέψιμο. Όταν τα αρχικά αποθέματα των αντιδρώντων ουσιών εξαντληθούν, η ενέργεια δε μπορεί να ανακτηθεί από τη μπαταρία με ηλεκτρικό τρόπο.
2. **Δευτερεύοντες Μπαταρίες:** Μπορούν να επαναφορτιστούν, αντιστρέφοντας τη χημική αντίδραση τροφοδοτώντας τις με ηλεκτρική ενέργεια και επαναφέροντας τις στην αρχική τους κατάσταση.

Η κατηγορία που μας ενδιαφέρει στην περίπτωση των υβριδικών συστημάτων ενέργειας είναι αυτή των δευτερευόντων συσσωρευτών. Ορισμένες από τις δημοφιλέστερες τεχνολογίες επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών είναι οι εξής:

- **Οξέος Μολύβδου:** Η παλαιότερη και τεχνολογικά ωριμότερη τεχνολογία συσσωρευτών. Βρίσκει εφαρμογή σε εφαρμογές όπως εκκίνηση αυτοκινήτων, ηλεκτρικά οχήματα, αυτόνομα και διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα ενέργειας κ.α. .
- **Θείου-Νατρίου:** Χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής. Βρίσκει εφαρμογή σε πολύ μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας.
- **Νικελίου Καδμίου:** Βρίσκουν εφαρμογή σε μικρής κλίμακας φορητές συσκευές. Η χρήση καδμίου τις καθιστά επιβλαβείς από περιβαλλοντικής απόψεως.
- **Ιόντων Λιθίου:** Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας, χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης και δεν εμφανίζει «φαινόμενα μνήμης». Η σωστή χρήση των εν λόγω μπαταριών επιβάλλει τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών συστημάτων διαχείρισης της φόρτισης και της εκφόρτισης.

Πίνακας 4-1: Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών συσσωρευτών.

Technology	Power control	Energy storage	Round-trip	Cycles
	subsystem cost	subsystem cost	efficiency	
	\$/kW	\$/kWh	%	
Advanced lead-acid batteries (2,000 cycle life)	400	330	80	2,000
Sodium/sulfur batteries	350	350	75	3,000
Lead-acid batteries with carbon-enhanced electrodes	400	330	75	20,000
Zinc/bromine batteries	400	400	70	3,000
Vanadium redox batteries	400	600	65	5,000
Lithium-ion Batteries (large)	400	600	85	4,000
Supercapacitors	500	10,000	95	25,000

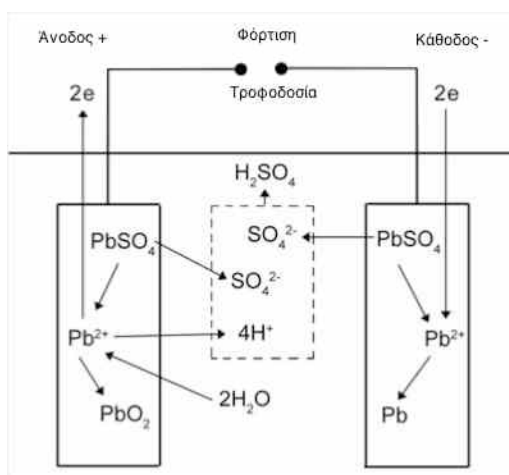
Στην περίπτωση των εφαρμογών φωτοβολταϊκής ενέργειας, η επικρατέστερη τεχνολογία συσσωρευτών είναι αυτή των Οξέος Μολύβδου, κυρίως λόγω της απλότητας που χαρακτηρίζει τις εν λόγω μπαταρίες όσον αφορά την παραγωγή αλλά και την διαχείρισή τους, καθώς και λόγω του χαμηλού τους κόστους. Το γεγονός ότι επιτρέπουν βαθιά εκφόρτιση χωρίς υψηλά ποσοστά αλλοίωσης της

χωριτηκότητας τους καθώς και το γεγονός ότι η απόδοση τους εξαρτάται μόνο από τον τρόπο χρήσης και τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης και δεν υφίσταται κάποια πάγια μείωση με την πάροδο του χρόνου, αποτελεί ένα πρόσθετο λόγο για την επιλογή τους σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών.

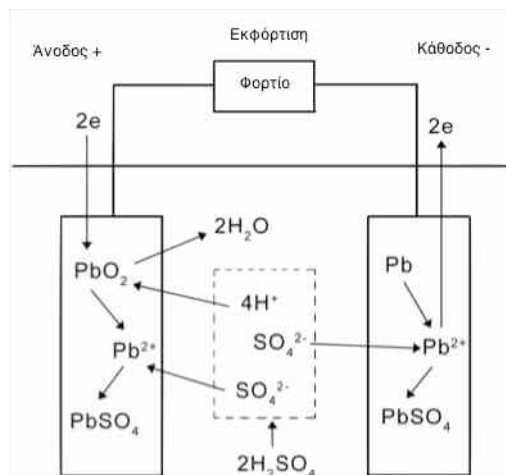
4.2.3 Συσσωρευτές Μολύβδου Οξέος (Lead Acid)

Αρχή λειτουργίας

Στις περισσότερες περιπτώσεις το θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) των μπαταριών μολύβδου οξέος κατασκευάζεται από κάποιο κράμα μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb) στο οποίο γίνεται προσθήκη οξειδίων μολύβδου, ενώ για εφαρμογές μεγάλης διάρκειας ζωής κατασκευάζεται από κράμα μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca). Το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) κατασκευάζεται από καθαρό μόλυβδο. Τα δύο ηλεκτρόδια βυθίζονται σε διάλυμα θειικού οξέος. Η λειτουργία των συσσωρευτών μολύβδου στηρίζεται στην αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία που περιγράφεται σχηματικά στην Εικόνα 4-1 και στην Εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-1: Φόρτιση Συσσωρευτή



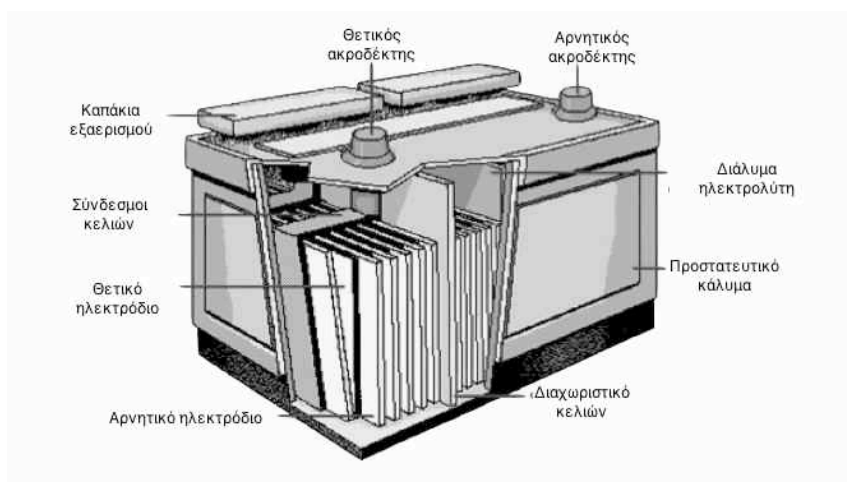
Εικόνα 4-2: Εκφόρτιση Συσσωρευτή

Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται οξείδιο του μολύβδου στο θετικό ηλεκτρόδιο και καθαρός μόλυβδος στο αρνητικό. Παράλληλα απελευθερώνεται θειικό οξύ με αποτέλεσμα την αύξηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση και τροφοδότηση ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο μόλυβδος στην κάθοδο οξειδώνεται παρέχοντας ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα, ενώ ο μόλυβδος στην άνοδο ανάγεται λαμβάνοντας τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα. Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα μολύβδου, ενώνονται με τα θειικά ιόντα από το διάλυμα και ξανασχηματίζουν τον θειικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες των ηλεκτροδίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση θειικού οξέος και τη μείωση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη.

Τύποι Συσσωρευτών Μολύβδου

Οι συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος βαθιάς εκφόρτισης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως με τη σύσταση του ηλεκτρολύτη και την κατασκευή τους ως εξής:

- **Flooded:** Αυτές οι μπαταρίες, έχουν συμβατικό, υγρό ηλεκτρολύτη. Η τυπική περίπτωση flooded μπαταρίας περιλαμβάνει αφαιρούμενο καπάκι, προκειμένου να είναι δυνατή η μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη και η αναπλήρωση του. Στην περίπτωση των σφραγισμένων μπαταριών, δίνεται η δυνατότητα απελευθέρωσης των αερίων που δημιουργούνται κατά τη χρήση, μέσω βαλβίδων. Δεν είναι ωστόσο δυνατή η αναπλήρωση του ηλεκτρολύτη γεγονός που τις καθιστά ευαίσθητες στην υπερφόρτιση. Σημαντικό μειονέκτημα των flooded συσσωρευτών, είναι ο κίνδυνος διαρροής υγρών.
- **Gelled Electrolyte:** Σε αυτή την περίπτωση, ο ηλεκτρολύτης είναι τύπου gel με αποτέλεσμα την αποφυγή διαρροών. Η αδυναμία αναπλήρωσης του ηλεκτρολύτη καθιστά τους εν λόγω συσσωρευτές ευαίσθητους σε υπερφορτίσεις. Τυπική διάρκεια ζωής είναι τα 3 χρόνια, ενώ σχολαστική συντήρηση μπορεί να την επιμηκύνει στα 5 χρόνια.
- **Absorbed Glass Mat (AGM):** Ο ηλεκτρολύτης διατηρείται μεταξύ των πλακών των ηλεκτροδίων, απορροφημένος από ένα σπόγγο πυριτιούχου βορίου. Δεν υπάρχει κίνδυνος διαρροής, ενώ παράλληλα οι εν λόγω μπαταρίες δεν απαιτούν μεγάλη προσοχή στη χρήση τους, ούτε σχολαστική συντήρηση και είναι πιο ανθεκτικές στις υπερφορτίσεις. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους είναι το υψηλό τους κόστος.



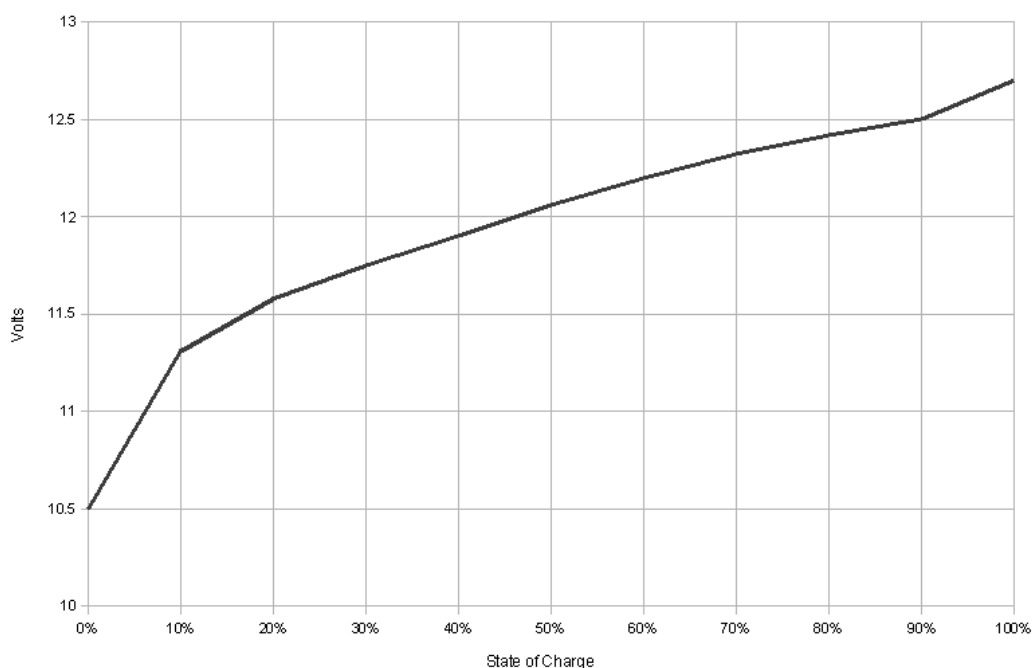
Εικόνα 4-3: Συσσωρευτής μολύβδου οξέος κλειστού τύπου.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή μολύβδου-οξέος είναι τα εξής:

- **Τάση Ακροδεκτών:** Κάθε πλήρως φορτισμένη κυψελίδα συσσωρευτή μολύβδου δίνει τάση 2.14V περίπου. Η τάση αυτή πέφτει περίπου στα 2V αν συνυπολογιστεί η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι αυτή των 6 κυψελίδων συνδεδεμένων σε σειρά με τάση ανοιχτοκύκλωσης μεταξύ 12.6V-12.7V.
- **Χωρητικότητα:** Μετρείται σε αμπερώρια (Ah) και εκφράζει την ποσότητα του φορτίου, την οποία μπορεί να αποδώσει η μπαταρία, όταν τροφοδοτεί επί μια ώρα με ρεύμα 1A κάποιο φορτίο. Εκφράζει δηλαδή, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την πλήρη αποφόρτιση της μπαταρίας όταν αυτή αποδίδει ρεύμα 1A.
- **Βαθμός Απόδοσης:** Λόγω της εσωτερικής αντίστασης και λόγω του γεγονότος ότι η τάση φόρτισης είναι υψηλότερη της τάσης εκφόρτισης, η ανακτώμενη ενέργεια κατά την εκφόρτιση θα είναι λιγότερη από αυτή που προσφέρθηκε στη μπαταρία κατά τη φόρτιση της. Τυπικές τιμές είναι 80%-85%.
- **Επιτρεπτό Βάθος Αποφόρτισης:** Αναφέρεται στο ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί χωρίς την πρόκληση προβλημάτων στη λειτουργία του συσσωρευτή. Τυπική τιμή για μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης είναι 80% .

Χαρακτηριστική επίσης, της τεχνολογίας συσσωρευτών μολύβδου οξέος, είναι η καμπύλη που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της κατάστασης φόρτισης (SOC) της μπαταρίας και της τάσης ακροδεκτών της, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4-1 .



Σχήμα 4-1: Τάση ανοιχτοκύκλωσης συσσωρευτή συναρτήσει του SOC

Γενικά ο ακριβής προσδιορισμός της κατάστασης φόρτισης μιας μπαταρίας είναι δύσκολο εγχείρημα. Ο ακριβέστερος τρόπος είναι η μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Στην περίπτωση των συσσωρευτών μολύβδου ωστόσο, μια αρκετά καλή προσέγγιση μπορεί να γίνει με μέτρηση της τάσης ακροδεκτών.

Πίνακας 4-2: SOC συναρτήσει της τάσης

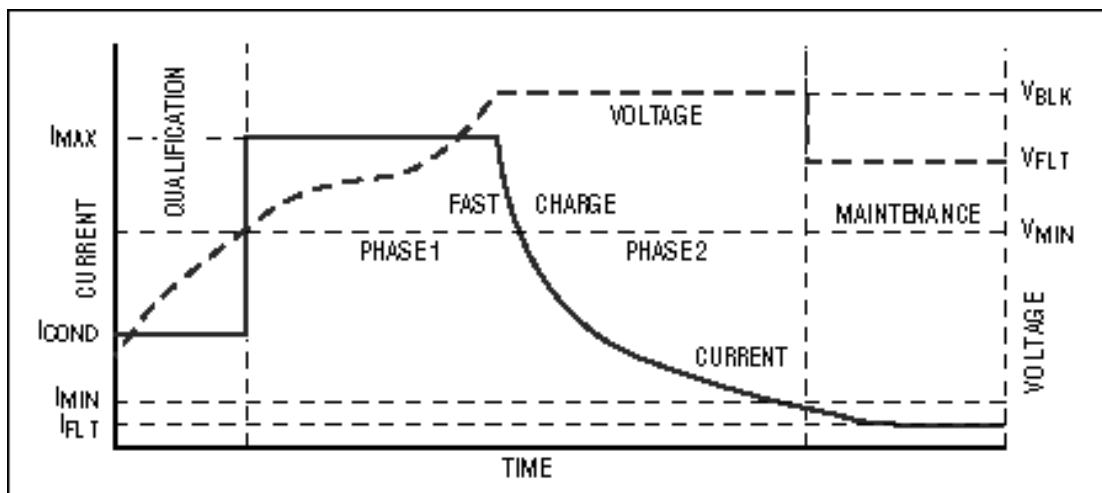
<i>Κατάσταση φόρτισης</i>	<i>Μπαταρία 12 Volt</i>	<i>Volts ανά κελί</i>
100%	12.7	2.12
90%	12.5	2.08
80%	12.42	2.07
70%	12.32	2.05
60%	12.2	2.03
50%	12.06	2.01
40%	11.9	1.98
30%	11.75	1.96
20%	11.58	1.93
10%	11.31	1.89
0	10.5	1.75

Φόρτιση

Η σωστή φόρτιση των συσσωρευτών μολύβδου οξέος επιτυγχάνεται σε τρία διακριτά στάδια:

1. **Bulk Charge:** Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου φόρτισης, τροφοδοτείται φορτίο στις μπαταρίες με το μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό, έως ότου να επιτευχθεί το 80%-90% της πλήρους φόρτισης και η τάση της μπαταρίας να φτάσει στο αντίστοιχο επίπεδο. Το απορροφώμενο ρεύμα είναι σταθερό και είναι το μέγιστο επιτρεπτό.
2. **Absorption Charge:** Σε αυτό το στάδιο η τάση παραμένει σταθερή και το ρεύμα σταδιακά μειώνεται καθώς ταυτόχρονα με τη φόρτιση αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου η διάταξη φόρτισης εφαρμόζει τη μέγιστη τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας, η οποία τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 14V-15.5V.
3. **Float Charge:** Όταν ο συσσωρευτής φορτιστεί πλήρως, η τάση φόρτισης μειώνεται, τυπικά μεταξύ 12.8V-13.2V, για να αποφευχθεί η δημιουργία αερίων, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και εξάτμισης του ηλεκτρολύτη και να επιμηκυνθεί έτσι η διάρκεια ζωής. Ο κύριος σκοπός αυτού του σταδίου φόρτισης είναι η αποφυγή της αποφόρτισης της ήδη φορτισμένης μπαταρίας. Οι μικρές διακυμάνσεις της τάσης εντοπίζονται από τη διάταξη φόρτισης και εξισορροπούνται.

Τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2: Στάδια φόρτισης συσσωρευτή

4.3 Αυτονομία του Συστήματος

4.3.1 Γενικά

Η αυτονομία ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, έγκειται στην ικανότητα του συστήματος αυτού, να μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, χωρίς δηλαδή να εξαρτάται από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αυτόνομη λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να συνοδεύεται από ένα σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας, ώστε να εξασφαλίζεται, ανά πάσα στιγμή, η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του φορτίου. Η απαίτηση για αυτονομία, επηρεάζει άμεσα τη διαστασιολόγηση των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος και ποσοτικοποιείται με τον προσδιορισμό των ημερών ανά έτος, κατά τη διάρκεια των οποίων το σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί αυτόνομα. Πολλές φορές, στις απαιτήσεις για αυτονομία, συνυπολογίζεται και το χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου, το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να εξυπηρετήσει το φορτίο, σε περίπτωση μηδενικής παραγωγής ενέργειας.

Στην περίπτωση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, την οποία μελετάμε, για δεδομένο μέγεθος φ/β πάνελ, η αυτονομία εξαρτάται άμεσα από τη διαστασιολόγηση του μέσου αποθήκευσης της ενέργειας, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση, του συσσωρευτή.

4.3.2 Διαστασιολόγηση

Δεδομένου ότι, η διαστασιολόγηση του φ/β πάνελ του συστήματος, έγινε με γνώμονα την κάλυψη των αναγκών του απαιτητικότερου μήνα, από άποψη ζήτησης, η αυτονομία του συστήματος εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαστασιολόγηση του συσσωρευτή μολύβδου οξέος. Ο συσσωρευτής θα πρέπει να δύναται να αποδώσει στο σύστημα, ενέργεια, τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας που ζητείται από αυτό στη διάρκεια μιας ημέρας. Η εν λόγω

ποσότητα ενέργειας, πρέπει να επαυξηθεί κατά κάποιο ποσοστό, αναλόγως με το επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης και το βαθμό απόδοσης της μπαταρίας, προκειμένου να προσδιορίσουμε την απαιτούμενη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, πρέπει να προσδιοριστεί η τάση εξόδου του συστήματος αποθήκευσης και η διάταξη του απαιτούμενου αριθμού συσσωρευτών.

Έτσι η απαιτούμενη χωρητικότητα ενός συσσωρευτή, ονομαστικής τάσης ακροδεκτών V , βαθμού απόδοσης η και βάθους εκφόρτισης β , δίνεται ως:

$$C(Ah) = \frac{E_{\text{αποθηκευόμενη}}(Wh)}{V} = \frac{E_{\text{ζητούμενη}}(Wh)}{V \cdot \beta \cdot \eta} \quad (4.3.2.1)$$

όπου, $E_{\text{ζητούμενη}}$, η ποσότητα ενέργειας που πρέπει να μπορούμε να ανακτήσουμε από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία.

4.3.3 Πιθανότητα Μη Τροφοδοτούμενης Ενέργειας

Ένα χρήσιμο μέτρο αξιολόγησης της αυτονομίας ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, είναι η πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (Loss of Load Probability, LLP). Για τον προσδιορισμό της LLP, λαμβάνεται ένα χρονικό διάστημα, στο οποίο προσομοιώνεται η λειτουργία του υπό εξέταση συστήματος, και προσδιορίζεται το αντίστοιχο, συνολικό, χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου, δεν είναι η δυνατή η εξυπηρέτηση των αναγκών του φορτίου. Ο λόγος του χρονικού αυτού διαστήματος, προς το συνολικό εξεταζόμενο χρονικό διάστημα, μας δίνει ένα ποσοστό, το οποίο εκφράζει την πιθανότητα, που εμφανίζει, το αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας, να μη μπορεί να τροφοδοτήσει το φορτίο. Συνήθως, η πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας, προκαθορίζεται ως περιορισμός κατά το στάδιο διαστασιολόγησης του συστήματος, ενώ ως τυπικά αποδεκτές, λαμβάνονται τιμές μικρότερες ή ίσες του 5%.

4.4 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ

4.4.1 Περιγραφή

Σκοπός της παρούσης ενότητας, είναι η εφαρμογή των συμπερασμάτων του παρόντος κεφαλαίου, για την κατάλληλη επιλογή και διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης του υβριδικού αυτόνομου συστήματος φωτισμού, που θα χρησιμοποιηθεί στις κεντρικές πλατείες του συγκροτήματος της Πολυτεχνειούπολης στου Ζωγράφου. Για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, σχετικά με την λειτουργία και την αυτονομία του συστήματος, θα πραγματοποιηθεί αντίστοιχη προσομοίωση με τη βοήθεια του λογισμικού **PV*Sol Expert**. Η αντίστοιχη μελέτη, διαστασιολόγηση και προσομοίωση, θα πραγματοποιηθεί για ένα φωτιστικό και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, μπορούν εν συνεχεία να επεκταθούν για το σύνολο της εγκατάστασης φωτισμού.

4.4.2 Διαστασιολόγηση Συσσωρευτή

Όπως είδαμε, η ιδανικότερη επιλογή συστήματος αποθήκευσης για υβριδικά συστήματα ενέργειας πολύ μικρής κλίμακας, όπως το εξεταζόμενο, είναι οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης (Deep Cycle), τεχνολογίας μολύβδου οξέος, κυρίως λόγω της απλότητας, της αξιοπιστίας και του χαμηλού τους κόστους.

Η μέγιστη ζήτηση ενέργειας, όπως προσδιορίστηκε σε προηγούμενη ενότητα, εμφανίζεται το Δεκέμβριο και είναι

$$E_{\text{ζητούμενη}} = 35.5W \cdot 14h \approx 500Wh$$

Συνεπώς, για ένα συσσωρευτή μολύβδου οξέος, ονομαστικής τάσης 12V, βαθμού απόδοσης 85% και μέγιστου επιτρεπτού βάθους εκφόρτισης 80%, η θεωρητικώς απαιτούμενη χωρητικότητα προκύπτει ως:

$$C = \frac{500Wh}{0.8 \cdot 0.85 \cdot 12V} = 61.3Ah$$

Έτσι, μια μπαταρία χωρητικότητας 61.3Ah, εξασφαλίζει την αποθήκευση περίπου 735Wh, εκ των οποίων μπορούν να ανακτηθούν οι 500Wh. Είδαμε, ωστόσο, στο προηγούμενο κεφάλαιο, ότι η παραγόμενη ενέργεια, από το σύστημα, ξεπερνάει τις 735Wh για 8 απο του 12 μήνες του έτους, ενώ η μέγιστη τιμή της, εμφανίζεται το Σεπτέμβριο και είναι 940Wh κατά μέσο όρο. Αυτό σημαίνει, πως η χρήση ενός συσσωρευτή με μέγιστη δυνατότητα αποθήκευσης 735Wh, θα έχει ως αποτέλεσμα αρκετά μεγάλες ποσότητες μη αξιοποιήσιμης ενέργειας καθώς και αυξημένο αριθμό πλήρων εκφορτίσεων της μπαταρίας και συνεπώς μείωση της διάρκειας ζωής της. Για το λόγο αυτό, προτείνεται, η διαστασιολόγηση του συσσωρευτή να γίνει με γνώμονα τη δυνατότητα ανάκτησης της μέγιστης παραγόμενης ενέργειας. Έτσι προκύπτει:

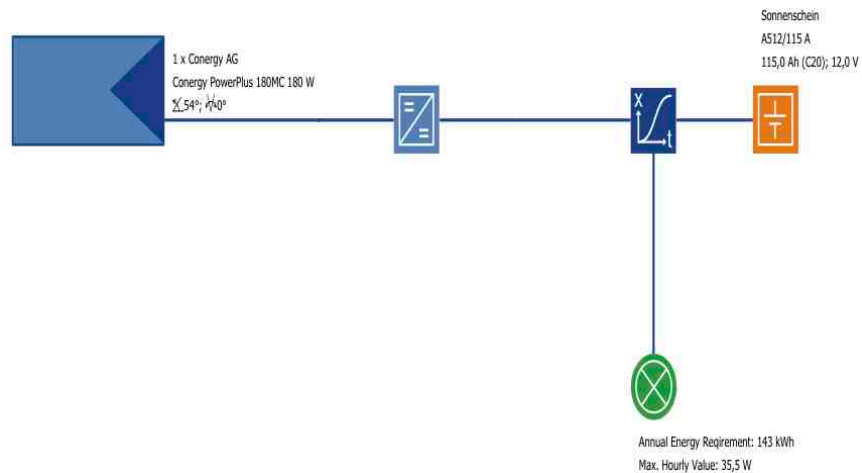
$$C = \frac{940Wh}{0.8 \cdot 0.85 \cdot 12V} \approx 115Ah$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, αφενός βελτιώνεται η συνολική αξιοπιστία και αυτονομία του συστήματος, δεδομένου ότι η περίσσεια της αποθηκευμένης ενέργειας μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα, τους μήνες με χαμηλή παραγωγή και υψηλή κατανάλωση, αφετέρου δε, βελτιώνεται η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή λόγω της αύξησης της μέσης τιμής του SOC, με αποτέλεσμα την αντιστάθμιση του υψηλότερου κόστους επένδυσης.

4.4.3 Προσομοίωση

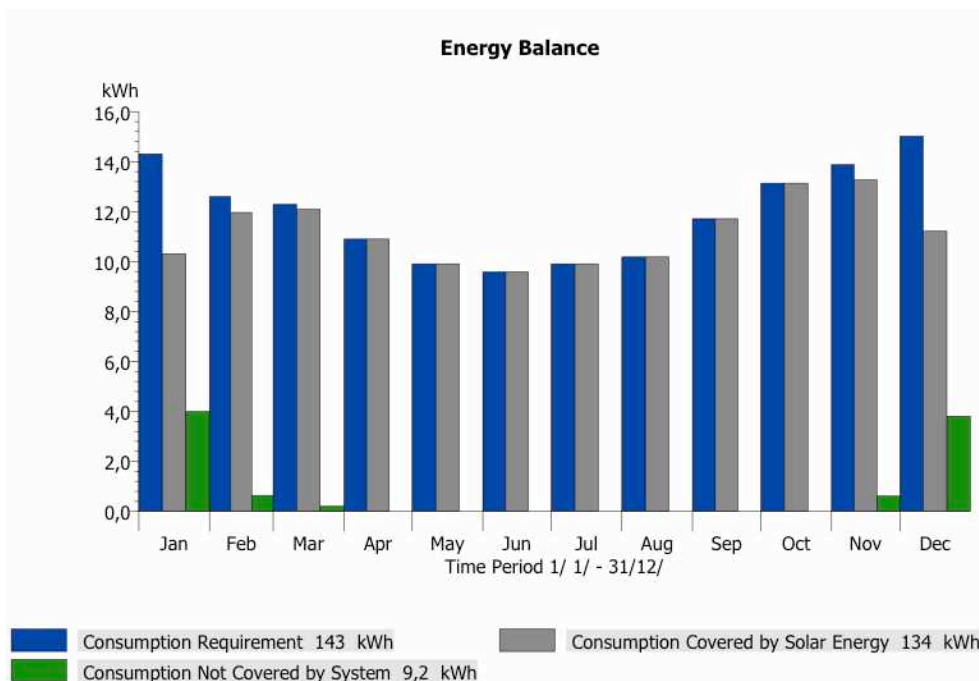
Με δεδομένη, πλέον, τη διαστασιολόγηση των θεμελιωδών συνιστωσών του συστήματος, είμαστε σε θέση να εκτελέσουμε μια προσομοίωση της λειτουργίας του για ένα χρονικό ορίζοντα ενός έτους. Για την προσομοίωση του συστήματος θα χρησιμοποιηθεί το επαγγελματικό λογισμικό μελέτης φ/β συστημάτων και εγκαταστάσεων, **PV*Sol Expert 5.5**, το οποίο μας επιτρέπει την

επιλογή εμπορικών μοντέλων φ/β πάνελ και συσσωρευτών καθώς και τη μοντελοποίηση του φορτίου, ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψιν, τις διάφορες παράπλευρες απώλειες που παρουσιάζει ένα πραγματικό φ/β σύστημα καθώς και πληθώρα παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.
 Το σχεδιάγραμμα του, υπό εξέταση, συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3: Σχεδιάγραμμα του φ/β συστήματος

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, σχετικά με την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συστήματος συνοψίζονται στο Σχήμα 4-4



Σχήμα 4-4: Ενεργειακό ισοζύγιο φ/β συστήματος

Παρατηρούμε ότι στο μεγαλύτερο μέρος του έτους το σύστημα λειτουργεί χωρίς να υπάρχει απώλεια τροφοδοτούμενης ενέργειας.

Τη χειμερινή περίοδο, ωστόσο, παρουσιάζεται ένα έλλειμμα ενέργειας, το οποίο κορυφώνεται κατά τη διάρκεια των δυο πιο απαιτητικών μηνών, Ιανουάριο και Δεκέμβριο, και η συνολική του τιμή ανέρχεται στις 9.2kWh.

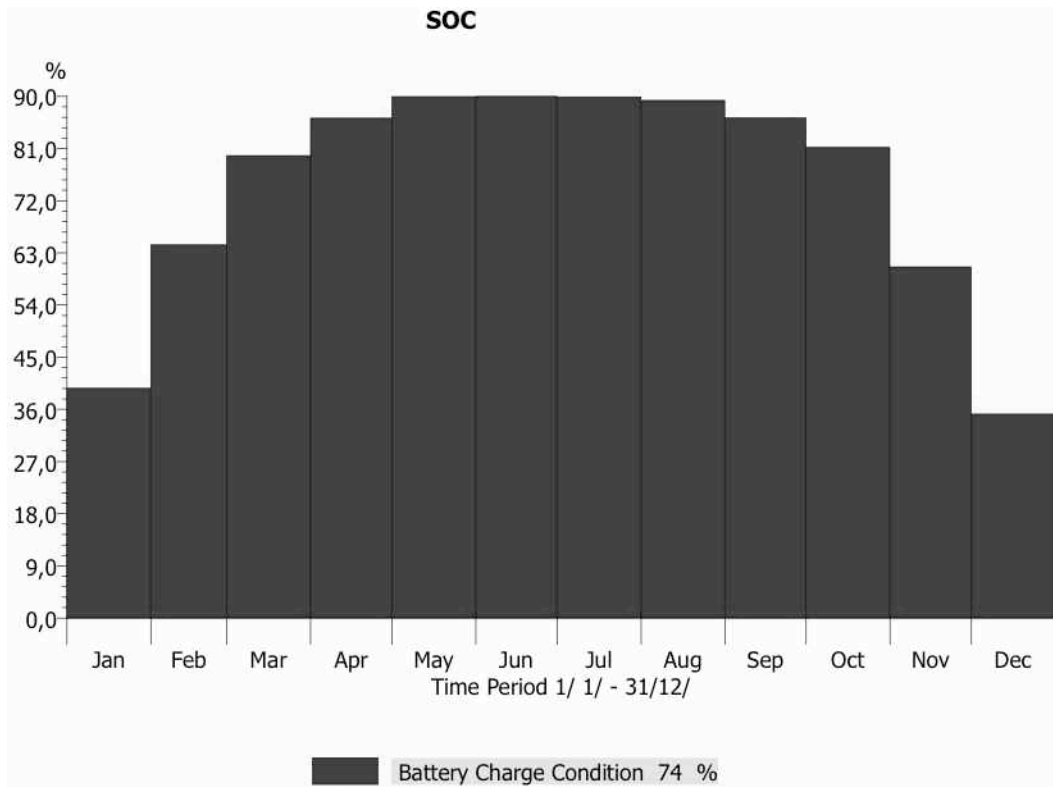
Δεδομένου ότι η καταναλισκόμενη ισχύς του συστήματος είναι 35.5W και θεωρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό αριθμό ωρών, κατά τη διάρκεια των οποίων, το φορτίο ήταν αδύνατο να τροφοδοτηθεί, για κάθε μήνα. Δεδομένων των απαιτούμενων ωρών λειτουργίας του φωτιστικού, για κάθε μήνα, μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα απώλειας φορτίου.

Πίνακας 4-3 : Υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας φορτίου

		Consumption Requirement	Consumption Covered	Consumption Not Covered	LOLP[%]
	Annual Value:	143 [kWh]	134 [kWh]	9.2 [kWh]	6.20%
From	To				
1/ 1/	1/ 2/	14.3065	10.30925	3.99725	25.94437593
1/ 2/	1/ 3/	12.6025	11.96572	0.63678	4.927874942
1/ 3/	1/ 4/	12.283	12.08681	0.19619	1.4856126
1/ 4/	1/ 5/	10.8985	10.8985	0	0
1/ 5/	1/ 6/	9.9045	9.9045	0	0
1/ 6/	1/ 7/	9.585	9.585	0	0
1/ 7/	1/ 8/	9.9045	9.9045	0	0
1/ 8/	1/ 9/	10.1885	10.1885	0	0
1/ 9/	1/10/	11.715	11.715	0	0
1/10/	1/11/	13.135	13.135	0	0
1/11/	1/12/	13.8805	13.27283	0.60767	4.389093536
1/12/	1/ 1/	15.0165	11.21255	3.80395	24.68975141

Όπως ήταν αναμενόμενο, η πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας κορυφώνεται τους μήνες με το μικρότερο ηλιακό δυναμικό και την υψηλότερη ζήτηση, Ιανουάριο και Δεκέμβριο. Κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου έτους, η αντίστοιχη πιθανότητα δεν ξεπερνάει το 5%. Η αντίστοιχη ετήσια τιμή ανέρχεται σε 6.2%, μπορεί ωστόσο, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, να μειωθεί περαιτέρω, με εφαρμογή ρύθμισης της φωτεινής ισχύος, κατά περίπτωση.

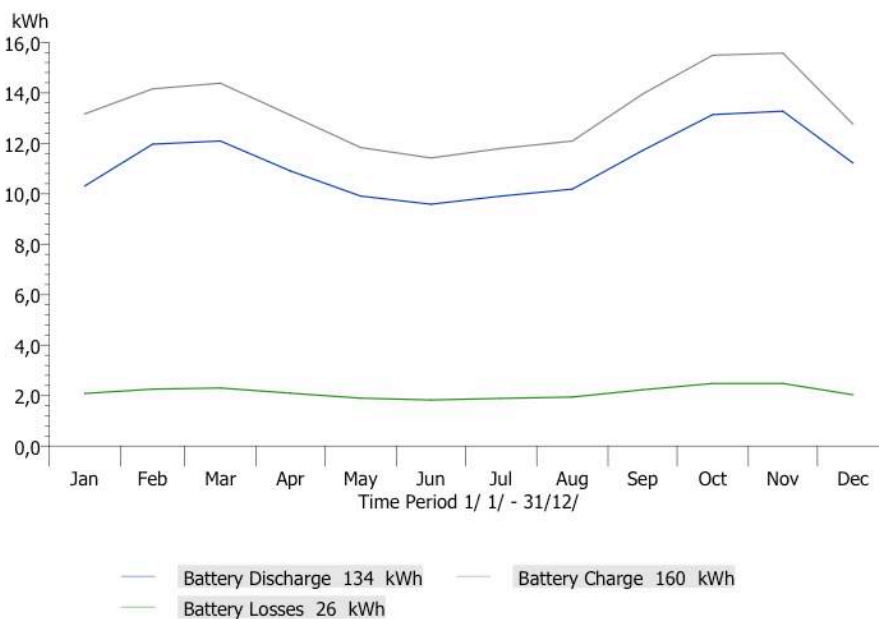
Μια επιπλέον σημαντική πληροφορία, την οποία μπορούμε να αντλήσουμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είναι η τιμή της κατάστασης φόρτισης (SOC) του συσσωρευτή, ανά πάσα στιγμή κατά τη διάρκεια του έτους. Με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων αυτών, μπορούμε να σχεδιάσουμε προφίλ φωτεινότητας του φωτιστικού κατά τη διάρκεια του έτους, με σκοπό να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας. Το διάγραμμα της μέσης μηνιαίας κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή παρατίθεται στη συνέχεια.



Σχήμα 4-5: Μέση ημερήσια κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή ανά μήνα.

Η διατήρηση υψηλής μέσης τιμής SOC, η οποία επιτυγχάνεται, είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση της καλής λειτουργίας και της μακροζωίας του συσσωρευτή.

Στο Σχήμα 4-6 φαίνεται η διακίνηση φορτίου από και προς τη μπαταρία καθώς και οι αντίστοιχες απώλειες, κατά τη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 4-6: Διακίνηση ενέργειας από και προς το συσσωρευτή

4.4.4 Επιλογή Εμπορικού Μοντέλου Συσσωρευτή

Για τις ανάγκες της εξεταζόμενης εφαρμογής, επιλέγεται ο συσσωρευτής μολύβδου οξέος, βαθιάς εκφόρτισης, τύπου AGM και ονομαστικής χωρητικότητας 115Ah, με κωδικό DC115-12 της εταιρίας Fullriver. Οι χαρακτηριστικές εκφόρτισης και ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή παρουσιάζονται στη συνέχεια.

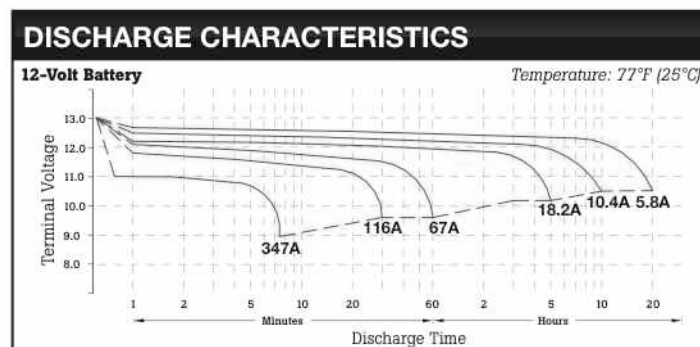


SPECIFICATIONS		
Nominal Voltage		12 Volt
Rated Capacity (20 hour rate)		115AH
Dimensions	Total Height (including terminals)	220mm (8.66")
	Height	214mm (8.43")
	Length	328mm (12.91")
	Width	172mm (6.77")
Weight		32.8kg (72.1 lbs)

Εικόνα 4-4: Προδιαγραφές συσσωρευτή

Πίνακας 4-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτή

CHARACTERISTICS		
Capacity 77°F (25°C)	20 Hour Rate (5.8A to 10.5 Volts)	115AH
	10 Hour Rate (10.4A to 10.5 Volts)	104AH
	5 Hour Rate (18.2A to 10.2 Volts)	91AH
	Full charged Battery 77°F (25°C)	3.8m Ω
Internal Resistance	104°F (40°C)	102%
	77°F (25°C)	100%
	32°F (0°C)	85%
Capacity Affected by Temperature (20 Hour Rate)	5°F (-15°C)	65%
	Capacity after 3 month storage	91%
	Capacity after 6 month storage	82%
Self-Discharge 77°F(25°C)	Capacity after 12 month storage	64%
	Max. Discharge Current 77°F (25°C)	1100A (5s)
Terminal	Standard	M8
Charging (Constant Voltage)	Cycle	Initial Charging Current $\leq 0.2 \times C20$ 14.4V ~ 14.9V/77°F (25°C)
	Float	13.6V ~ 13.8V/77°F (25°C)



Εικόνα 4-5: Χαρακτηριστικές εκφόρτισης συσσωρευτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

5.1 Γενικά

Το τελευταίο και σημαντικότερο μέρος ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, αποτελείται από όλα τα επιμέρους συστήματα ελέγχου των διαφόρων λειτουργιών του συνολικού συστήματος και από την κεντρική μονάδα ελέγχου, η οποία συντονίζει τις λειτουργίες αυτές. Τυπικές λειτουργίες της μονάδας ελέγχου, ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, είναι ο έλεγχος της παραγωγής ενέργειας από τις διάφορες πηγές του συστήματος, ο έλεγχος της αποθήκευσης ενέργειας και η αποτελεσματική διαχείριση των φορτίων του συστήματος με σκοπό τον έλεγχο της ροής ενέργειας προς αυτά. Οι λειτουργίες αυτές πραγματοποιούνται με γνώμονα, την, όσο το δυνατόν, αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού, τη μεγιστοποίηση της αυτονομίας του συστήματος και την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των φορτίων.

Στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος φωτισμού, όπως αυτό έχει παρουσιαστεί στην παρούσα εργασία, οι βασικές λειτουργίες, οι οποίες θα πρέπει να εξασφαλίζονται από τα συστήματα ελέγχου, είναι οι εξής:

- **Έλεγχος Φόρτισης:** Θα πρέπει η φόρτιση του συσσωρευτή να γίνεται με τρόπο ελεγχόμενο ώστε, αφενός να εξασφαλίζεται η βέλτιστη αξιοποίηση της διαθέσιμης παραγόμενης ενέργειας (MPPT) και αφετέρου, να εξασφαλίζεται η προστασία του από υπερφορτίσεις και υπερθερμάνσεις, με σκοπό την καλή λειτουργία και τη μεγιστοποίηση του προσδόκιμου ζωής του.
- **Έλεγχος του Φορτίου:** Ο έλεγχος του φορτίου στην προκειμένη περίπτωση συνίσταται, αφενός στη σύνδεση και αποσύνδεση του φορτίου στο σύστημα και αφετέρου, στον έλεγχο των λειτουργικών χαρακτηριστικών αυτού. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η τροφοδότηση του φορτίου τις νυχτερινές ώρες και η διακοπή αυτής όταν δεν υπάρχει ανάγκη για φωτισμό. Επιπλέον, θα πρέπει να προστατεύεται ο συσσωρευτής από τυχόν εκφορτίσεις πέραν του επιτρεπτού βάθους εκφόρτισης, ενώ παράλληλα, να εξασφαλίζονται τα επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά των LEDs, προκειμένου να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα φωτισμού.

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα επιμέρους συστήματα ελέγχου που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των ανωτέρω λειτουργιών και θα προταθούν κάποιες υλοποιήσεις για εφαρμογή στη μελέτη περίπτωσης, του σχεδιασμού αυτόνομου φωτιστικού για το φωτισμό των κεντρικών πλατειών του συγκροτήματος της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου.

5.2 Έλεγχος Φόρτισης

5.2.1 Ρυθμιστές Φόρτισης

Σε κάθε εφαρμογή αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, απαιτείται η ύπαρξη κάποιας διάταξης, η οποία θα συνδέει αποτελεσματικά το στάδιο παραγωγής με το στάδιο αποθήκευσης της ενέργειας. Η διάταξη αυτή θα αναλαμβάνει τόσο την αποτελεσματική και ασφαλή φόρτιση των συσσωρευτών, όσο και την εκφόρτιση αυτών. Επιπλέον, θα μεριμνά για την προστασία της πηγής και της μπαταρίας από ανεπιθύμητες καταστάσεις λειτουργίας. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν, ηλεκτρονικές διατάξεις, τις οποίες καλούμε ρυθμιστές φόρτισης. Οι διατάξεις αυτές, ενσωματώνουν κυκλώματα ρύθμισης της τάσης και του ρεύματος φόρτισης των συσσωρευτών, καθώς και κυκλώματα προστασίας από υπερτάσεις, υπερεντάσεις και υψηλές θερμοκρασίες, ενώ το σύνολο των λειτουργιών τους συντονίζεται από κάποιο μικροεπεξεργαστή, ο οποίος αναλαμβάνει την υλοποίηση των αλγορίθμων φόρτισης.

Οι δύο δημοφιλέστεροι τύποι ρυθμιστών φόρτισης είναι οι ρυθμιστές PWM και οι ρυθμιστές MPPT. Η διαρκώς μεταβαλλόμενη έξοδος των φ/β πλαισίων αναλόγως με τις συνθήκες ηλιοφάνειας, καθώς και το γεγονός ότι, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, θα πρέπει να εφαρμόζονται συγκεκριμένες τιμές τάσης και ρεύματος στη μπαταρία, καθιστούν απαραίτητη τη δυνατότητα ρύθμισης της εξόδου του φ/β πλαισίου και της τάσης και του ρεύματος φόρτισης. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση μετατροπέων συνεχούς τάσης, οι οποίοι, επιτηρούν διαρκώς την τάση και το ρεύμα εξόδου του φ/β , και ελεγχόμενοι μέσω σημάτων διαμορφωμένου εύρους παλμού (PWM), ρυθμίζουν την τάση και το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή καταλλήλως. Μια αποτελεσματικότερη προσέγγιση, είναι η ανίχνευση του διαρκώς μεταβαλλόμενου σημείου μέγιστης ισχύος του φ/β πάνελ (MPPT) και το ταίριασμα της τάσης και του ρεύματος φόρτισης με αυτό, ώστε, ανά πάσα στιγμή, να μεταφέρεται από το πάνελ στη μπαταρία η μέγιστη δυνατή ισχύς. Η χρήση MPPT ρυθμιστή, αυξάνει το κόστος της εφαρμογής, μπορεί ωστόσο, ταυτοχρόνως, να αυξήσει την απόδοση της φόρτισης κατά 30%.

5.2.2 Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης

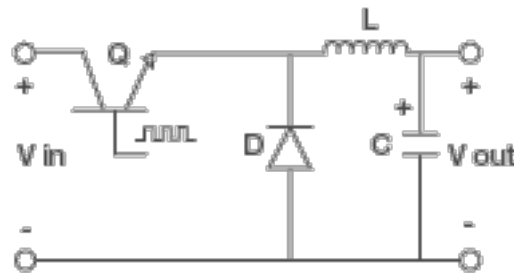
Το βασικό δομικό συστατικό ενός ρυθμιστή φόρτισης είναι μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος η οποία αναλαμβάνει τη μετατροπή ενός επιπέδου συνεχούς τάσης, σε ένα άλλο υψηλότερο ή χαμηλότερο, επίπεδο, αναλόγως με τη χρησιμοποιούμενη τοπολογία. Η διάταξη αυτή καλείται μετατροπέας συνεχούς τάσης (DC/DC converter). Οι δύο δημοφιλέστερες τοπολογίες DC/DC μετατροπέων είναι η τοπολογία τύπου buck, η οποία υποβιβάζει την τάση εισόδου της, και η τοπολογία τύπου boost, η οποία την ανυψώνει.

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται η τοπολογία και η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού, η χρήση του οποίου είναι απαραίτητη για την υλοποίηση ενός ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT.

Μετατροπέας Υποβιβασμού (DC/DC Buck Converter)

Η λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού βασίζεται στη δυνατότητα ρύθμισης της μέσης τιμής ενός τετραγωνικού παλμού, μέσω μεταβολής του Duty Cycle του παλμού αυτού. Εν συνεχεία, το φίλτράρισμα του προκύπτοντος σήματος, έχει σαν αποτέλεσμα την αποκοπή των περιττών συχνοτήτων του τετραγωνικού παλμού και την απομόνωση ενός DC σήματος σταθερού επιπέδου τάσης, ίσου με τη μέση τιμή του αρχικού σήματος.

Πιο αναλυτικά, η εν λόγω διάταξη αποτελείται από ένα διακοπτικό στοιχείο υψηλών συχνοτήτων Q (MOSFET, IGBT κτλ.), του οποίου η πύλη ελέγχεται από σήμα διαμορφωμένου εύρους παλμού, μια δίοδο και ένα φίλτρο εξόδου τύπου LC.



Εικόνα 5-1: Μετατροπέας υποβιβασμού

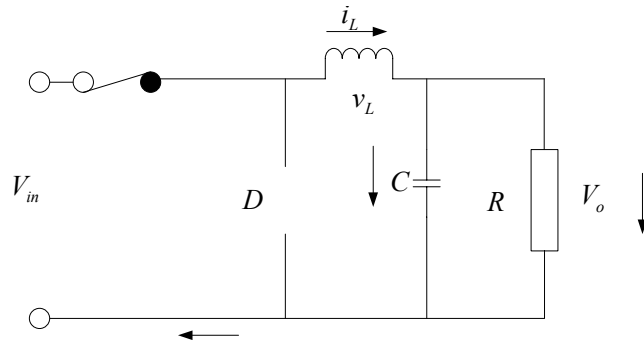
Η διάταξη, δέχεται στην είσοδό της συνεχή τάση, τιμής V_{in} , και αποδίδει στην έξοδο συνεχή τάση V_{out} , η οποία μπορεί να πάρει τιμές από 0V έως V_{in} , αναλόγως με το Duty Cycle του παλμού οδήγησης της πύλης του διακοπτικού στοιχείου. Όταν ο διακόπτης Q άγει, το ρεύμα διαμέσου του πηνίου τείνει να αυξηθεί. Το πηνίο, αντιδρώντας στην αύξηση αυτή του ρεύματος, προκαλεί μια πτώση τάσης στα άκρα του, αποθηκεύοντας ταυτοχρόνως ενέργεια με τη μορφή μαγνητικού πεδίου. Η πτώση τάσης στα άκρα του πηνίου βαίνει μειούμενη, έως ότου να μηδενιστεί, όταν το πηνίο θα έχει φορτιστεί πλήρως. Αν ο Q ανοίξει πριν να φορτιστεί πλήρως το πηνίο, τότε πάντα θα υπάρχει στα άκρα του πηνίου μια πτώση τάσης, με αποτέλεσμα στο φορτίο να εφαρμόζεται τάση μικρότερη από την τάση εισόδου. Όσο ο διακόπτης είναι ανοιχτός, το πηνίο αντιδρά στη μείωση του ρεύματος απελευθερώνοντας την αποθηκευμένη του ενέργεια. Αναλόγως με την επιλογή των στοιχείων που την απαρτίζουν καθώς και με το φορτίο το οποίο καλείται να τροφοδοτήσει, η εν λόγω τοπολογία μπορεί να βρεθεί σε δύο διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Στην περίπτωση που το ρεύμα του πηνίου δεν μηδενίζεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, λέμε ότι έχουμε λειτουργία συνεχούς αγωγής. Σε αντίθετη περίπτωση έχουμε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής.

Προκειμένου να εκφράσουμε την παραπάνω λειτουργία με μαθηματικές εξισώσεις θα θεωρήσουμε, χάριν απλότητας, ότι τα στοιχεία που απαρτίζουν το κύκλωμα είναι ιδανικά και ότι ο μετατροπέας λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς αγωγής.

Διακρίνουμε δύο καταστάσεις λειτουργίας του κυκλώματος, αναλόγως με το αν άγει το διακοπτικό στοιχείο Q ή όχι.

Θεωρώντας ότι ο διακόπτης Q αρχίζει να άγει τη χρονική στιγμή $t=0$ και παραμένει κλειστός έως τη χρονική στιγμή $t=t_{on}$, τότε, για αυτό το χρονικό διάστημα, εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων του Kirchhoff προκύπτει ότι:

$$V_{in} = V_L + V_o \quad (5.2.2.1)$$



Εικόνα 5-2: Κατάσταση αγωγής του διακοπτικού στοιχείου.

Για την τάση στα άκρα του πηνίου ισχύει:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (5.2.2.2)$$

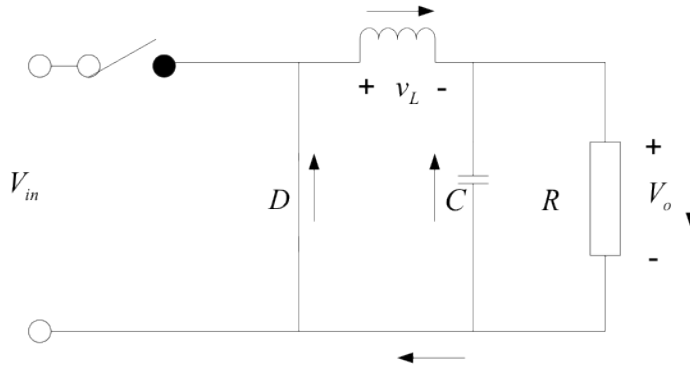
Δεδομένου ότι βρισκόμαστε σε κατάσταση συνεχούς αγωγής του πηνίου, το ρεύμα i_L δε θα μηδενίζεται ποτέ και συνεπώς τη στιγμή $t=0$ θα είναι $i_L(0)=i_{L0}$. Τότε, όσο άγει ο Q, το ρεύμα του πηνίου θα δίνεται ως:

$$i_L(t) = i_{L0} + \int_0^t \frac{V_L}{L} dt = i_{L0} + \int_0^t \frac{(V_{in} - V_o(t))}{L} dt \rightarrow$$

$$\rightarrow i_L(t) = i_{L0} + \frac{V_{in} \cdot t}{L} - \int_0^t \frac{V_o(t)}{L} dt \quad 0 \leq t \leq t_{on} \quad (5.2.2.3)$$

Τη χρονική στιγμή $t=t_{on}$, διακόπτης Q ανοίγει και παραμένει ανοικτός έως τη χρονική στιγμή $t=t_{on}+t_{off}=T$. Σε αυτή τη φάση, η κυκλοφορία του ρεύματος πραγματοποιείται μέσω της διόδου D. Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων του Kirchhoff προκύπτει ότι:

$$V_o(t) = -V_L(t) \quad (5.2.2.4)$$



Εικόνα 5-3: Κατάσταση διακοπής του διακοπτικού στοιχείου.

Το ρεύμα του πηνίου θα δίνεται ως:

$$i_L(t) = i_L(t_{on}) + \int_{t_{on}}^t \frac{V_L(t)}{L} dt = i_L(t_{on}) - \int_{t_{on}}^t \frac{V_o(t)}{L} dt \quad t_{on} \leq t \leq T \quad (5.2.2.5)$$

Θεωρώντας μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, θα πρέπει η ενέργεια του πηνίου στην αρχή της περιόδου να ισούται με αυτή στο τέλος της. Πρέπει επομένως:

$$E_0 = E_T \rightarrow \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_{L0}^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_L^2(T) \rightarrow i_{L0} = i_L(T) \quad (5.2.2.6)$$

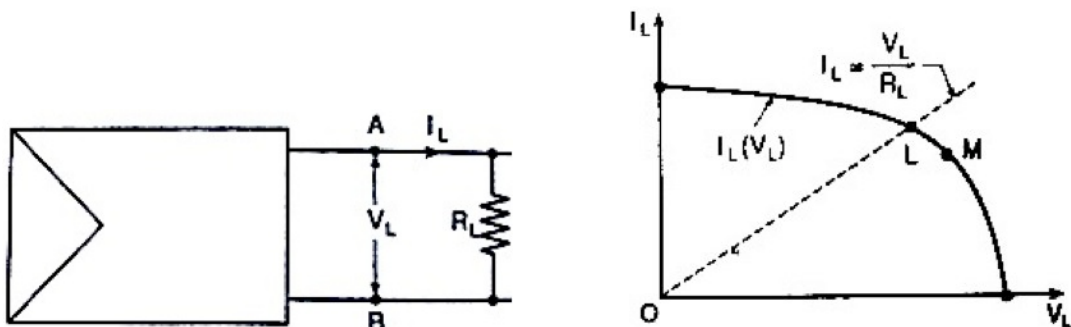
Από τις (5.2.2.3) και (5.2.2.5) προκύπτει:

$$\begin{aligned} i_L(t_{on}) - \frac{V_{in} \cdot t_{on}}{L} + \int_0^{t_{on}} \frac{V_o(t)}{L} dt &= i_L(t_{on}) - \int_{t_{on}}^T \frac{V_o(t)}{L} dt \rightarrow \\ \rightarrow V_{in} \cdot t_{on} &= \int_0^{t_{on}} V_o(t) dt + \int_{t_{on}}^T V_o(t) dt = \int_0^T V_o(t) dt \rightarrow \\ \rightarrow \bar{V}_o &= \frac{V_{in} \cdot t_{on}}{T} = D \cdot V_{in} \quad (5.2.2.7) \end{aligned}$$

Βλέπουμε λοιπόν, ότι ρυθμίζοντας το Duty Cycle, D , του παλμού οδήγησης του διακοπτικού στοιχείου, μπορούμε να ρυθμίσουμε τη μέση τιμή της τάσης εξόδου του κυκλώματος [2],[10].

5.2.3 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

Όπως είδαμε, κάθε στιγμή, η λειτουργία της φ/β γεννήτριας προσδιορίζεται από ένα ζεύγος τάσης και ρεύματος, το οποίο βρίσκεται στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V, που αντιστοιχεί στην τρέχουσα ηλιακή ακτινοβολία. Το ζεύγος αυτό, στο οποίο θα ισορροπήσει η φ/β γεννήτρια για δεδομένη ακτινοβολία, εξαρτάται από το εκάστοτε τροφοδοτούμενο φορτίο και καθορίζει τη μεταφερόμενη προς αυτό ισχύ. Έτσι αν υποθέσουμε ότι το πάνελ τροφοδοτεί ένα φορτίο R_L , τότε θα ισορροπήει στο σημείο L της χαρακτηριστικής καμπύλης και θα μεταφέρει στο φορτίο ισχύ $P_L = V_L I_L$, με το ρεύμα και την τάση να προσδιορίζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1 [4].



Σχήμα 5-1: Απευθείας σύνδεση φορτίου σε φ/β πλαίσιο.

Υπάρχει, ωστόσο, σε κάθε μια από τις I-V χαρακτηριστικές του φ/β πάνελ, ένα σημείο M, που χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος τάσης και ρεύματος το οποίο μεγιστοποιεί το γινόμενο $V_L \times I_L$ και άρα την αποδιδόμενη στο φορτίο ισχύ, για την τρέχουσα ηλιακή ακτινοβολία. Το σημείο αυτό, ονομάζεται Σημείο Μέγιστης Ισχύος του φ/β, βρίσκεται στο «γόνατο» της εκάστοτε I-V καμπύλης και μεταβάλλεται αναλόγως με τις συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας που επικρατούν. Προκειμένου η εκμετάλλευση του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού, να γίνεται με το βέλτιστο τρόπο, επιβάλλεται, η φ/β γεννήτρια να λειτουργεί στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, απαιτείται η παρεμβολή, μεταξύ πάνελ και φορτίου, μιας διάταξης, η οποία θα επιβάλλει τη λειτουργία του πάνελ στο εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος, ενώ ταυτοχρόνως θα διατηρεί το ρεύμα και την τάση του φορτίου, πάνω στη χαρακτηριστική του ευθεία, ικανοποιώντας τη σχέση $I_L = V_L / R_L$. Το ρόλο αυτό μπορεί να παίξει ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης τοπολογίας Buck.

Αν θεωρήσουμε ένα μετατροπέα υποβιβασμού συνεχούς τάσης, με συντελεστή απόδοσης η , τότε για την ισχύ εισόδου και εξόδου θα ισχύει:

$$P_{out} = \eta \cdot P_{in} \rightarrow V_{out} \cdot I_{out} = \eta \cdot V_{in} \cdot I_{in} \quad (5.2.3.1)$$

Θεωρώντας τις σύνθετες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου αντιστοίχως ως

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (5.2.3.2) \quad \text{και} \quad Z_{out} = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (5.2.3.3)$$

Προκύπτει ότι:

$$\frac{V_{out}^2}{Z_{out}} = n \cdot \frac{V_{in}^2}{Z_{in}} \quad (5.2.3.4)$$

Δεδομένου, τέλος, ότι, σε λειτουργία συνεχούς αγωγής, ισχύει η

$$V_{out} = D \cdot V_{in}$$

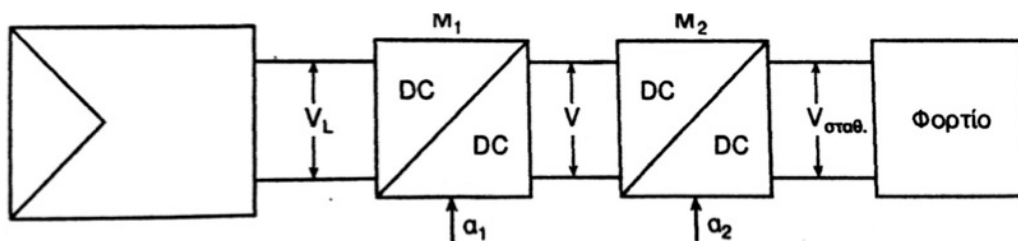
θα έχουμε:

$$D = \sqrt{\frac{n \cdot Z_{out}}{Z_{in}}} \quad (5.2.3.5)$$

όπου D το duty cycle του παλμού οδήγησης του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα.

Η ερμηνεία της σχέσης (5.2.3.5), αποκαλύπτει τη δυνατότητα προσαρμογής του λόγου των σύνθετων αντιστάσεων εισόδου και εξόδου, με ρύθμιση του duty cycle του μετατροπέα υποβιβασμού. Έτσι, για σταθερό φορτίο, αντίστασης Z_{out} , μπορούμε να ρυθμίζουμε το duty cycle καταλλήλως, ώστε ο λόγος της τάσης του φ/β πάνελ προς το αντίστοιχο ρεύμα, $Z_{in}=V_{in}/I_{in}$, να ισορροπεί στο εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος.

Στην περίπτωση που, ταυτοχρόνως με τη λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος, είναι επιθυμητή η παροχή σταθερής τάσης στο φορτίο, τότε επιβάλλεται η χρήση δύο μετατροπέων συνεχούς τάσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-2, ο μετατροπέας M1, ρυθμιζόμενος από το σήμα ελέγχου α_1 , αναλαμβάνει την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος, ενώ ο μετατροπέας M2, ελεγχόμενος από το σήμα ελέγχου α_2 , διατηρεί την τάση τροφοδοσίας του φορτίου σταθερή.



Σχήμα 5-2: Δύο στάδια dc/dc για ταυτόχρονη εφαρμογή MPPT και παροχή σταθερής τάσης

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της παραπάνω διάταξης είναι ο ρυθμιστής φόρτισης συσσωρευτών, μολύβδου οξέος, τύπου MPPT.

Αυτή καθαυτή η ανίχνευση του MPP γίνεται μέσω, διαρκούς επιτήρησης της τάσης και του ρεύματος εξόδου του φ/β πάνελ, και επεξεργασίας των μετρήσεων μέσω εφαρμογής εξειδικευμένων αλγορίθμων. Τη λειτουργία αυτή αναλαμβάνει ένας μικροεπεξεργαστής, ο οποίος, τελικά, παράγει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπέων.

Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος ενός φ/β πάνελ είναι οι εξής:

- **Perturbation & Observation:** Ο ελεγκτής πραγματοποιεί πολύ μικρές μεταβολές της τάσης, μετράει το ρεύμα και υπολογίζει την ισχύ. Αν η μετρούμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από αυτή που μετρήθηκε πριν τη μεταβολή, τότε ο ελεγκτής συνεχίζει να μεταβάλλει την τάση προς την ίδια κατεύθυνση, μέχρι η ισχύς να σταματήσει να αυξάνεται. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά αποτελεσματική και απλή στην εφαρμογή της, δε μπορεί ωστόσο να ακολουθήσει τόσο αποτελεσματικά πιθανές απότομες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας.
- **Incremental Conductance:** Ο αλγόριθμος της αυξητικής αγωγιμότητας μετράει αυξητικές μεταβολές του ρεύματος και της τάσης προκειμένου να προβλέψει το αποτέλεσμα μιας αλλαγής της τάσης. Ο ελεγκτής υπολογίζει το λόγο di/dV και αναλόγως με το αποτέλεσμα προσδιορίζει το πρόσημο του λόγου dP/dV και συνεπώς την κατεύθυνση στην οποία θα πρέπει να διαταραχθεί η τάση. Ο αλγόριθμος αυτός είναι αποτελεσματικότερος στην περίπτωση ταχέων μεταβολών της ακτινοβολίας.
- **Constant Voltage:** Αυτός ο αλγόριθμος βασίζεται στην παρατήρηση ότι η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, είναι κατά προσέγγιση σταθερή. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν κάνει ουσιαστική ανίχνευση του MPP, παρουσιάζει ωστόσο κάποια πλεονεκτήματα σε περιπτώσεις στις οποίες οι άλλες μέθοδοι τείνουν να αποτυγχάνουν και γι αυτό χρησιμοποιείται συνήθως ως συμπληρωματική των άλλων μεθόδων.

5.2.4 Φόρτιση Συσσωρευτή

Παράλληλα με την εκτέλεση των αλγορίθμων ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος, ο ρυθμιστής φόρτισης αναλαμβάνει την υλοποίηση των αλγορίθμων φόρτισης του συσσωρευτή. Οι συσσωρευτές μολύβδου οξέος, προσφέρουν μεγάλη ευελιξία, όσον αφορά τον τρόπο φόρτισης τους. Θα πρέπει ωστόσο, να τηρούνται ορισμένοι κανόνες. Η επιλογή της σωστής τάσης φόρτισης είναι μεγάλης σημασίας και κυμαίνεται μεταξύ 2.3V και 2.45V ανά κελί. Από την επιλογή αυτή εξαρτώνται ο χρόνος φόρτισης, οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και το διάστημα μεταξύ συντηρήσεων και θα πρέπει να γίνεται αναλόγως με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Την επιλεγόμενη τάση φόρτισης, την επιβάλλει ο αντίστοιχος μετατροπέας, ο οποίος επιτηρεί την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και διακόπτει τη διαδικασία όταν η φόρτιση ολοκληρωθεί. Η φόρτιση μπορεί να γίνει είτε υπό σταθερή τάση, είτε σε τρία στάδια, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση της φόρτισης σε τρία στάδια, προσδιορίζονται τα επίπεδα τάσης και ρεύματος στα οποία θα πρέπει να γίνεται η μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο και ο επεξεργαστής εκτελεί την αντίστοιχη ρύθμιση μέσω του μετατροπέα συνεχούς τάσης. Επισημαίνεται ότι η διαδικασία ανίχνευσης και μεταφοράς της μέγιστης ισχύος, θα πρέπει να διακόπτεται όταν το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι αρκετά υψηλό ώστε να μη μπορεί να απορροφηθεί όλη η παραγόμενη ενέργεια.

5.3 Έλεγχος Φορτίου

5.3.1 Γενικά

Όπως έγινε σαφές σε προηγούμενο κεφάλαιο, η φωτεινή πηγή που χρησιμοποιείται σε κάποια εφαρμογή φωτισμού, θα πρέπει να παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία επιβάλλονται από την εφαρμογή αυτή και προκαθορίζονται στο στάδιο του σχεδιασμού της πηγής. Τα χαρακτηριστικά αυτά, στην περίπτωση του ηλεκτροφωτισμού, εξαρτώνται άμεσα από τις λειτουργικές συνθήκες στις οποίες υποβάλλεται η πηγή. Προκειμένου λοιπόν, να υπάρχει η δυνατότητα πλήρους ελέγχου των χαρακτηριστικών εξόδου της φωτεινής πηγής, επιβάλλεται η διαρκής επιτήρηση των ηλεκτρικών μεγεθών που εμπλέκονται στην οδήγηση της. Ο αξιόπιστος έλεγχος των εν λόγω μεγεθών, εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία του φωτιστικού, ενώ παράλληλα προσφέρει μεγάλη ευελιξία και διευρύνει το πεδίο εφαρμογής του. Τυπική περίπτωση, αποτελεί ο έλεγχος της φωτεινότητας (dimming), σε μια εφαρμογή φωτισμού, με σκοπό τον έλεγχο του επιπέδου φωτισμού, είτε για λόγους αισθητικής, είτε για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας και εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού, με τη χρήση έξυπνων συστημάτων διαχείρισης.

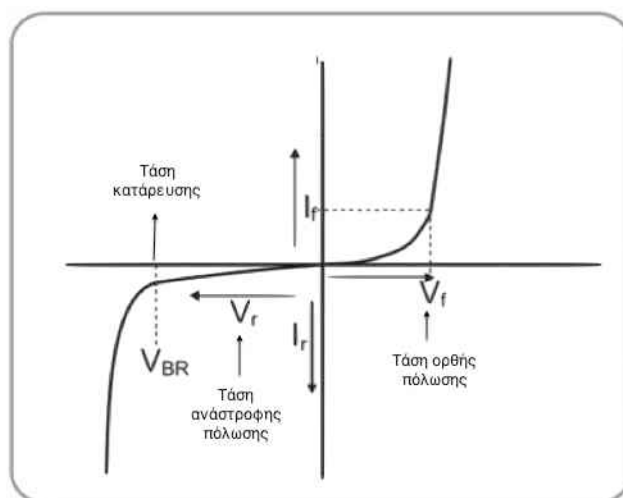
Ειδικά στην περίπτωση του φωτισμού με τεχνολογίες στερεάς κατάστασης, η δυνατότητα ελέγχου της φωτεινότητας κρίνεται επιτακτική για έναν επιπλέον λόγο. Η διαρκής ανάπτυξη της τεχνολογίας των LEDs, έχει σαν αποτέλεσμα τη διαρκώς αυξανόμενη απόδοση και φωτεινότητα τους. Το γεγονός αυτό ωστόσο, ενώ εκ πρώτης όψεως αποτελεί σαφές κίνητρο για την αύξηση της διείσδυσης των LEDs στις εφαρμογές φωτισμού, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα συμβατότητας σε εφαρμογές με μεγάλη διάρκεια ζωής, κατά τη διάρκεια της οποίας απαιτείται η διατήρηση ενός σταθερού προφίλ φωτεινότητας. Η αντιμετώπιση προβλημάτων τέτοιου τύπου, θα πρέπει να ξεκινάει ήδη από το στάδιο της σχεδίασης της εφαρμογής, όπου θα προβλέπεται η δυνατότητα αυξομείωσης της φωτεινότητας του υπό σχεδίαση φωτιστικού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, LEDs παλαιότερης τεχνολογίας, θα μπορούν να αντικαθίστανται από LEDs νέας τεχνολογίας και υψηλότερης φωτεινής ισχύος, χωρίς να επηρεάζεται η συνολική φωτεινότητα της εφαρμογής.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι διάφορες τοπολογίες σύνδεσης καθώς και οι διάφορες τεχνικές οδήγησης και ελέγχου των LEDs, με κεντρικό άξονα την εφαρμογή τους σε αυτόνομο φωτιστικό εξωτερικού χώρου.

5.3.2 Πόλωση LED

Τα LEDs, από λειτουργικής απόψεως, είναι εντελώς όμοια με μια κοινή δίοδο. Υπ' αυτή την έννοια, τα LEDs έχουν ένα θετικό (άνοδος) και έναν αρνητικό (κάθοδος) ακροδέκτη και αναλόγως με τη φορά της διαφοράς δυναμικού που θα εφαρμοστεί στα άκρα τους, μπορούν να πολωθούν είτε ορθά είτε ανάστροφα. Η λειτουργία του LED σε αυτές τις δύο καταστάσεις περιγράφεται πλήρως από τη χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος (I-V).

Κατά τη λειτουργία ανάστροφης πόλωσης, όπου η τάση που εφαρμόζεται στην άνοδο του LED είναι μικρότερη από αυτή που εφαρμόζεται στην κάθοδο, το LED λειτουργεί πρακτικά σαν ανοιχτοκύκλωμα, εμποδίζοντας τη διέλευση ρεύματος. Στην πραγματικότητα, το LED διαρρέεται από μια πολύ μικρή ποσότητα ρεύματος, το λεγόμενο *ρεύμα ανάστροφης πόλωσης*. Η κατάσταση λειτουργίας αυτή, παύει να ισχύει όταν η τάση ανάστροφης πόλωσης ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία ορίζεται ως, *τάση κατάρρευσης*. Σε αυτήν την περίπτωση το LED συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα, επιτρέποντας τη διέλευση μεγάλης ποσότητας ρεύματος, η οποία αυξάνεται εκθετικά για περαιτέρω αύξηση της τάσης, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση και τελικά την καταστροφή του. Τα LEDs, εκ κατασκευής, παρουσιάζουν μικρές τιμές τάσης κατάρρευσης και γιαυτό το λόγο πρέπει να αποφεύγεται η ανάστροφη πόλωση τους και να προστατεύονται από εναλλασσόμενα σήματα.



Σχήμα 5-3: Χαρακτηριστική I-V LED.

Κατά τη λειτουργία ορθής πόλωσης, όπου στην άνοδο εφαρμόζεται τάση μεγαλύτερη από αυτή της καθόδου, το LED επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα του ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένη τιμή. Η ορθή πόλωση του LED έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή φωτός, η ποσότητα του οποίου, εξαρτάται, σχεδόν γραμμικά, από την τιμή του διερχόμενου ρεύματος. Προκειμένου λοιπόν, να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο φωτεινότητας, θα πρέπει, με τη βοήθεια της I-V χαρακτηριστικής, να επιλεγεί το κατάλληλο ζεύγος τάσης-ρεύματος σύμφωνα με το οποίο θα πολωθεί το LED. Σημειώνεται ότι, προκειμένου το LED να εμφανίζει τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο αντίστοιχο Datasheet, όπως είναι το χρώμα και η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής, θα πρέπει να πολώνεται στο ονομαστικό ρεύμα, όπως αυτό ορίζεται από τον κατασκευαστή.

5.3.3 Οδήγηση LED

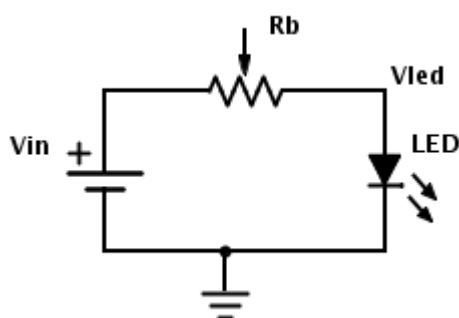
Η σωστή οδήγηση ενός LED, ή ενός κυκλώματος με περισσότερα LEDs, έγκειται στον έλεγχο των λειτουργικών χαρακτηριστικών (τάση και ρεύμα) του κυκλώματος, ώστε να μειώνεται η ευαισθησία του κυκλώματος σε ανεπιθύμητες

μεταβολές αυτών, και να επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο φωτεινότητας, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.

Την αποστολή αυτή αναλαμβάνουν εξειδικευμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα και τεχνικές οδήγησης LEDs.

Αντίσταση Περιορισμού Ρεύματος

Η απλούστερη μέθοδος οδήγησης LED είναι η πώλωση τους στην επιθυμητή τάση, όπως αυτή προσδιορίζεται μέσω του επιθυμητού επιπέδου φωτεινότητας και άρα ρεύματος, με τη χρήση μιας, εν σειρά συνδεδεμένης, αντίστασης $R_{ballast}$.



Σχήμα 5-4: Οδήγηση LED με αντίσταση σειράς

Σε αυτή την περίπτωση, προκειμένου να πετύχουμε το επιθυμητό ζεύγος τάσης-ρεύματος ($V_{LED}-I_{LED}$), επιλέγουμε την αντίσταση σειράς ως

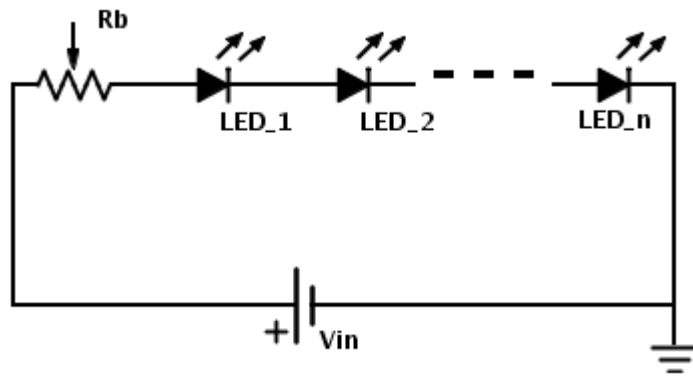
$$R_b = \frac{V_R}{I_{LED}} = \frac{V_{in} - V_{LED}}{I_{LED}} \quad (5.3.3.1)$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο, με την εισαγωγή μιας επιπλέον πτώσης τάσης κατά μήκος της R_b , αντισταθμίζεται η τάση εισόδου και επιτυγχάνεται η επιθυμητή πτώση τάσης κατά μήκος του LED. Ρυθμίζοντας την τιμή της αντίστασης μπορούμε, θεωρητικά, να πετύχουμε το κατά περίπτωση επιθυμητό αποτέλεσμα. Η υλοποίηση αυτή είναι εξαιρετικά απλή και το κόστος της, από άποψη υλικών, αμελητέο. Γίνεται, ωστόσο, αμέσως φανερό, ότι το συγκεκριμένο κύκλωμα εισάγει πρόσθετες απώλειες με τη μορφή θερμότητας πάνω στην αντίσταση. Η ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση είναι:

$$P_R = \frac{V_R^2}{R_b} = \frac{(V_{in} - V_{LED})^2}{R_b} \quad (5.3.3.2)$$

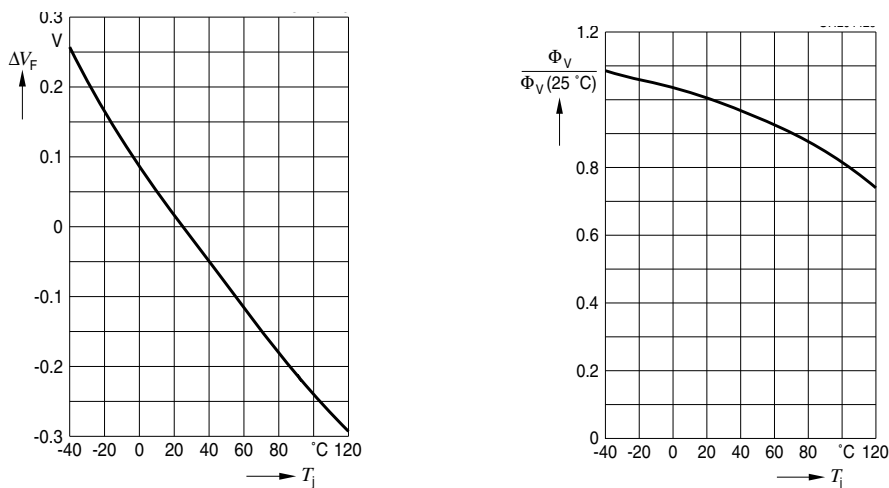
Αυτό σημαίνει πως, όσο περισσότερο απέχει η V_{LED} , που θέλουμε να πετύχουμε, από την τάση τροφοδοσίας, τόσο οι απώλειες του κυκλώματος αυξάνονται.

Προκειμένου λοιπόν, να εκμεταλλευτούμε τη συγκεκριμένη διάταξη με το βέλτιστο δυνατό τρόπο, θα πρέπει να τροφοδοτήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερα LEDs, εν σειρά, μέχρις ότου η διαφορά, $V_{in}-nV_{LED}$, να ελαχιστοποιηθεί και άρα να ελαχιστοποιηθεί η απαιτούμενη τιμή της αντίστασης σειράς.



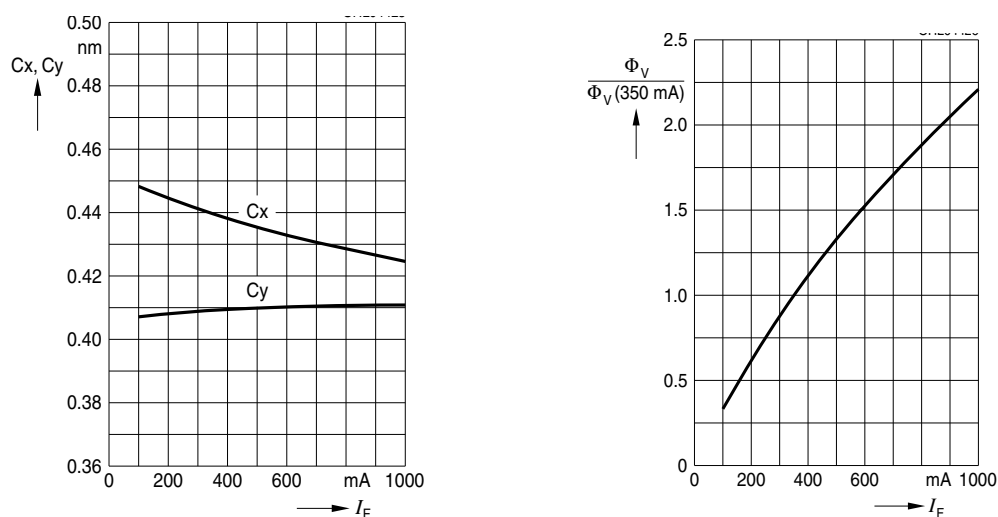
Σχήμα 5-5: Οδήγηση πολλαπλών LEDs με αντίσταση σειράς για μείωση των απωλειών.

Ένα επιπλέον μειονέκτημα της οδήγησης LED, με αντίσταση περιορισμού ρεύματος, είναι η αδυναμία του κυκλώματος να αντισταθμίζει μεταβολές του ρεύματος οδήγησης του LED, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε μεταβολές της θερμοκρασίας ή σε διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας καθώς και σε κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις της ονομαστικής τάσης ορθής πόλωσης, οι οποίες μπορεί να εμφανίζονται μεταξύ δυο LEDs. Συγκεκριμένα, οι διακυμάνσεις της τάσης εξόδου μιας μπαταρίας ή ενός τροφοδοτικού, οι οποίες μπορεί να φτάνουν και το $\pm 10\%$ μπορούν να προκαλέσουν δυσανάλογα μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης κατά μήκος των LEDs και άρα του ρεύματος οδήγησης τους. Αντίστοιχα προβλήματα προκαλεί η αύξηση της θερμοκρασίας της ημιαγωγικής επαφής p-n του LED, η οποία συνεπάγεται μεταβολή της πτώσης τάσης στα άκρα του και συνεπώς μεταβολή του ρεύματος και της φωτεινότητας.



Σχήμα 5-6: Εξάρτηση τάσης και φωτεινότητας των LEDs από τη θερμοκρασία.

Οι μεταβολές αυτές των χαρακτηριστικών λειτουργίας των LEDs έχουν σαν αποτέλεσμα τη διακύμανση της έντασης αλλά και του χρώματος του εκπεμπόμενου φωτός και συνεπώς τη μειωμένη αξιοπιστία της εφαρμογής φωτισμού.

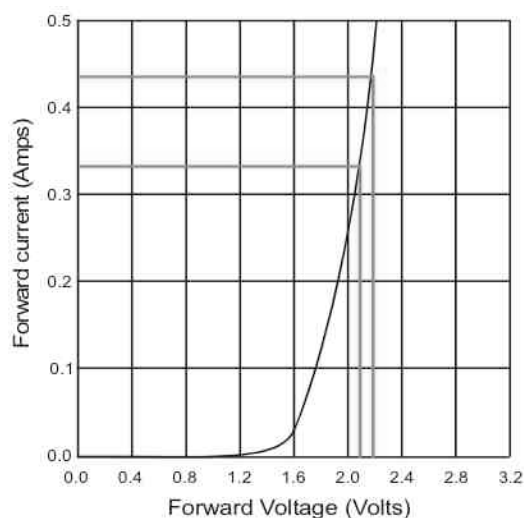


Σχήμα 5-7: Εξάρτηση του χρώματος και της φωτεινότητας των LEDs από το ρεύμα οδήγησης.

Είναι σαφές, ότι τα LEDs, παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές του ρεύματος οδήγησής τους. Μάλιστα, οι πιθανές αυτές διακυμάνσεις του ρεύματος, μπορεί να το οδηγήσουν σε τιμές υψηλότερες της μέγιστης επιτρεπτής, όπως αυτή ορίζεται από τον κατασκευαστή, με καταστρεπτικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, κύριο μέλημα στην οδήγηση LEDs είναι η διατήρηση σταθερού ρεύματος.

Πηγή Σταθερού Ρεύματος

Η παρατήρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης ενός LED, υποδεικνύει ότι, κατά την οδήγηση του, το λειτουργικό χαρακτηριστικό που θα πρέπει να ελέγχεται, είναι το ρεύμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-8, η απότομη κλίση της καμπύλης I-V, μεταφράζεται στην αντιστοίχιση, πολύ μικρών μεταβολών της τάσης πόλωσης του LED, σε πολύ μεγάλες μεταβολές του ρεύματος.



Σχήμα 5-8: Μικρές μεταβολές της τάσης προκαλούν μεγάλες μεταβολές στο ρεύμα του LED

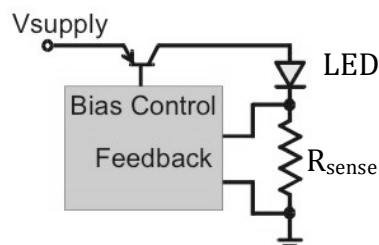
Το γεγονός αυτό, καθιστά την οδήγηση με έλεγχο τάσης εξαιρετικά δύσκολη και αναξιόπιστη. Σε κάθε περίπτωση όπως έγινε εμφανές και από τα προηγούμενα, η διατήρηση σταθερού ρεύματος οδήγησης, προσδίδει στην εξεταζόμενη εφαρμογή φωτισμού, την απαραίτητη αξιοπιστία.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τροφοδότηση των LEDs από πηγή σταθερού ρεύματος. Έτσι η δεύτερη εναλλακτική, η οποία αποτελεί και τη δημοφιλέστερη λύση στο πρόβλημα της οδήγησης LEDs, είναι η χρησιμοποίηση κυκλωμάτων, τα οποία επιτηρούν διαρκώς το ρεύμα οδήγησης και έχουν τη δυνατότητα να το ρυθμίζουν καταλλήλως, προκειμένου να το διατηρούν σταθερό, ανεξαρτήτως των διαφόρων μεταβολών που θα μπορούσαν να το επηρεάσουν, όπως για παράδειγμα η διακύμανση της τάσης τροφοδοσίας και η μεταβολή της θερμοκρασίας. Τα εν λόγω κυκλώματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Γραμμικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος (Linear Current Supply)
2. Διακοπτικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος (Switching Current Supply)

Γραμμικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος

Η αρχή λειτουργίας των γραμμικών τροφοδοτικών βασίζεται στη χρήση ενός τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET), το οποίο λειτουργεί στην ενεργό περιοχή και δρα ως μεταβλητή αντίσταση ελεγχόμενη από τάση. Το FET συνδέεται σε σειρά με το φορτίο και η πύλη του οδηγείται από έναν μικροελεγκτή ή κάποιο λογικό κύκλωμα. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας διαιρέτης τάσης, ελεγχόμενου λόγου διαίρεσης, ο οποίος παίρνει σαν είσοδο την τάση τροφοδοσίας. Μια σταθερή τάση αναφοράς συγκρίνεται με την τάση κατά μήκος του φορτίου, το αντίστοιχο σφάλμα ενισχύεται και οδηγείται, μέσω ενός κυκλώματος ανάδρασης, στο λογικό κύκλωμα οδήγησης της πύλης του FET. Η τάση στην πύλη του FET ρυθμίζεται καταλλήλως, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση στα άκρα του φορτίου. Η ίδια ακριβώς αρχή λειτουργίας ακολουθείται για την παροχή σταθερού ρεύματος στο φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση επιτηρείται η τάση στα άκρα μιας πολύ μικρής αντίστασης R_{sense} , που συνδέεται σε σειρά με το φορτίο και γίνεται η κατάλληλη ρύθμιση της τάσης που εφαρμόζεται στην πύλη του FET, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή ρεύματος.



Σχήμα 5-9: Γραμμικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος.

Η συνεχής επιτήρηση και ο έλεγχος της τάσης στα άκρα της R_{sense} , επιτυγχάνουν τη διατήρηση του ρεύματος που τη διαρρέει, και άρα διαρρέει και το φορτίο που στην περίπτωση μας είναι το προς οδήγηση LED, σε μια σταθερή προκαθορισμένη τιμή. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το ρεύμα οδήγησης του LED,

ανεξαρτητοποιείται από τις διάφορες ανεπιθύμητες μεταβολές και επιτυγχάνεται η επιθυμητή αξιοπιστία της εφαρμογής φωτισμού.

Όπως είδαμε, η οδήγηση LED με γραμμικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος, βασίζεται ουσιαστικά στον έλεγχο ενός διαιρέτη τάσης. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση του FET σαν αντίσταση και η τεχνητά προκαλούμενη πτώση τάσης κατά μήκος του, έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Όπως και στην περίπτωση της οδήγησης με αντίσταση περιορισμού ρεύματος, όσο περισσότερο απέχει η τάση τροφοδοσίας από την τάση στην οποία θέλουμε να πολώσουμε το LED, τόσο περισσότερες απώλειες θα έχουμε. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει και σε αυτή την περίπτωση, ο αριθμός των οδηγούμενων LEDs, n , να είναι ο μέγιστος δυνατός, προκειμένου να ελαχιστοποιείται η διαφορά $V_{in} - nV_{LED}$ και άρα να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Σε κάθε περίπτωση, η εν λόγω μέθοδος οδήγησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αποκλειστικά και μόνο όταν η τάση τροφοδοσίας είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των επιμέρους τάσεων πόλωσης των οδηγούμενων LEDs, nV_{LED} .

Σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης γραμμικών τροφοδοτικών ρεύματος στην οδήγηση LED, είναι η απλότητα της σχεδίασης και το μικρό κόστος υλικών και κατασκευής. Τα απαραίτητα κυκλώματα για την υλοποίηση αυτή, παρέχονται σε ολοκληρωμένη μορφή (IC), μειώνοντας σημαντικά το «αποτύπωμα» (footprint) της κατασκευής, ενώ τα εξωτερικά στοιχεία που απαιτούνται είναι ελάχιστα. Παράλληλα, η απουσία διακοπτικών στοιχείων από το κύκλωμα, καθιστά τη διάταξη ακίνδυνη, από άποψη παρεμβολών και ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC). Το ουσιαστικότερο μειονέκτημα της εν λόγω διάταξης είναι οι απώλειες που προκαλούνται στο FET και η ανάγκη για απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας. Οι απώλειες αυτές είναι σημαντικά μειωμένες σχετικά με τις αντίστοιχες της αντίστασης περιορισμού ρεύματος, θα πρέπει ωστόσο, να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν κατά το σχεδιασμό της διάταξης και να προβλέπεται η χρήση ψηκτρών για την απαγωγή της θερμότητας.

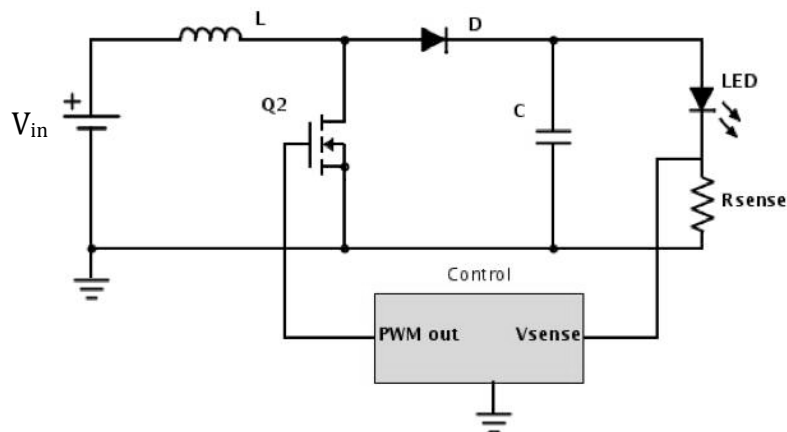
Διακοπτικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος

Η λειτουργία των διακοπτικών τροφοδοτικών βασίζεται στη χρήση μετατροπέων συνεχούς τάσης (DC-DC), για τη μετατροπή ενός επιπέδου συνεχούς τάσης, σε ένα άλλο, υψηλότερο ή χαμηλότερο, αναλόγως με τη χρησιμοποιούμενη τοπολογία. Οι DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούν διακοπτικά στοιχεία υψηλών συχνοτήτων, όπως τα MOSFET και τα IGBT, αναλόγως με την ισχύ της εφαρμογής, τα οποία οδηγούνται από σήματα διαμορφωμένου εύρους παλμού (PWM). Οι διατάξεις αυτές είναι σε θέση να ανυψώνουν ή να υποβιβάζουν την τάση που λαμβάνουν στην είσοδο τους, αναλόγως με το Duty Cycle του σήματος οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων. Η τροφοδότηση ενός φορτίου με σταθερό ρεύμα, επιτυγχάνεται με τη διαρκή επιτήρηση της πτώσης τάσης στα άκρα μιας πολύ μικρής αντίστασης R_{sense} , που συνδέεται σε σειρά με αυτό. Στη συνέχεια η μετρούμενη τάση συγκρίνεται με την επιθυμητή τάση αναφοράς και το αντίστοιχο σφάλμα ενισχύεται και οδηγείται μέσω κατάλληλου κυκλώματος ανάδρασης στο λογικό κύκλωμα οδήγησης της πύλης του διακοπτικού στοιχείου. Η κατάλληλη ρύθμιση του Duty Cycle του PWM σήματος, από το λογικό κύκλωμα, μετατρέπει το επίπεδο της τάσης εξόδου

καταλλήλως, ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση του ρεύματος, που διαρρέει την R_{sense} και άρα το φορτίο, σε μια σταθερή και προκαθορισμένη τιμή. Οι δημοφιλέστερες τοπολογίες DC-DC μετατροπών για την οδήγηση LEDs, είναι οι εξής:

- Μετατροπέας Ανύψωσης (Boost)
- Μετατροπέας Υποβιβασμού (Buck)
- Μετατροπέας Ανύψωσης/Υποβιβασμού (Buck-Boost)

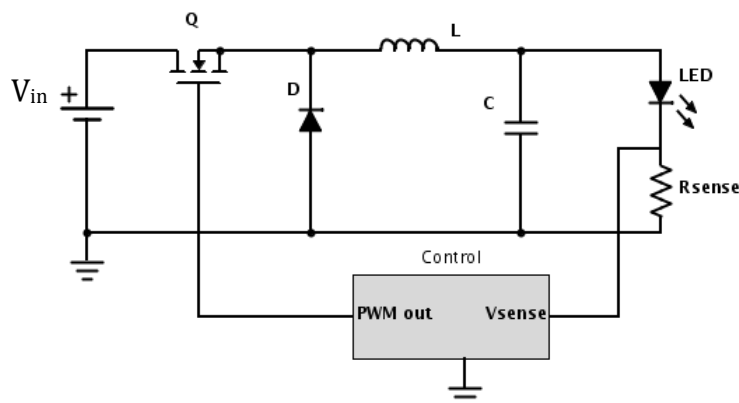
Οι μετατροπείς τύπου Boost, βρίσκουν εφαρμογή αποκλειστικά σε περιπτώσεις στις οποίες η τάση εξόδου θα πρέπει να είναι υψηλότερη από την τάση τροφοδοσίας.



Σχήμα 5-10: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου boost.

Σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών φωτισμού, όπως θα δούμε, είναι επιβεβλημένη η σύνδεση πολλών LEDs σε σειρά, λόγω ορισμένων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η συγκεκριμένη τοπολογία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των LEDs, nV_{LED} , να ξεπερνάει την τάση τροφοδοσίας. Η διάταξη του μετατροπέα ανύψωσης είναι ιδανική σε αυτή την περίπτωση.

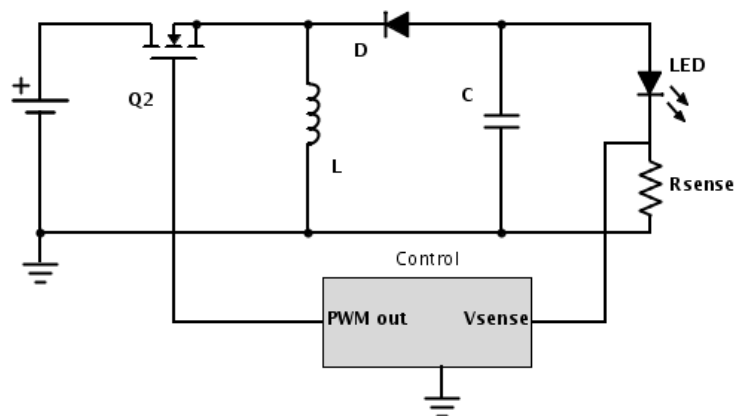
Οι μετατροπείς τύπου Buck, χρησιμοποιούνται όταν η τάση εξόδου θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από την τάση τροφοδοσίας και αποτελούν τον ιδανικό αντικαταστάτη των γραμμικών τροφοδοτικών ρεύματος.



Σχήμα 5-11: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου Buck.

Είδαμε ότι, σε εφαρμογές, στις οποίες ο αριθμός, n , των LEDs είναι αρκετά μικρός, με αποτέλεσμα η διαφορά, $V_{in} - nV_{LED}$, να είναι μεγάλη, τα γραμμικά τροφοδοτικά παρουσιάζουν υψηλές απώλειες. Σε αυτή την περίπτωση, οι μετατροπείς υποβιβασμού, αποτελούν την ιδανική εναλλακτική, με την προϋπόθεση να δικαιολογείται το αυξημένο τους κόστος από το ποσοστό απωλειών του γραμμικού τροφοδοτικού.

Οι μετατροπείς τύπου Buck-Boost καλύπτουν αφενός τις περιπτώσεις στις οποίες η τάση τροφοδοσίας μπορεί να παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, ξεπερνώντας την τάση του φορτίου ή πέφτοντας χαμηλότερα από αυτήν, αφετέρου δε, τις περιπτώσεις στις οποίες η τάση του φορτίου μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες ή μικρότερες από την τάση τροφοδοσίας.



Σχήμα 5-12: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου Buck-boost.

Η χρήση μετατροπέα Buck-Boost κρίνεται απαραίτητη σε εφαρμογές στις οποίες τα LEDs θα πρέπει να μπορούν να τροφοδοτηθούν από ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών πηγών, για λόγους συμβατότητας και ευελιξίας. Μια άλλη τυπική περίπτωση χρήσης της εν λόγω τοπολογίας είναι η αυτή της τροφοδότησης των LEDs από εναλλασσόμενη πηγή τάσης μέσω ανορθωτή, όπου η ανορθωμένη τάση κυμαίνεται μεταξύ του 0 και της μέγιστης τιμής. Τέλος μια διάταξη οδήγησης LEDs βασισμένη στην τοπολογία Buck-Boost, προσφέρει τη δυνατότητα τροφοδότησης πολλών διαφορετικών φορτίων, είτε αυτά αποτελούνται από μικρό είτε από μεγαλύτερο αριθμό LEDs.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των διακοπτικών τροφοδοτικών, είναι η πολύ υψηλή απόδοσή τους. Η χρήση των διακοπτικών στοιχείων ως διακοπών και η μη λειτουργία τους στην ενεργό περιοχή έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη μείωση των απωλειών και επίτευξη αποδόσεων μεγαλύτερων του 90%. Άμεσο επακόλουθο είναι και η πολύ μειωμένη ανάγκη για απαγωγή θερμότητας, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται η κατασκευή με τη χρήση ψηκτρών. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα διακοπτικά τροφοδοτικά, θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν, το υψηλό κόστος υλικών και η αυξημένη πολυπλοκότητα κατασκευής καθώς και η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου λόγω των χρησιμοποιούμενων διακοπτικών συχνοτήτων. Η χρήση των εν λόγω διατάξεων κρίνεται συμφέρουσα, συγκρινόμενη με τη χρήση γραμμικών τροφοδοτικών, σε εφαρμογές αυξημένου ισχύος, ενώ το αυξημένο κόστος αντισταθμίζεται από τις πολύ υψηλές αποδόσεις και τη μη χρήση ψυκτικών διατάξεων. Οι περισσότεροι κατασκευαστές παρέχουν έτοιμες διατάξεις, όπου

το διακοπτικό στοιχείο και το κύκλωμα ελέγχου δίνονται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, ενώ απαιτείται η εξωτερική σύνδεση του επαγωγέα και ορισμένων στοιχείων του κυκλώματος ανάδρασης και των φίλτρων εισόδου-εξόδου. Οι διατάξεις αυτές, τις περισσότερες φορές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση και των τριών τοπολογιών που παρουσιάστηκαν [11],[16].

5.3.4 Τοπολογίες Σύνδεσης LED

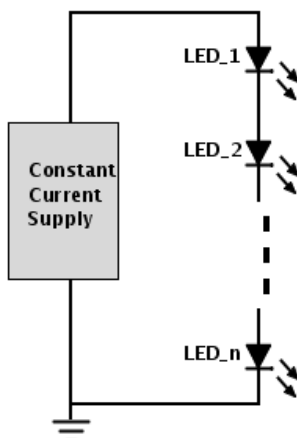
Όσο αυξάνεται η απαίτηση για φωτεινή ισχύ, μιας εφαρμογής φωτισμού, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των απαιτούμενων LEDs, που θα πρέπει να συνθέτουν τη φωτεινή πηγή. Η χρήση περισσότερων του ενός LEDs, σε μια εφαρμογή, προκαλεί τον εύλογο προβληματισμό, σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει τα LEDs να συνδέονται μεταξύ τους, καθώς και με το κύκλωμα οδήγησης. Η σωστή επιλογή της διάταξης των LEDs, εξασφαλίζει τη σωστή οδήγηση και αποτελεσματική λειτουργία της εφαρμογής και παράλληλα προσδίδει την απαραίτητη αξιοπιστία. Οι τρεις πιθανές τοπολογίες τις οποίες μπορεί να υιοθετήσει ο σχεδιαστής της εφαρμογής είναι οι εξής:

- Σύνδεση εν σειρά (Series)
- Σύνδεση σε παράλληλες σειρές (Parallel Strings)
- Σύνδεση «πίνακα» (Matrix)

Οι κύριοι άξονες, με βάση τους οποίους αξιολογούνται οι τοπολογίες σύνδεσης των LEDs, είναι, τα απαιτούμενα επίπεδα τάσης και ρεύματος, η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης διαμέσου των LEDs και η συμπεριφορά της εξεταζόμενης διάταξης σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED. Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης των LEDs, υπαγορεύει το επίπεδο της τάσης με την οποία θα πρέπει να οδηγηθεί το κύκλωμα, προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο ρεύμα οδήγησης και συνεπώς η απαραίτητη φωτεινότητα. Γίνεται, λοιπόν, σαφές, ότι ο τρόπος σύνδεσης των LEDs επηρεάζει άμεσα τη σχεδίαση του κυκλώματος οδήγησης, τις προδιαγραφές των υλικών που το αποτελούν, και την τοπολογία του. Εξαιρετικά σημαντική, για την αξιοπιστία του συστήματος είναι η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης, η οποία εξασφαλίζει την ομοιόμορφη καταπόνηση των LEDs και την ομοιομορφία στην φωτεινότητα. Τα LEDs, παρουσιάζουν δύο πιθανές καταστάσεις αποτυχίας, την αποτυχία λόγω μείωσης του εκπεμπόμενου φωτός και την ολική διακοπή λειτουργίας. Η αποτυχία λόγω μείωσης του εκπεμπόμενου φωτός, είναι η φυσιολογική εξέλιξη της εξάντλησης της διάρκειας ζωής του LED και συνεπάγεται τη μείωση της φωτεινής ισχύος κατά 50%. Η ολική διακοπή λειτουργίας ενός LED, οφείλεται στην ανοιχτοκύκλωση των επαφών του, η οποία, κατά κύριο λόγο, είναι συνέπεια της υπερθέρμανσης, και των μηχανικών καταπονήσεων που αυτή προκαλεί, και η οποία οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης των LEDs. Αναλόγως με την επιλεγόμενη τοπολογία σύνδεσης των LEDs, η συμπεριφορά της εφαρμογής, σε περίπτωση αποτυχίας ενός LED, είναι διαφορετική και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν.

Σύνδεση σε σειρά

Η εν σειρά σύνδεση των LEDs, σε μια εφαρμογή φωτισμού, αποτελεί την απλούστερη, δημοφιλέστερη, οικονομικότερη και πλέον αξιόπιστη λύση.

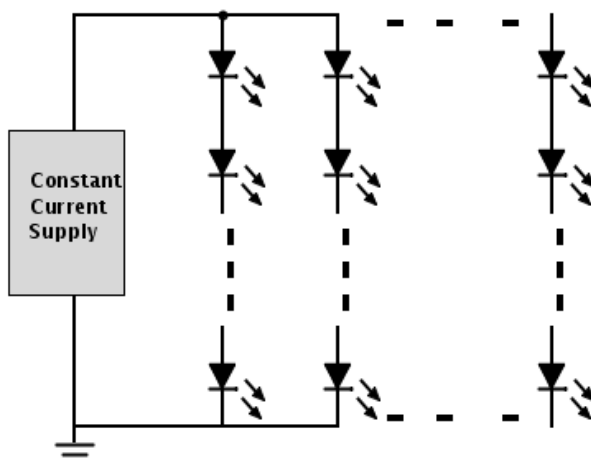


Σχήμα 5-13: Τοπολογία σειράς.

Το σπουδαιότερο πλεονεκτήματα της εν λόγω τοπολογίας, είναι το γεγονός ότι εξασφαλίζει, νομοτελειακά, κοινό ρεύμα οδήγησης για όλα τα LEDs. Η ομοιομορφία στην κατανομή του ρεύματος οδήγησης, έχει σαν αποτέλεσμα, ομοιόμορφη φωτεινότητα και ομοιόμορφη καταπόνηση, από άποψη ρεύματος και αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιείται η επίδραση της πιθανής διακύμανσης του ρεύματος εξόδου, που μπορεί να εμφανίζει το τροφοδοτικό, λόγω κακού σχεδιασμού. Η υλοποίηση της συνδεσμολογίας αυτής είναι εξαιρετικά απλή και δεν απαιτεί τη χρήση επιπλέον εξαρτημάτων. Η συγκεκριμένη τοπολογία, ωστόσο, παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Η σύνδεση μεγάλου αριθμού LEDs σε σειρά, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αθροίσματος των επιμέρους τάσεων ορθής πόλωσης και συνεπώς την απαίτηση για υψηλή τάση τροφοδοσίας. Έτσι, σε εφαρμογές υψηλής φωτεινής ισχύος, το επίπεδο της απαιτούμενης τάσης, μπορεί πολύ εύκολα να ξεπεράσει τις αντίστοιχες προδιαγραφές των, εμπορικά διαθέσιμων, ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, από τα οποία θα πρέπει να κατασκευαστούν τα κυκλώματα οδήγησης. Η λύση του προβλήματος αυτού μπορεί να επιτευχθεί με σχεδιασμό, εξ ολοκλήρου custom κυκλωμάτων οδήγησης, η οποία αυξάνει δυσανάλογα το κόστος της εφαρμογής. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της εν σειρά τοπολογίας, είναι ότι σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED, ανοιχτοκυκλώνεται ολόκληρη η σειρά με αποτέλεσμα τη συνολική διακοπή λειτουργίας της εφαρμογής. Το γεγονός αυτό μειώνει την αξιοπιστία της εφαρμογής φωτισμού, είναι, ωστόσο, στην κρίση του σχεδιαστή, αναλόγως με την εφαρμογή, να προσδιορίσει την επιθυμητή αξιοπιστία. Γενικά, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των LEDs της εφαρμογής, τόσο πιο ελκυστική γίνεται η ιδέα υλοποίησης κάποιας εναλλακτικής συνδεσμολογίας.

Σύνδεση σε παράλληλες σειρές

Ένας εναλλακτικός τρόπος σύνδεσης των LEDs είναι, ο σχηματισμός επιμέρους σειρών και, εν συνεχεία, η παράλληλη σύνδεση των σειρών αυτών μεταξύ τους.

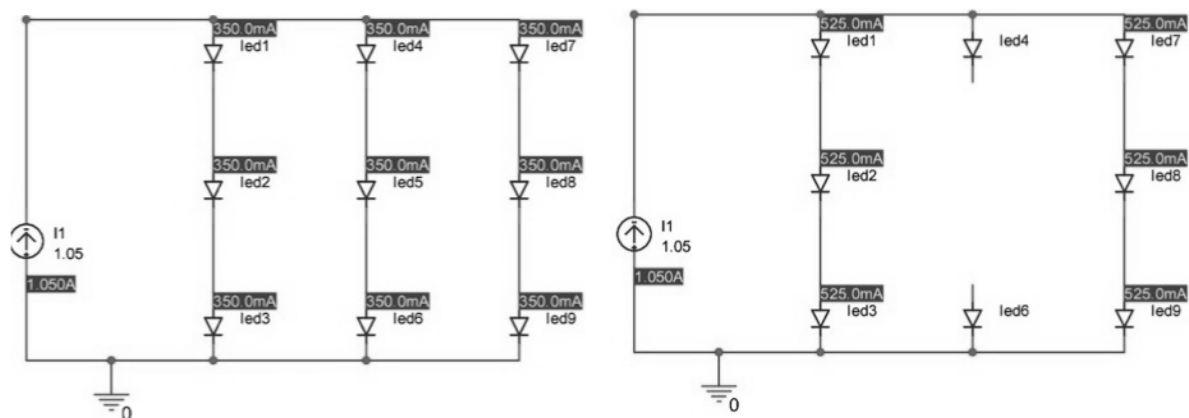


Σχήμα 5-14: Τοπολογία παράλληλων σειρών.

Η συγκεκριμένη τοπολογία, αποτελεί λύση στα δύο βασικότερα προβλήματα, τα οποία εισάγει η σύνδεση μεγάλου αριθμού LEDs εν σειρά. Η διάσπαση της διάταξης των LEDs σε επιμέρους παράλληλες σειρές, ίδιου αριθμού στοιχείων, εξασφαλίζει την διατήρηση της απαιτούμενης τάσης τροφοδοσίας σε χαμηλά επίπεδα, ακόμα και όταν ο αριθμός των LEDs είναι αρκετά μεγάλος. Συγκεκριμένα σε αυτή την περίπτωση, η τάση τροφοδοσίας, θα είναι, θεωρητικά, n φορές μικρότερη από την αντίστοιχη τάση που θα απαιτείται στην εν σειρά συνδεσμολογία, όπου n , ο αριθμός των παράλληλων σειρών. Κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο κίνδυνος, η εφαρμογή να βρεθεί εκτός των προδιαγραφών τάσης των διαφόρων εμπορικών στοιχείων. Ωστόσο, όσο αυξάνεται ο αριθμός των παράλληλων σειρών, τόσο αυξάνεται το συνολικό ρεύμα οδήγησης, που απαιτείται για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου φωτεινότητας. Συγκεκριμένα το ρεύμα οδήγησης, σε αυτή την περίπτωση, θα είναι n φορές μεγαλύτερο, από το αντίστοιχο ρεύμα στην εν σειρά συνδεσμολογία, όπου n ο αριθμός των παράλληλων σειρών. Έτσι, μεγάλος αριθμός παράλληλων strings από LEDs, μπορεί εύκολα να οδηγήσει την εφαρμογή, εκτός των προδιαγραφών ρεύματος των εμπορικά διαθέσιμων ηλεκτρονικών στοιχείων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, από τα οποία θα πρέπει να συντεθεί το κύκλωμα οδήγησης.

Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα της εν λόγω τοπολογίας είναι, η μείωση της πιθανότητας ολικής διακοπής λειτουργίας της εφαρμογής και συνεπώς η αύξηση της διάρκειας ζωής της. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED, η αντίστοιχη σειρά θα ανοιχτοκυκλωθεί και θα πάψει να λειτουργεί. Δεδομένου όμως, ότι θα προσφέρεται εναλλακτική διαδρομή στο ρεύμα οδήγησης, αυτό θα διαιρείται εκ νέου και θα μοιράζεται ομοιόμορφα, θεωρητικά, στους εναπομείναντες παράλληλους κλάδους του κυκλώματος. Δεδομένου δε, ότι το ρεύμα οδήγησης θα διατηρείται σταθερό, από

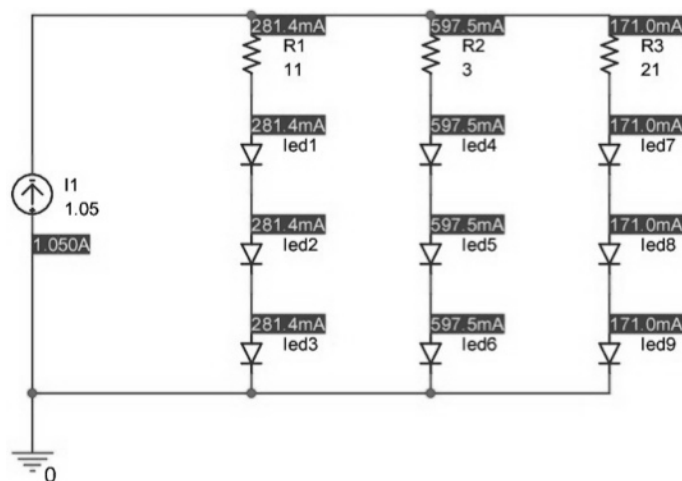
το κύκλωμα τροφοδοσίας, ανεξαρτήτως του φορτίου, κάθε παράλληλος κλάδος, θα διαρρέεται πλέον, από περισσότερο ρεύμα με αποτέλεσμα τα LEDs, να αποδίδουν μεγαλύτερη ποσότητα φωτεινής ισχύος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αντισταθμίζεται η απώλεια της φωτεινής ισχύος, λόγω ανοιχτοκύκλωσης ενός κλάδου, και η συνολική φωτεινή ισχύς παραμένει σε επίπεδα παρόμοια με τα αρχικά. Το γεγονός αυτό, προσδίδει αξιοπιστία στην εφαρμογή, αυξάνει τη διάρκεια ζωής και μειώνει το κόστος συντήρησης. Θα πρέπει ωστόσο, να σημειωθεί ότι η καταπόνηση των εναπομείναντων LEDs, με υψηλότερα ρεύματα, οδηγεί στη μείωση του προσδόκιμου ζωής τους και στην αύξηση της πιθανότητας αποτυχίας και δεύτερου παράλληλου κλάδου, η οποία, αναλόγως με το σχεδιασμό που έχει γίνει, μπορεί γρήγορα να οδηγήσει στην υπέρβαση του μέγιστου επιτρεπτού ρεύματος οδήγησης των LEDs.



Εικόνα 5-4: Προσομοίωση διακοπής λειτουργίας ενός LED στην τοπολογία παράλληλων σειρών.

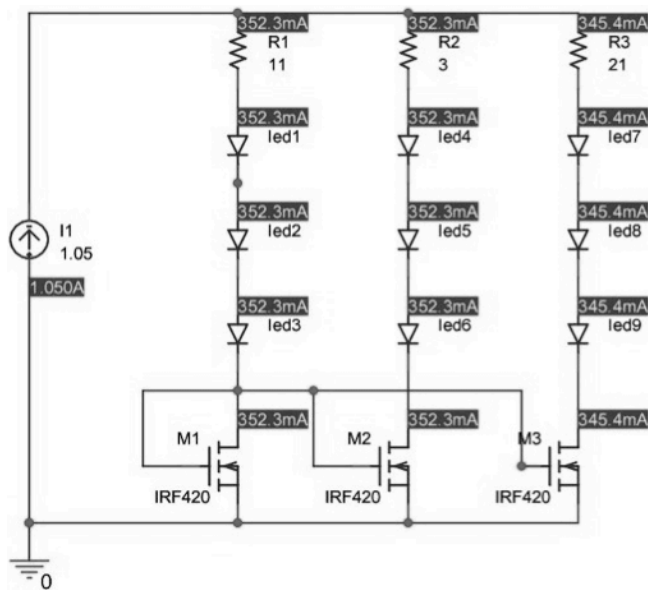
Το σημαντικότερο μειονέκτημα της εξεταζόμενης τοπολογίας είναι, η ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης στους παράλληλους κλάδους. Στη μέχρι τώρα ανάλυση της σύνδεσης των LEDs σε παράλληλες σειρές, έχουμε θεωρήσει την ιδανική και θεωρητικώς προβλεπόμενη περίπτωση, στην οποία τα LEDs είναι, όλα πανομοιότυπα μεταξύ τους. Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, οι σχηματιζόμενοι παράλληλοι κλάδοι, είναι και αυτοί όμοιοι μεταξύ τους και συνεπώς, το συνολικό ρεύμα οδήγησης διαιρείται και διαμοιράζεται σε αυτούς με τρόπο ομοιόμορφο, με αποτέλεσμα όλοι οι κλάδοι και άρα όλα τα LEDs να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα ακριβώς. Η πραγματικότητα, ωστόσο, απέχει πολύ από την ιδανική αυτή κατάσταση. Η ύπαρξη κατασκευαστικών ανοχών στη διαδικασία παραγωγής καθώς και οι ανοχές που παρουσιάζουν τα χρησιμοποιούμενα υλικά στις ιδιότητες τους, έχουν σαν αποτέλεσμα, κάθε LED που παράγεται, να είναι ουσιαστικά μοναδικό και να παρουσιάζει ένα μοναδικό συνδυασμό χαρακτηριστικών, που το ξεχωρίζει μεταξύ των υπόλοιπων LEDs της ίδιας οικογένειας προϊόντων. Είναι αδύνατη, λοιπόν, η κατασκευή 100% πανομοιότυπων LEDs ακόμα και αν αυτά προέρχονται από την ίδια παρτίδα. Οι διάφορες διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των LEDs, αντανakλώνται κυρίως στις I-V χαρακτηριστικές καμπύλες. Αυτό σημαίνει ότι τα LEDs που χρησιμοποιούνται σε μια εφαρμογή θα έχουν μεν, κοντινές τιμές δυναμικής αντίστασης, αλλά όχι ίδιες. Συνεπώς, η πόλωση δύο LEDs στην ίδια τάση, δε συνεπάγεται ότι αυτά θα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό οξύνεται, όταν συνδέονται πολλά LEDs σε σειρά, και στη συνέχεια ο κλάδος που προκύπτει συνδέεται παράλληλα με έναν αντίστοιχο

κλάδο, και έχει σαν αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης μεταξύ των παράλληλων κλάδων. Άμεση συνέπεια είναι, η ανομοιομορφία στη φωτεινότητα, στο χρώμα και στην καταπόνηση των LEDs, με αποτέλεσμα τη δραματική μείωση της αξιοπιστίας της εφαρμογής, ενώ παράλληλα, δεδομένου ότι η απόδοση των LEDs μειώνεται αυξανόμενου του ρεύματος, θα έχουμε μείωση της φωτεινής απόδοσης του κλάδου που διαρρέεται από το περισσότερο ρεύμα και συνεπώς θα μειώνεται και η συνολική φωτεινή απόδοση της εφαρμογής. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, οι κατασκευαστές υποβάλλουν τα παραγόμενα LEDs σε συγκεκριμένες δοκιμές και μετρήσεις και εν συνεχεία τα κατηγοριοποιούν (binning) σε μια προσπάθεια ταιριάσματος των χαρακτηριστικών τους, και τα διαθέτουν στην αγορά ανά κατηγορίες (bin). Παρ' όλα αυτά, ακόμα και η χρήση LEDs της ίδιας κατηγορίας, ενώ αμβλύνει αρκετά το πρόβλημα, δεν εξασφαλίζει ικανοποιητική αξιοπιστία στην περίπτωση της σύνδεσης σε παράλληλους κλάδους. Η χρήση επιμέρους κυκλωμάτων οδήγησης, σταθερού ρεύματος, για κάθε κλάδο ξεχωριστά, θα αντιμετώπιζε πλήρως την ανομοιομορφία στην κατανομή του ρεύματος, δεν αποτελεί ωστόσο, οικονομικά βιώσιμη λύση δεδομένου ότι το κόστος των υλικών και η πολυπλοκότητα κατασκευής αυξάνονται δραματικά. Ένας άλλος τρόπος εξισορρόπησης των ρευμάτων στους παράλληλους κλάδους, είναι η σύνδεση εν σειρά αντιστάσεων. Ωστόσο, η εισαγωγή απωλειών και η έλλειψη ικανοποιητικής ακρίβειας στην εξισορρόπηση των ρευμάτων, δεν προκρίνουν τη συγκεκριμένη λύση ως αξιόλογη. Οι πιο αξιόπιστες και συμφέρουσες λύσεις, στο πρόβλημα της εξισορρόπησης των ρευμάτων των παράλληλων κλάδων, υλοποιούνται με τρανζίστορ σε τοπολογίες «καθρέπτη ρεύματος», καθώς και με εξειδικευμένα ολοκληρωμένα γραμμικά κυκλώματα, ελεγχόμενων πηγών ρεύματος. Η υιοθέτηση μιας τέτοιας λύσης μπορεί να επιφέρει ομοιομορφία της τάξης του 95-98%. Η λειτουργία μιας διάταξης καθρέπτη ρεύματος προσομοιώνεται στη συνέχεια.



Εικόνα 5-5: Προσομοίωση ανομοιόμορφης κατανομής ρεύματος στην τοπολογία παράλληλων σειρών.

Οι ανομοιότητες μεταξύ των LEDs προσομοιώνονται με την εν σειρά σύνδεση αντιστάσεων, τυχαία επιλεγμένης τιμής, σε κάθε κλάδο. Η ανομοιομορφία της κατανομής του ρεύματος οδήγησης διορθώνεται με εφαρμογή κυκλώματος τύπου καθρέπτη ρεύματος.

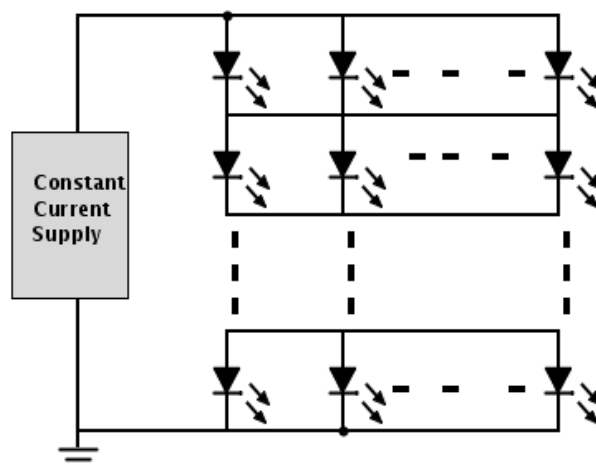


Εικόνα 5-6: Εξισορρόπηση των ρευμάτων παράλληλων κλάδων με καθρέπτη ρεύματος.

Ο καθρέπτης ρεύματος υλοποιείται με τρία MOSFET γενικού σκοπού και επιτυγχάνει εξισορρόπηση των ρευμάτων των παράλληλων κλάδων κατά 98%.

Σύνδεση σε «πίνακα»

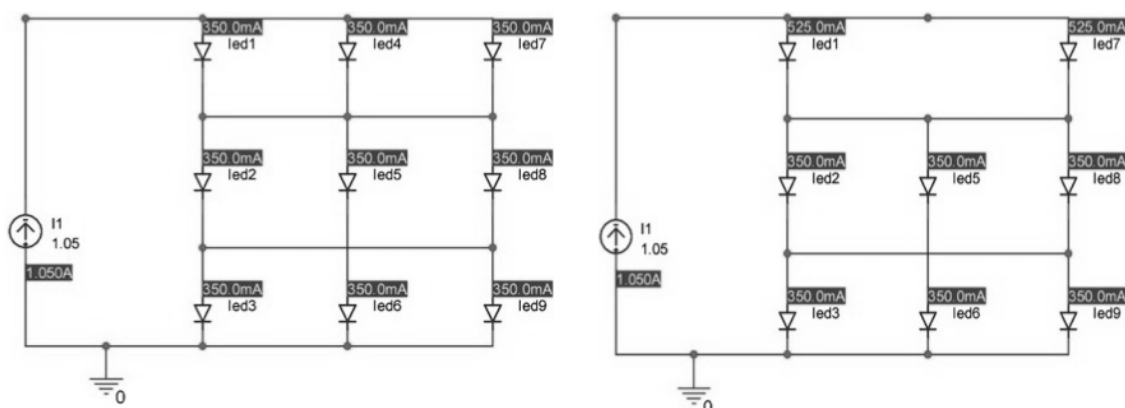
Η τρίτη εναλλακτική τοπολογία σύνδεσης των LEDs έγκειται στο σχεδιασμό ομάδων, αποτελούμενων από παράλληλους κλάδους του ενός LED ο καθένας, και εν συνεχεία, στην εν σειρά σύνδεση των ομάδων αυτών.



Σχήμα 5-15: Τοπολογία πίνακα.

Το σπουδαιότερο πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι το γεγονός ότι, η διακοπή λειτουργίας ενός LED, δεν συνεπάγεται τη διακοπή λειτουργίας κανενός άλλου στοιχείου της διάταξης, καθώς πάντα θα υπάρχει αγωγίμος δρόμος. Είναι βέβαια προφανές, ότι αν διακοπεί η λειτουργία όλων των LEDs

κάποιας ομάδας, τα οποία είναι παράλληλα μεταξύ τους, τότε θα διακοπεί η λειτουργία όλου του κυκλώματος.



Εικόνα 5-7: Προσομοίωση διακοπής λειτουργίας ενός LED στην τοπολογία πίνακα

Από την αντίστοιχη προσομοίωση, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED, η λειτουργία των υπολοίπων συνεχίζεται, ωστόσο, τα LEDs που βρίσκονται στην ομάδα στην οποία παρουσιάστηκε η βλάβη, επιβαρύνονται με ρεύμα αυξημένο κατά 50%, ενώ τα υπόλοιπα εξακολουθούν να λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονης ανομοιομορφίας στη φωτεινότητα η οποία θα είναι ορατή στο χρήστη της εφαρμογής. Κακή επιλογή του ρεύματος οδήγησης μπορεί γρήγορα να οδηγήσει τα LEDs της προβληματικής ομάδας, εκτός των ορίων που θέτει ο κατασκευαστής με αποτέλεσμα την άμεση καταστροφή τους. Επιπλέον, η έντονη καταπόνηση των εν λόγω LEDs και η ανομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας του κυκλώματος θα έχει σαν συνέπεια τη γρήγορη και ανομοιόμορφη φθορά τους και την αύξηση της πιθανότητας να διακοπεί η λειτουργία τους και άρα η λειτουργία όλου του κυκλώματος. Είναι επίσης προφανές, ότι σε κάθε ομάδα θα εμφανίζεται και το φαινόμενο της ανισοκατανομής των ρευμάτων στους παράλληλους κλάδους. Το φαινόμενο αυτό θα είναι εμφανώς αμβλυμένο σε σχέση με την τοπολογία των παράλληλων strings, θα εξακολουθεί ωστόσο να δημιουργεί προβλήματα. Τέλος, ο εντοπισμός τυχόν βλάβης στο εν λόγω κύκλωμα είναι αρκετά πολύπλοκος, δεδομένου ότι θα πρέπει να επιτηρείται κάθε κλάδος ξεχωριστά.

5.3.5 Ρύθμιση Φωτεινότητας

Η δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινής ισχύος σε μια εφαρμογή φωτισμού, προσφέρει ευελιξία στην προσαρμογή του φωτισμού στις εκάστοτε συνθήκες, συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και λύνει θέματα συμβατότητας, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής του χρησιμοποιούμενου φωτιστικού. Η ρύθμιση της φωτεινότητας, σε ένα φωτιστικό LED, επιτυγχάνεται μέσω του κυκλώματος οδήγησης χωρίς να απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός. Σημειώνεται ότι ο σχεδιασμός της εφαρμογής θα πρέπει πάντα να γίνεται θεωρώντας το μέγιστο επίπεδο φωτεινότητας ως την κανονική

κατάσταση λειτουργίας και να προβλέπεται η δυνατότητα ρύθμισης της φωτεινότητας προς τα κάτω.

Οι δημοφιλέστερες μέθοδοι ελέγχου της φωτεινής ισχύος των LEDs είναι οι εξής:

- Έλεγχος Ρεύματος ή Αναλογικός Έλεγχος Φωτεινότητας (Analog Dimming)
- Έλεγχος Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού (PWM Dimming)

Αναλογικός Έλεγχος Φωτεινότητας

Η συγκεκριμένη μέθοδος ρύθμισης της φωτεινότητας των LEDs βασίζεται στην, κατά προσέγγιση, γραμμική σχέση μεταξύ της φωτεινής ισχύος και του ρεύματος οδήγησής τους. Συνεπώς, ο έλεγχος του ρεύματος οδήγησης των LEDs αποφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ρύθμιση του ρεύματος οδήγησης, όπως είδαμε, μπορεί να επιτευχθεί, με μεγάλη ακρίβεια, από ένα διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος. Όπως αναφέρθηκε, η διατήρηση του ρεύματος σε μια σταθερή και προκαθορισμένη τιμή, επιτυγχάνεται με τη σύγκριση μιας τάσης αναφοράς, με την τάση κατά μήκος της αισθητήριας αντίστασης που συνδέεται σε σειρά με τα LEDs. Το τροφοδοτικό στη συνέχεια ρυθμίζει την τάση εξόδου του με σκοπό το ταίριασμα των δύο συγκρινόμενων τάσεων. Έτσι, η δυνατότητα ρύθμισης της τάσης αναφοράς με κάποιο εξωτερικό αναλογικό σήμα, μεταφράζεται, εμμέσως, σε ρύθμιση του ρεύματος εξόδου του τροφοδοτικού και άρα του ρεύματος οδήγησης των LEDs. Δεδομένης της γραμμικής σχέσης μεταξύ των δύο μεγεθών, η αύξηση ή μείωση του ρεύματος εξασφαλίζει την αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της φωτεινής ισχύος.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της εν λόγω τεχνικής, ρύθμισης της φωτεινότητας, είναι η βέλτιστη, από ενεργειακής απόψεως, απόδοσή της. Συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε μια **υπέρ-απλουστευμένη** μορφή της εκθετικής σχέσης που συνδέει το ρεύμα με την τάση ενός LED ως

$$I_{LED} = a \cdot e^{V_{LED}} \quad (5.3.5.1)$$

και κάνοντας την παραδοχή ότι η σχέση, μεταξύ ,φωτεινής ισχύος και ρεύματος οδήγησης, είναι πλήρως γραμμική ως

$$\Phi_v = \beta \cdot I_{LED} \quad (5.3.5.2)$$

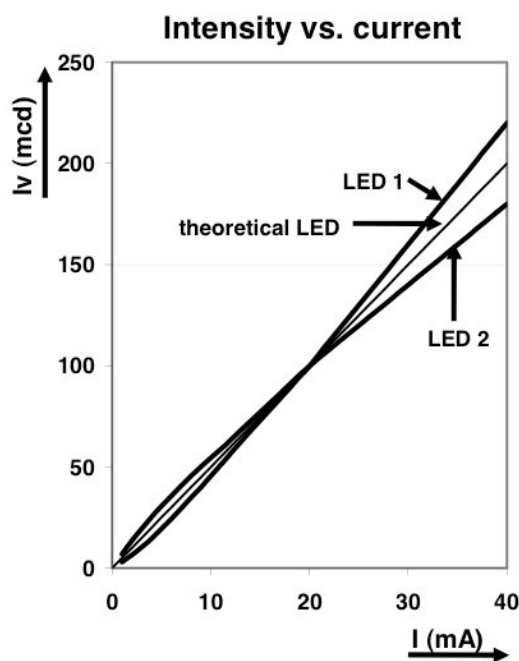
τότε, η απλουστευμένη σχέση που θα συνδέει την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ με τη φωτεινή ισχύ θα έχει τη μορφή:

$$P = \frac{\Phi_v}{a} \cdot \ln\left(\frac{\Phi_v}{a \cdot \beta}\right) \quad (5.3.5.3)$$

Το γεγονός αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσανάλογη αύξηση της φωτεινής ισχύος, όταν αυξάνεται η καταναλισκόμενη ισχύς. Συγκεκριμένα, η φωτεινή ισχύς αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό από την ηλεκτρική ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι η φωτεινή απόδοση (lm/W) του LED, μειώνεται αυξανόμενου του ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό επιδεινώνεται αν λάβουμε υπόψιν την αύξηση της

θερμοκρασίας, που συνοδεύει την αύξηση του ρεύματος, και η οποία επηρεάζει αρνητικά τη φωτεινή ισχύ. Κατά συνέπεια, η μείωση του ρεύματος, προκειμένου να επιτευχθεί το «ντιμάρισμα» του φωτιστικού, εξασφαλίζει τη λειτουργία των LED, στη βέλτιστη φωτεινή απόδοση, για το συγκεκριμένο επίπεδο φωτεινότητας.

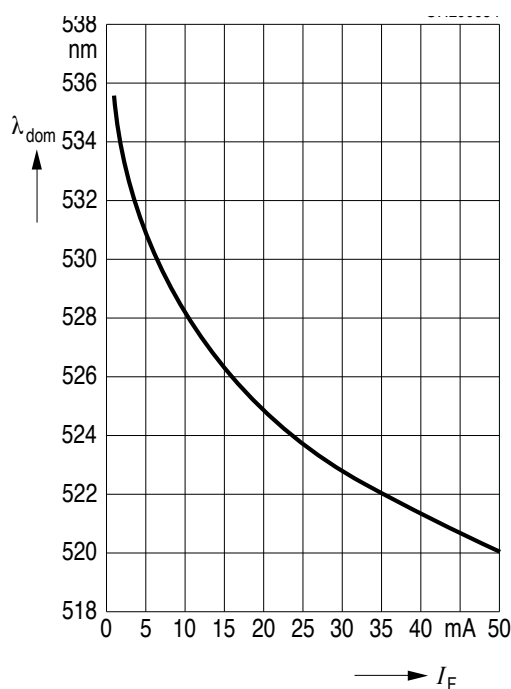
Ο έλεγχος της φωτεινότητας μέσω ελέγχου του ρεύματος, παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία την καθιστούν ακατάλληλη για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε ομοιομορφία και χρώμα φωτός. Όπως είδαμε, τα παραγόμενα LEDs, ομαδοποιούνται από τους κατασκευαστές, αναλόγως με τα χαρακτηριστικά τους, με σκοπό το καλύτερο δυνατό ταίριασμα τους. Ένα από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση των LEDs, είναι η φωτεινή ισχύς που παρουσιάζουν για μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος οδήγησης. Η τιμή αυτή καλείται «ρεύμα ομαδοποίησης» (grouping current) και αποτελεί το ονομαστικό ρεύμα των LEDs. Σχηματίζονται, έτσι, ομάδες από LEDs τα οποία εμφανίζουν κοινή φωτεινή ισχύ, όταν οδηγούνται με ονομαστικό ρεύμα. Επιπλέον, τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο αντίστοιχο Datasheet, αφορούν την οδήγηση των LEDs στο ονομαστικό ρεύμα. Η απόκλιση του ρεύματος από την ονομαστική τιμή, προκαλεί ανομοιομορφία στη φωτεινότητα δύο LED της ίδιας ομάδας.



Εικόνα 5-8: Συνέπειες της απόκλισης από το ρεύμα ομαδοποίησης στη φωτεινότητα.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η μεταβολή του ρεύματος οδήγησης δεν αποτελεί καλή πρακτική όταν επιθυμούμε υψηλή ομοιομορφία φωτισμού. Αντίστοιχα προβλήματα ανακύπτουν όταν η ομοιομορφία στο χρώμα των LEDs του φωτιστικού αποτελεί σημαντικό κριτήριο αξιοπιστίας της εφαρμογής. Το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός είναι άλλη μια παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με το ρεύμα οδήγησης και τη θερμοκρασία του LED.

Συγκεκριμένα, σε χαμηλά ρεύματα τα κυρίαρχα μήκη κύματος μετατοπίζονται προς την περιοχή του κίτρινου, ενώ όσο το ρεύμα αυξάνεται, μετατοπίζονται στην περιοχή του μπλέ. Η σχέση αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5-16: Εξάρτηση χρώματος από το ρεύμα οδήγησης.

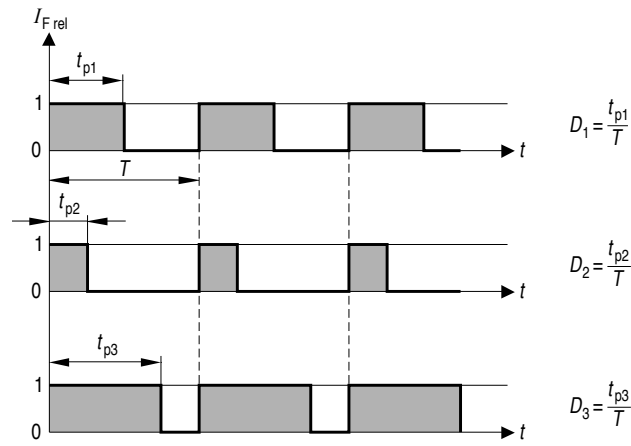
Η αύξηση της θερμοκρασίας, επιφέρει επίσης αύξηση στο κυρίαρχο μήκος κύματος.

Έλεγχος Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού (PWM)

Όπως είδαμε, η διατήρηση του ρεύματος σταθερού, στην ονοματική του τιμή, παρουσιάζει σημαντική πρακτική αξία και αποτελεί τη συνιστώμενη, από τον κατασκευαστή, πρακτική. Η λογική αυτή, ωστόσο, υπαγορεύει την αναζήτηση εναλλακτικής μεθόδου ρύθμισης της φωτεινότητας, η οποία δε θα απαιτεί τη μεταβολή του ρεύματος οδήγησης. Μια τέτοια μέθοδος είναι ο έλεγχος PWM.

Η ρύθμιση της φωτεινότητας με την εφαρμογή διαμόρφωσης εύρους παλμού, βασίζεται στην αδυναμία του ανθρώπινου οφθαλμού, να διακρίνει επαναλαμβανόμενα γεγονότα υψηλής συχνότητας. Έτσι, στην περίπτωση μιας φωτεινής πηγής, η οποία αναβοσβήνει ταχέως, ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται μια διαρκώς φωτοβολούσα πηγή, φαινομενικής φωτεινότητας, ευθέως εξαρτώμενης, από το χρονικό διάστημα που η πηγή παραμένει αναμμένη, στη διάρκεια μιας περιόδου. Στην περίπτωση εφαρμογής φωτισμού στερεάς κατάστασης, τα LEDs τροφοδοτούνται από το κύκλωμα οδήγησης, με σταθερό ρεύμα ονομαστικής τιμής. Προκειμένου να επιτευχθεί η ρύθμιση της φωτεινότητας με PWM, ελέγχεται η λειτουργία του κυκλώματος οδήγησης με τη βοήθεια ενός τετραγωνικού παλμού, σταθερής συχνότητας και μεταβλητού Duty Cycle.

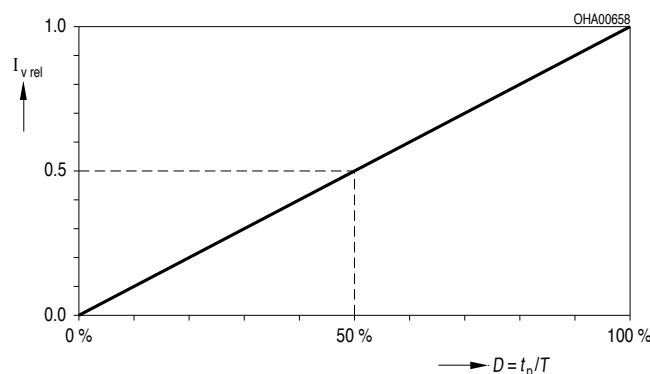
Ο τετραγωνικός παλμός διαμορφωμένου εύρους, παράγεται από κάποιο μικροεπεξεργαστή ή κάποιο λογικό κύκλωμα και οδηγείται στην πύλη ενός τρανζίστορ, το οποίο συνδέει και αποσυνδέει το κύκλωμα οδήγησης από την τροφοδοσία. Αν υποθέσουμε ότι το εν λόγω τρανζίστορ είναι n-τύπου, τότε όταν αυτό δέχεται στην πύλη του λογικό 1, θα συνδέει το κύκλωμα στην τροφοδοσία και όταν δέχεται λογικό 0 θα το αποσυνδέει, διακόπτοντας τη λειτουργία του.



Εικόνα 5-9: Διαμόρφωση εύρους παλμού PWM.

Όσο το σήμα στην πύλη του τρανζίστορ είναι 1, τα LEDs θα φωτοβολούν, διαρρέονα από σταθερό ονομαστικό ρεύμα. Σε αντίθετη περίπτωση τα LEDs δε θα διαρρέονται από ρεύμα και συνεπώς θα παραμένουν σβηστά.

Ως duty cycle, ορίζεται ο λόγος του χρονικού διαστήματος, κατά τη διάρκεια του οποίου, ο παλμός είναι λογικό 1, προς την περίοδο του σήματος. Όταν ο λόγος αυτός έχει τιμή 1 (DC=100%), τότε τα LEDs παραμένουν διαρκώς αναμμένα οδηγούμενα από το ονομαστικό τους ρεύμα. Μειώνοντας το Duty Cycle, αυξάνουμε το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου τα LEDs παραμένουν σβηστά, με αποτέλεσμα η φαινομενική φωτεινότητα να μειώνεται.



Σχήμα 5-17: Εξάρτηση φωτεινότητας από το duty cycle.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η σχέση μεταξύ της φαινομενικής φωτεινότητας και του duty cycle είναι γραμμική.

Η συχνότητα του παλμού θα πρέπει να ξεπερνάει τα 200Hz προκειμένου να μη γίνονται αντιληπτές οι ταχείες μεταβολές ακόμα και όταν ο παρατηρητής βρίσκεται σε κίνηση σε σχέση με την πηγή.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ρύθμισης της φωτεινότητας είναι το γεγονός ότι, τα LEDs καταπονούνται από σταθερό ρεύμα ονομαστικής τιμής, ανεξαρτήτως του επιπέδου φωτεινότητας που θέλουμε να πετύχουμε. Συγκεκριμένα, η τιμή του ρεύματος οδήγησης, εναλλάσσεται μεταξύ της ονομαστικής τιμής και του μηδενός. Συνεπώς, για όση ώρα τα LEDs παραμένουν αναμμένα, εμφανίζουν τα ονομαστικά τους χαρακτηριστικά, όπως αυτά προσδιορίζονται στα αντίστοιχα datasheets. Αποφεύγονται έτσι, ανεπιθύμητες μεταβολές στο χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός και επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ομοιομορφία φωτεινότητας.

Όσον αφορά στα μειονεκτήματα της ρύθμισης φωτεινότητας με PWM, συνοψίζονται στη μειωμένη απόδοση, σε σχέση με τον αναλογικό έλεγχο, και στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, λόγω της διακοπτικής λειτουργίας του συνολικού κυκλώματος. Όπως είδαμε, η μείωση του ρεύματος για την επίτευξη χαμηλότερου επιπέδου φωτεινότητας, εξασφαλίζει τη λειτουργία των LEDs στη βέλτιστη φωτεινή απόδοση. Αυτό δε συμβαίνει στην περίπτωση του PWM, δεδομένου ότι η φωτεινότητα μειώνεται χωρίς να μειώνεται η στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς. Γενικά η χρήση της εν λόγω μεθόδου προκρίνεται ως η καταλληλότερη, δεδομένης της εύκολης υλοποίησης της καθώς και της αξιοπιστίας την οποία προσφέρει.[16]

Προφίλ Φωτεινότητας

Η δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης της φωτεινότητας του φωτιστικού, μας επιτρέπει την κατάστρωση συγκεκριμένων προφίλ, με βάση τα οποία θα κυμαίνεται η φωτεινότητα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του φωτιστικού. Βασικός άξονας, για το σχεδιασμό των εν λόγω προφίλ, είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και η αύξηση της αυτονομίας του συστήματος. Συγκεκριμένα, παράγοντες όπως, το επίπεδο του περιβάλλοντος φωτισμού, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και το γεγονός ότι, συγκεκριμένες ώρες, τις οποίες, οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι πιο έντονες, η ανάγκη για φωτισμό είναι μεγαλύτερη, μπορούν να ληφθούν υπόψιν, ώστε να καταστρωθούν τα κατάλληλα προφίλ φωτεινότητας, του φωτιστικού εξωτερικού χώρου. Στην παρούσα εργασία, θα μας απασχολήσει η διαχείριση της, εκάστοτε διαθέσιμης, ενέργειας, που είναι αποθηκευμένη στο συσσωρευτή, με σκοπό την αποφυγή διακοπής της λειτουργίας του φωτιστικού, κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Αναλόγως με το επιθυμητό αποτέλεσμα, μπορούν να υλοποιηθούν διάφορες λογικές ελέγχου της φωτεινότητας του φωτιστικού. Στην προκειμένη περίπτωση, οι τεχνικές που θα προταθούν λαμβάνουν υπόψιν, το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, που μετράται τη στιγμή που το φωτιστικό πρέπει να τεθεί σε λειτουργία, και τις συνολικά απαιτούμενες ώρες λειτουργίας, και θεωρώντας ένα, κατά προσέγγιση, σταθερό ρυθμό εκφόρτισης του συσσωρευτή, προσαρμόζουν τα επίπεδα φωτεινότητας με τέτοιο τρόπο ώστε, αφενός να εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν καλύτερα οι ανάγκες φωτισμού και αφετέρου να αποφεύγεται η διακοπή λειτουργίας του φωτιστικού λόγω έλλειψης ενέργειας.

Η ακριβής μέτρηση του επιπέδου φόρτισης (SOC) ενός συσσωρευτή και η εκτίμηση της διαθέσιμης, αποθηκευμένης ενέργειας, είναι γενικά δύσκολο εγχείρημα. Ωστόσο, όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην περίπτωση των συσσωρευτών μολύβδου οξέος, η τάση ανοιχτοκύκλωσης μπορεί να μας δώσει μια ικανοποιητική εικόνα. Μια περισσότερο αξιόπιστη μέθοδος, η οποία συνυπολογίζει και τη γήρανση του συσσωρευτή, είναι η συνεχής καταγραφή του ρεύματος φόρτισης και του ρεύματος αποφόρτισης της μπαταρίας, και ολοκλήρωση τους στο πεδίο του χρόνου. Η διαφορά των δύο ολοκληρωμάτων δίνει τα διαθέσιμα αμπερώρια (Ah), το φορτίο δηλαδή που είναι αποθηκευμένο, ανά πάσα στιγμή, στη μπαταρία. Η μέθοδος αυτή καλείται «Μέτρηση Coulomb» (Coulomb Counting).

Η διάρκεια της νύχτας, οι απαιτούμενες, δηλαδή, ώρες λειτουργίας του φωτιστικού, μπορούν να προσδιορίζονται από τον ελεγκτή του συστήματος, είτε εφαρμόζοντας ρουτίνες ημερολογιακού υπολογισμού, είτε με τη λογική της αυτοεκπαίδευσης του ελεγκτή, ο οποίος μετρώντας τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, καθημερινά, θα μπορεί να προβλέπει, με καλή προσέγγιση, τα αντίστοιχα μεγέθη για την επόμενη ημέρα και να τα προσαρμόζει αναλόγως με τις μετρήσεις της προηγούμενης.

Έχοντας στη διάθεσή μας τα απαραίτητα στοιχεία σχετικά με το διαθέσιμο αποθηκευμένο φορτίο και τις απαιτούμενες ώρες λειτουργίας, μπορούμε να υλοποιήσουμε ορισμένες λογικές ρυθμίσεις της φωτεινότητας. Συγκεκριμένα προτείνονται οι εξής εναλλακτικές:

1. Προσδιορισμός του επιπέδου φωτεινότητας εκείνου, το οποίο αν διατηρηθεί σταθερό, το φωτιστικό θα παραμείνει εντός λειτουργίας, καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας. Η τεχνική αυτή ενέχει τον κίνδυνο ανεπαρκούς φωτισμού στο σύνολο της λειτουργίας του φωτιστικού.
2. Προσδιορισμός του μέγιστου χρονικού διαστήματος, κατά το οποίο το φωτιστικό θα μπορεί να λειτουργεί στο 100% της φωτεινότητας, ώστε τις εναπομείνουσες ώρες λειτουργίας, το επίπεδο της φωτεινότητας να μπορεί να διατηρηθεί σταθερό και ψηλότερο από κάποιο προκαθορισμένο επίπεδο ελάχιστης φωτεινότητας. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει ότι το φωτιστικό θα λειτουργεί στο 100% της φωτεινότητας για κάποιο διάστημα, το οποίο μπορεί να τοποθετηθεί χρονικά στις ώρες που παρουσιάζουν την εντονότερη ανάγκη για φωτισμό. Επιπλέον, εξασφαλίζεται ότι η φωτεινότητα δε θα μειωθεί υπερβολικά. Πρόκειται για εφαρμογή "scalar dimming".
3. Προσδιορισμός του μέγιστου χρονικού διαστήματος, κατά το οποίο το φωτιστικό θα μπορεί να λειτουργεί στο 100% της φωτεινότητας, ώστε τις εναπομείνουσες ώρες λειτουργίας, να μπορεί να εφαρμοστεί γραμμική μείωση της φωτεινότητας, σταθερού ρυθμού, είτε μέχρι αυτή να φτάσει κάποιο προκαθορισμένο ελάχιστο επίπεδο, είτε μέχρι να μηδενιστεί την ώρα που το φωτιστικό θα πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας.

Σε κάθε περίπτωση, η διαθέσιμη ενέργεια του συστήματος δίνεται συναρτήσει του διαθέσιμου φορτίου και της τάσης της μπαταρίας ως:

$$E_{\text{διαθέσιμη}}(Wh) = C_{\text{διαθέσιμο}}(Ah) \cdot V(V) \quad (5.3.5.4)$$

Στην περίπτωση του PWM dimming, όπου η στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς είναι σταθερή και το duty cycle D μεταβάλλεται με το χρόνο, η καταναλισκόμενη ενέργεια στο χρονικό διάστημα t_1 - t_2 δίνεται ως:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P \cdot D(t) dt \quad (5.3.5.5)$$

Έτσι, ανεξαρτήτως της λογικής που εφαρμόζεται, για τη ρύθμιση της φωτεινότητας, θα πρέπει, προκειμένου να μην τίθεται εκτός λειτουργίας το φωτιστικό, να τηρείται η εξής ισότητα:

$$C_{\text{διαθέσιμο}}(Ah) \cdot V(V) = P(W) \cdot \int_{t_1}^{t_2} D(t) dt \quad (5.3.5.6)$$

Από τη σχέση (5.3.5.6) προκύπτουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία, για την εφαρμογή των προτεινόμενων λογικών ρύθμισης της φωτεινότητας, με τις ανάλογες προσαρμογές κατά περίπτωση.

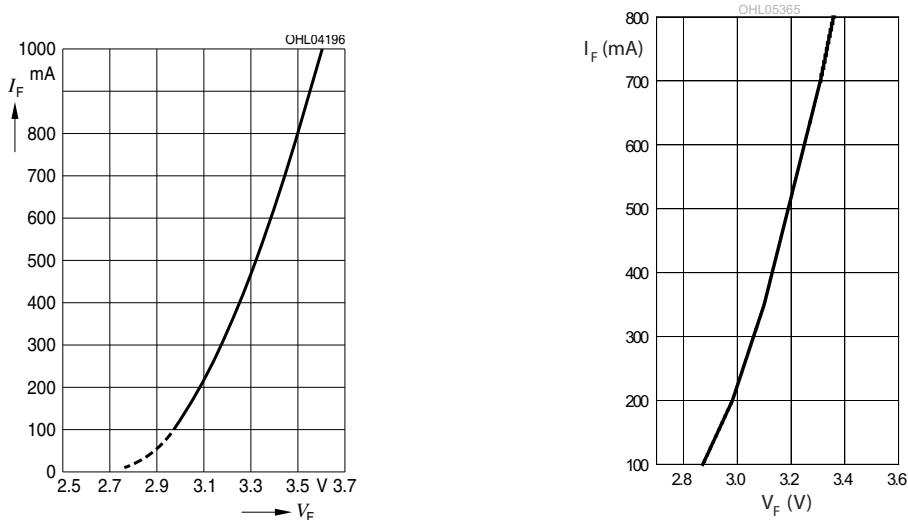
5.4 Case Study: Πλατείες Κέντρου ΕΜΠ

5.4.1 Περιγραφή

Το επόμενο βήμα στο σχεδιασμό του αυτόνομου φωτιστικού εξωτερικού χώρου, με δεδομένη τη διαστασιολόγηση, του φορτίου, της πηγής ενέργειας και της αποθηκευτικής διάταξης, είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός των επιμέρους διατάξεων που απαιτούνται για τον έλεγχο και τη σωστή λειτουργία των βασικών συστατικών μερών του συστήματος. Στην παρούσα ενότητα θα σχεδιαστεί το κύκλωμα των LEDs, θα επιλεγούν τα απαραίτητα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και θα σχεδιαστεί το αντίστοιχο κύκλωμα οδήγησης. Επιπλέον θα επιλεγεί η διάταξη φόρτισης του συσσωρευτή, με κριτήριο τη σωστή του φόρτιση, την προστασία του από υπερφορτίσεις, την αποφυγή εκφορτίσεων πέραν του επιτρεπτού ορίου και τη βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από το φωτοβολταϊκό. Τέλος θα προταθεί μια λογική ελέγχου της φωτεινότητας του φωτιστικού με σκοπό την αύξηση της αυτονομίας του συστήματος.

5.4.2 Το Κύκλωμα των LEDs

Όπως είδαμε, για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού, των μη στεγαζόμενων περιοχών, των κεντρικών πλατειών του συγκροτήματος της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, απαιτείται η χρήση 29 φωτιστικών, καθένα εκ των οποίων, φέρει 18 LEDs τύπου GoldenDragonOval+ και 12 LEDs τύπου Oslop SSL. Προκειμένου να εξασφαλίζουμε τη λειτουργία των LEDs, στις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή συνθήκες, και δεδομένου ότι η μελέτη των οπτικών τους χαρακτηριστικών έγινε με βάση τις συνθήκες αυτές, σαν ρεύμα οδήγησης, επιλέγεται το ονομαστικό τους ρεύμα των 350mA.



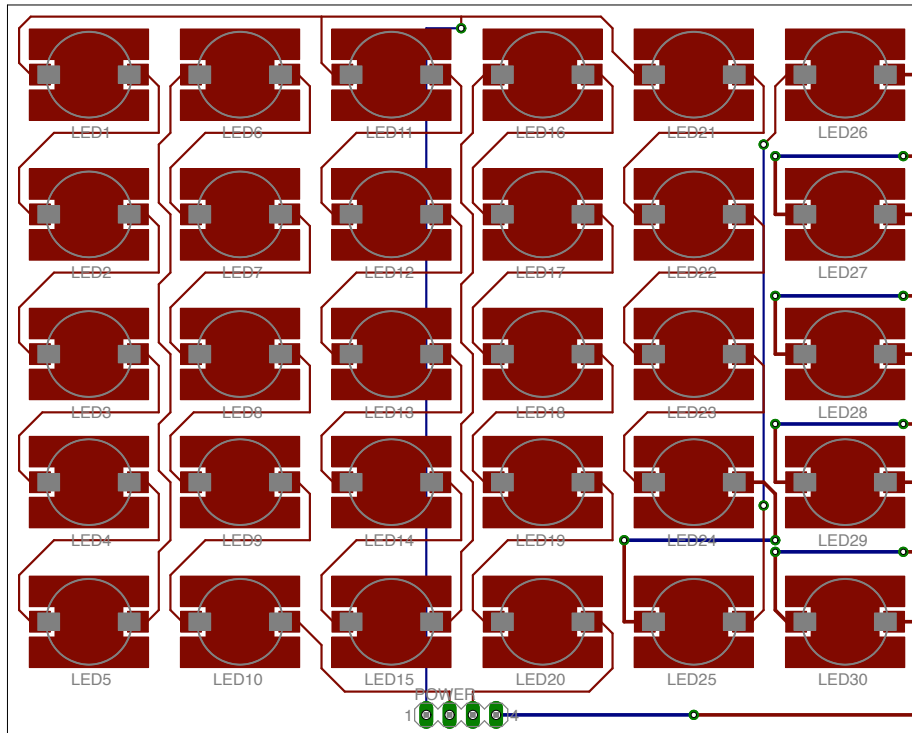
Εικόνα 5-10: Χαρακτηριστικές I-V των LEDs τύπου-1(αριστερά) και τύπου-2(δεξιά).

Σύμφωνα με τις αντίστοιχες καμπύλες I-V, για ονομαστικό ρεύμα οδήγησης 350mA, τα LEDs τύπου-1 θα εμφανίζουν πτώση τάσης $V_{f1}= 3.2V$ και τα LEDs τύπου-2, $V_{f2}=3.1V$. Ο μεγάλος αριθμός LEDs, καθιστά τη σύνδεσή τους σε σειρά μη πρακτική. Συγκεκριμένα, σε αυτή την περίπτωση, η τάση τροφοδοσίας των LEDs θα έφτανε τα 95V περίπου, με αποτέλεσμα να εγείρονται θέματα αποδοτικότητας της εφαρμογής, όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον η ανάγκη για αυξημένη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής, προκρίνει την επιλογή της τοπολογίας παράλληλων strings για τη σύνδεση των LEDs. Προκειμένου να εξισορροπηθεί το επίπεδο τάσης και το επίπεδο ρεύματος σε σχετικά χαμηλές τιμές, επιλέγουμε μια διάταξη αποτελούμενη από τρεις παράλληλους κλάδους, των 10 LEDs έκαστος.

Προκειμένου να εξασφαλίζεται η ευκολία στην αντικατάσταση των LEDs, σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας του κυκλώματος, καθώς και για να επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη διαχείριση και απαγωγή της παραγόμενης, από αυτά, θερμότητας, κρίνεται σκόπιμη η εγκατάσταση τους σε ξεχωριστή πλακέτα. Πρέπει επιπλέον, να δοθεί προσοχή, ώστε, η τοποθέτηση των LEDs στην πλακέτα να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε όλα να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Σε διαφορετική περίπτωση, η σύνθεση των πολικών διαγραμμάτων, στα διάφορα επίπεδα θα είναι λανθασμένη. Στη συνέχεια παρατίθενται, το σχηματικό και το αντίστοιχο σχεδιάγραμμα του τυπωμένου κυκλώματος.



Εικόνα 5-11: Σχηματικό του κυκλώματος των LEDs.



Εικόνα 5-12: Σχεδιάγραμμα τυπωμένου κυκλώματος

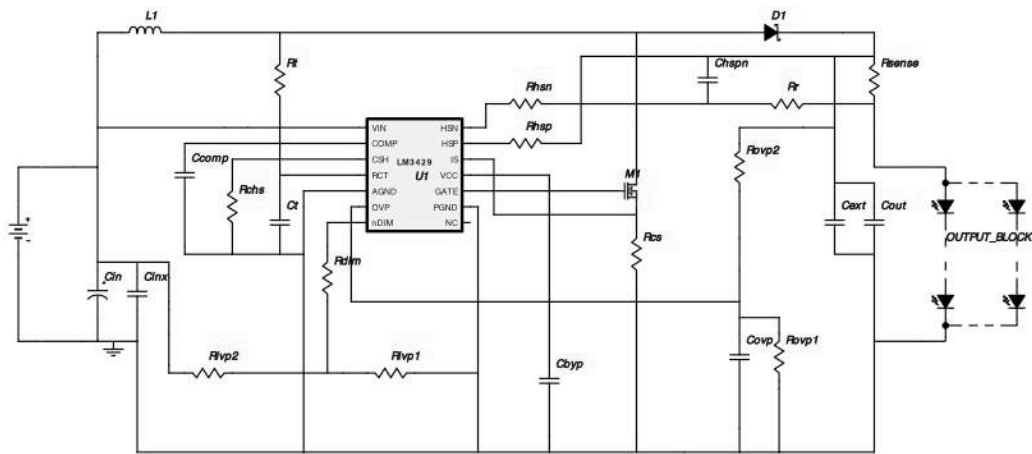
5.4.3 Το Κύκλωμα Οδήγησης

Οι βασικές παράμετροι, σύμφωνα με τις οποίες θα σχεδιαστεί το κύκλωμα οδήγησης είναι οι εξής:

- **Τάση Τροφοδοσίας V_{in} :** Στην περίπτωσή μας, το κύκλωμα θα τροφοδοτείται από συσσωρευτή μολύβδου οξέος, του οποίου η τάση θα κυμαίνεται μεταξύ 11V (αποφορτισμένος) και 13V (πλήρως φορτισμένος).
- **Ρεύμα Οδήγησης I_{out} :** Κάθε LED θα πρέπει να διαρρέεται από σταθερό, ονομαστικό ρεύμα 350mA. Δεδομένου ότι το κύκλωμα των LEDs αποτελείται από τρεις παράλληλους κλάδους, το συνολικό ρεύμα εξόδου του κυκλώματος οδήγησης θα είναι $I_{out}=3 \times 350\text{mA}=1.05\text{A}$.
- **Τάση Εξόδου V_{out} :** Δεδομένου ότι κάθε κλάδος αποτελείται από 6 LEDs τύπου-1 και 4 LEDs τύπου-2, τα οποία διαρρέονται από 350mA, θα πρέπει στα άκρα του να εφαρμόζεται τάση $V_{out}=6 \times 3.2\text{V}+4 \times 3.1\text{V}=31.6\text{V}$.

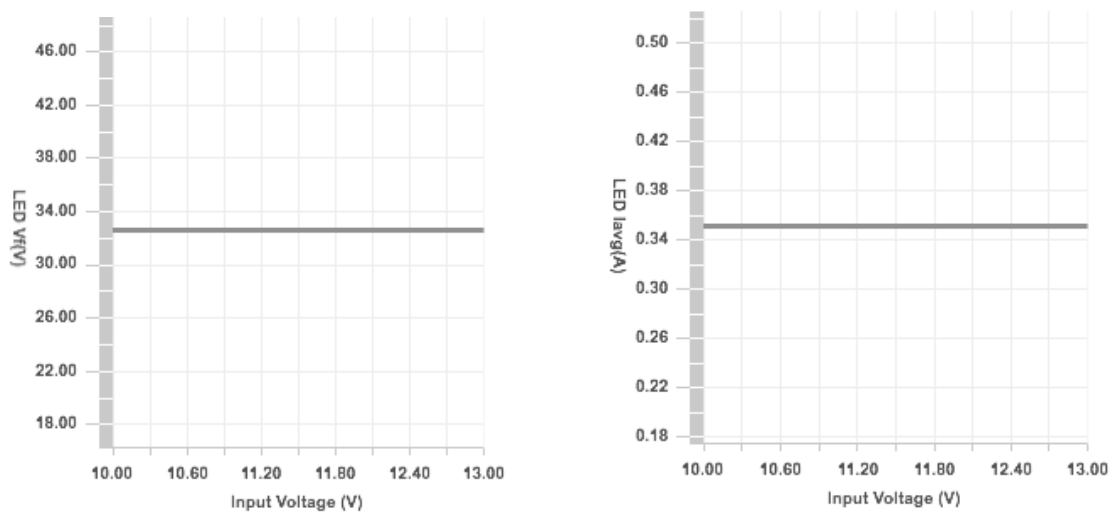
Το γεγονός ότι η τάση εξόδου του τροφοδοτικού, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου του, σε συνδυασμό με τα σημαντικά πλεονεκτήματα των διακοπτικών τροφοδοτικών, μας οδηγεί στην επιλογή ενός διακοπτικού τροφοδοτικού σταθερού ρεύματος, τοπολογίας Boost, για την οδήγηση των LEDs. Για το σκοπό αυτό και μετά από την αντίστοιχη έρευνα αγοράς επιλέγεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα οδήγησης LED, LM3429, της Texas Instruments.

Το εν λόγω ολοκληρωμένο κύκλωμα, είναι ειδικά σχεδιασμένο για εφαρμογές οδήγησης LED με σταθερό ρεύμα, ενσωματώνει, το λογικό κύκλωμα ελέγχου του ρεύματος και ένα nMOSFET υψηλής τάσης, επιτρέπει ένα μεγάλο εύρος τάσεων εισόδου (4.5V-75V), λειτουργεί με διακοπτικές συχνότητες έως και 2MHz και παρέχει προστασία υπερτάσεων και υπερθέρμανσης. Τέλος, μέσω του στοιχείου αυτού, δίνεται η δυνατότητα υλοποίησης ελέγχου φωτεινότητας είτε με αναλογικό έλεγχο του ρεύματος, είτε με PWM. Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση του κυκλώματος οδήγησης, γίνονται με τη βοήθεια του διαδικτυακού εργαλείου *WEBENCH* της Texas Instruments. Το εν λόγω εργαλείο δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού με κριτήρια το κόστος των υλικών, το μέγεθος της κατασκευής και την απόδοση του συστήματος. Το σχηματικό του κυκλώματος για την υλοποίηση της τοπολογίας τύπου Boost, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-13



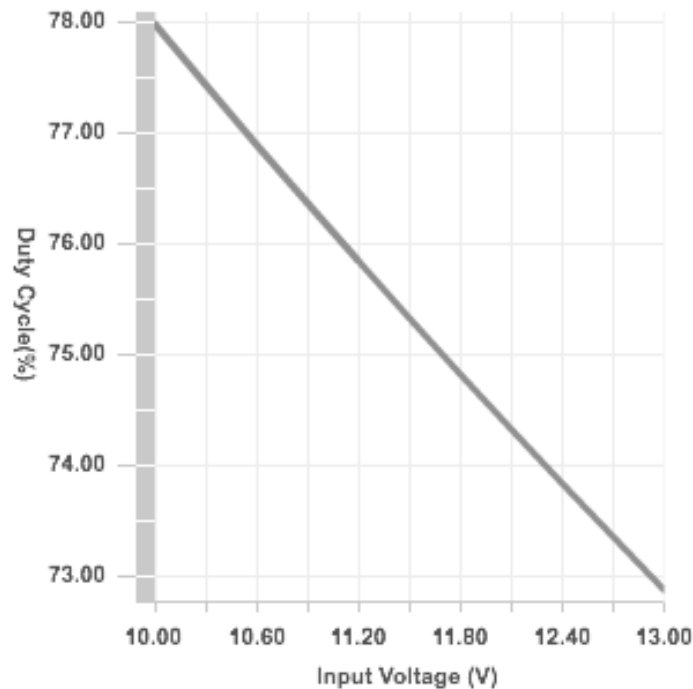
Εικόνα 5-13: Σχηματικό του κυκλώματος οδήγησης των LEDs

Οι τιμές των διαφόρων εξωτερικών στοιχείων που απαιτούνται για την υλοποίηση του κυκλώματος οδήγησης υπολογίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων που παρέχονται από τον κατασκευαστή στο αντίστοιχο Datasheet του εξαρτήματος. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της διάταξης.



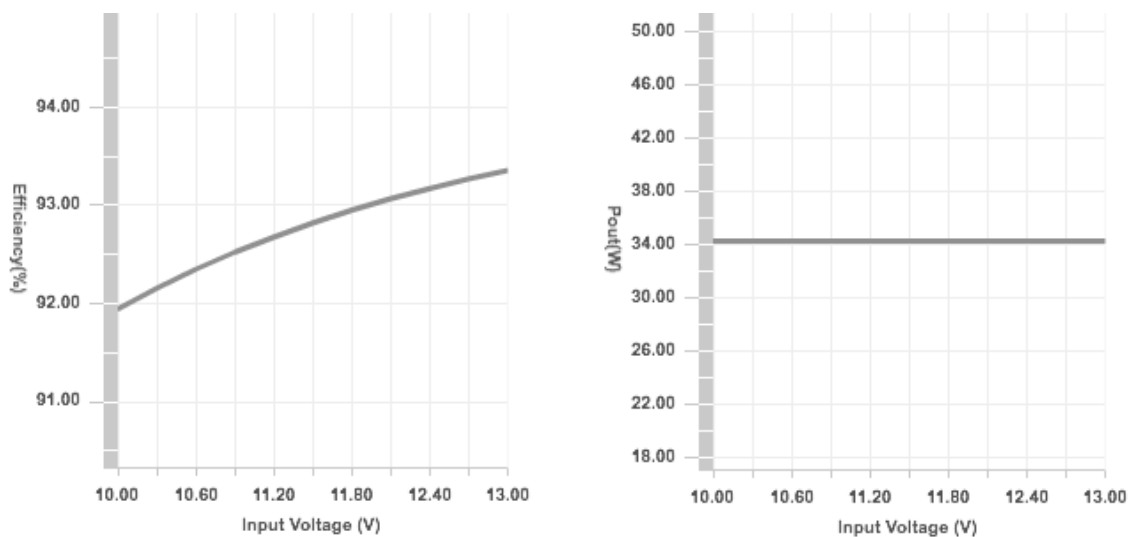
Σχήμα 5-18: Τάση και ρεύμα των LEDs συναρτήσει της τάσης της μπαταρίας

Στο Σχήμα 5-18 παρουσιάζεται ακριβώς, η βασική λειτουργία του κυκλώματος οδήγησης των LEDs, η οποία συνοψίζεται στη διατήρηση του ρεύματος οδήγησης, του κάθε κλάδου, σε μια σταθερή και προκαθορισμένη τιμή, ανεξαρτήτως της τάσης τροφοδοσίας, και συνεπώς της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.



Σχήμα 5-19: Duty cycle συναρτήσει της τάσης της μπαταρίας

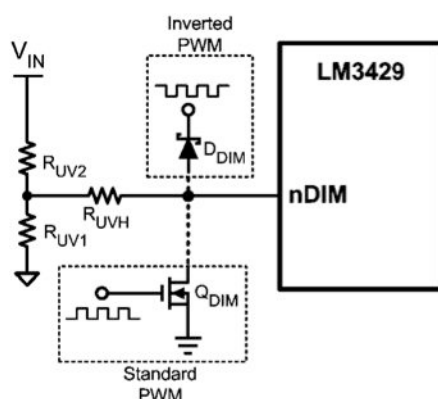
Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, η διατήρηση του ρεύματος σε μια σταθερή τιμή, επιτυγχάνεται με τη διαρκή επιτήρηση του και την κατάλληλη ρύθμιση της τάσης εξόδου, μέσω ρύθμισης του Duty Cycle του PWM σήματος που οδηγεί το διακοπτικό στοιχείο. Η μεταβολή του duty cycle συναρτήσει της τάσης του συσσωρευτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-19



Σχήμα 5-20: Απόδοση και ισχύς του κυκλώματος συναρτήσει της τάσης της μπαταρίας

Στο Σχήμα 5-20 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του κυκλώματος από άποψη κατανάλωσης ενέργειας. Παρατηρούμε ότι η σχεδιαζόμενη διάταξη παρουσιάζει αρκετά υψηλή απόδοση, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 92.5% και 93.5%, για όλο το εύρος των καταστάσεων φόρτισης του συσσωρευτή, κατά τη λειτουργία του συστήματος. Η συνολική κατανάλωση του συστήματος οδήγησης, συμπεριλαμβανομένων των LEDs, υπολογίζεται περίπου στα 34W. Αυτό σημαίνει ότι το σχεδιαζόμενο κύκλωμα εισάγει στο σύστημα απώλειες της τάξης του 1W περίπου.

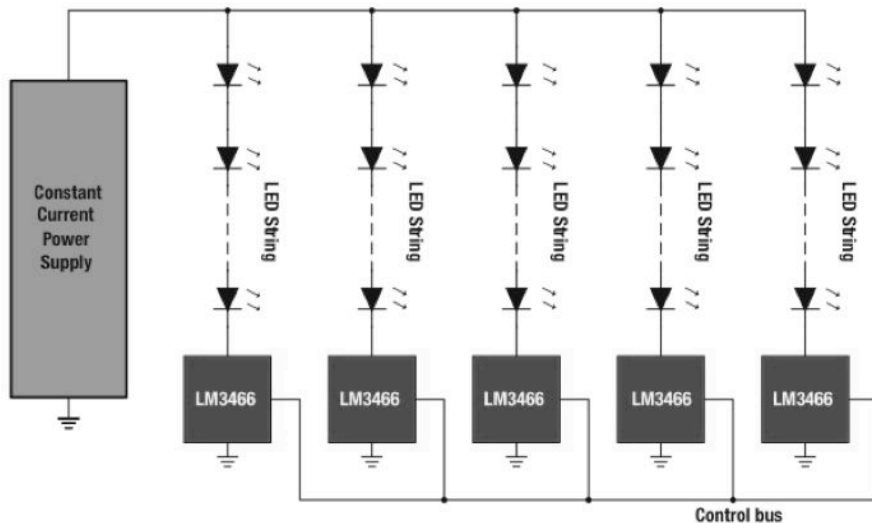
Προκειμένου να είναι εφικτή η ρύθμιση της φωτεινότητας με έλεγχο PWM, δίνονται δύο εναλλακτικοί τρόποι υλοποίησης από τον κατασκευαστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-21.



Σχήμα 5-21: Κυκλώματα υλοποίησης ρύθμισης φωτεινότητας με PWM

Στην προκειμένη περίπτωση, η λειτουργία του ελέγχου φωτεινότητας υλοποιείται με τη σύνδεση ενός nMOSFET γενικού σκοπού, στην αντίστοιχη είσοδο του ολοκληρωμένου.

Όπως έγινε φανερό, σε προηγούμενη ενότητα, η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιομορφία των παράλληλων κλάδων, είναι εξαιρετικά μεγάλης σημασίας στην περίπτωση της συγκεκριμένης τοπολογίας. Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμη η ισοκατανομή των δύο διαφορετικών τύπων LEDs, στους παράλληλους κλάδους. Έτσι, κάθε κλάδος θα αποτελείται από 6 LEDs τύπου-1 και 4 LEDs τύπου-2. Η χρησιμοποίηση, ωστόσο, δύο διαφορετικών τύπων LEDs, εντείνει, το ούτως ή άλλως υπαρκτό, φαινόμενο της ανισοκατανομής του ρεύματος οδήγησης στους παράλληλους κλάδους. Συνεπώς, κρίνεται επιτακτική η χρήση αποτελεσματικών κυκλωμάτων εξισορρόπησης του ρεύματος. Για το σκοπό αυτό, και μετά από αντίστοιχη έρευνα αγοράς, επιλέγεται το ολοκληρωμένο στοιχείο LM3466, της Texas Instruments. Το στοιχείο αυτό, αποτελείται εξολοκλήρου από γραμμικά στοιχεία και είναι σχεδιασμένο ειδικά για το σκοπό του διαμοιρασμού του ρεύματος εξόδου ενός τροφοδοτικού σταθερού ρεύματος, σε φορτίο αποτελούμενο από παράλληλους κλάδους. Η χρήση ενός τέτοιου στοιχείου σε κάθε κλάδο, εξασφαλίζει ταίριασμα των ρευμάτων με απόκλιση της τάξης του 0.5%, ενώ η ενεργειακή απόδοση του εν λόγω κυκλώματος φτάνει το 99%. Τυχόν ανοιχτοκύκλωση ενός κλάδου, αντιμετωπίζεται με τον, εκ νέου, διαμοιρασμό του ρεύματος, με αποτέλεσμα την αντιστάθμιση της απώλειας στη φωτεινότητα.

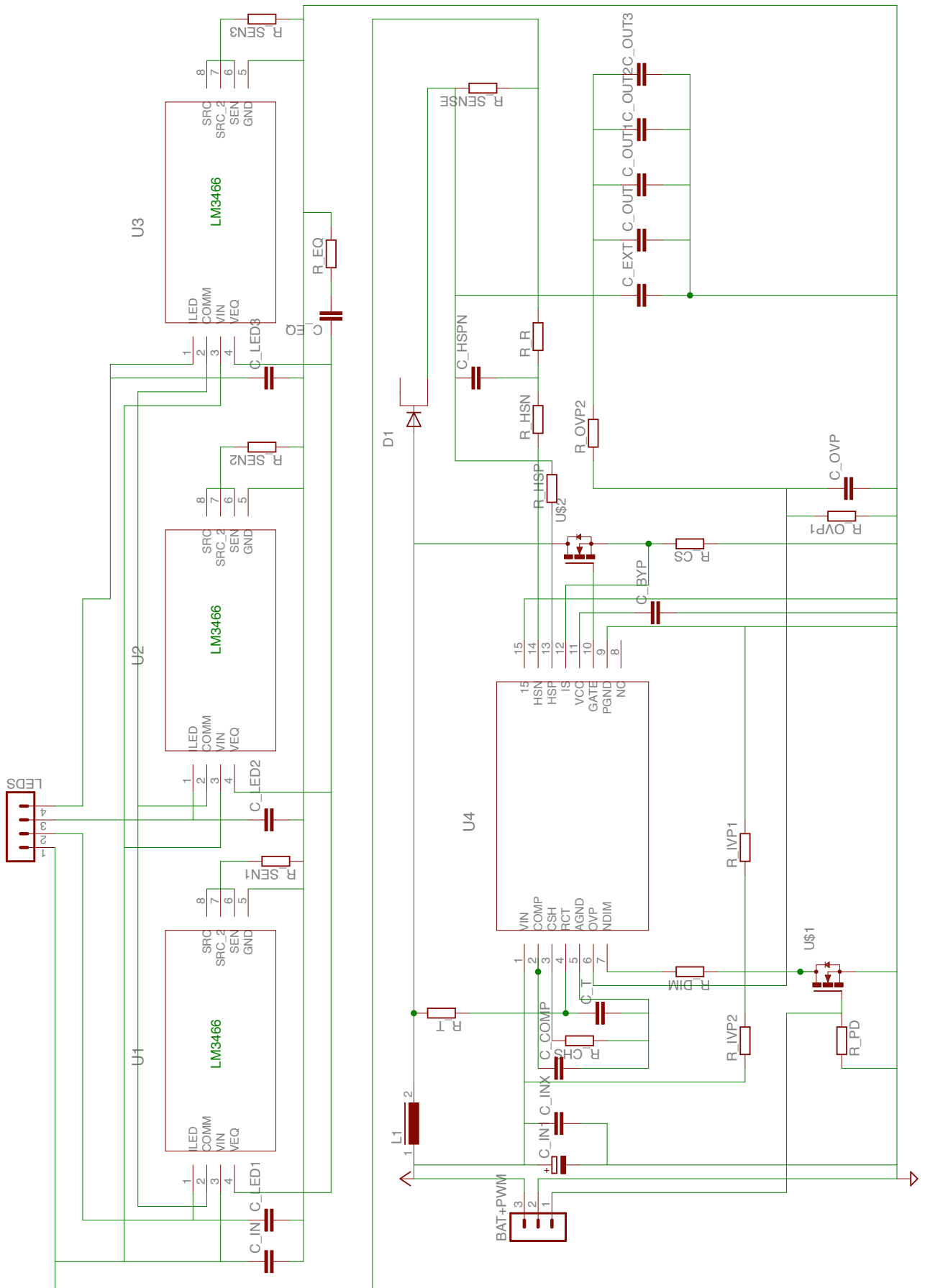


Εικόνα 5-14: Χρησιμοποίηση του LM3466 για εξισορρόπηση των ρευμάτων.

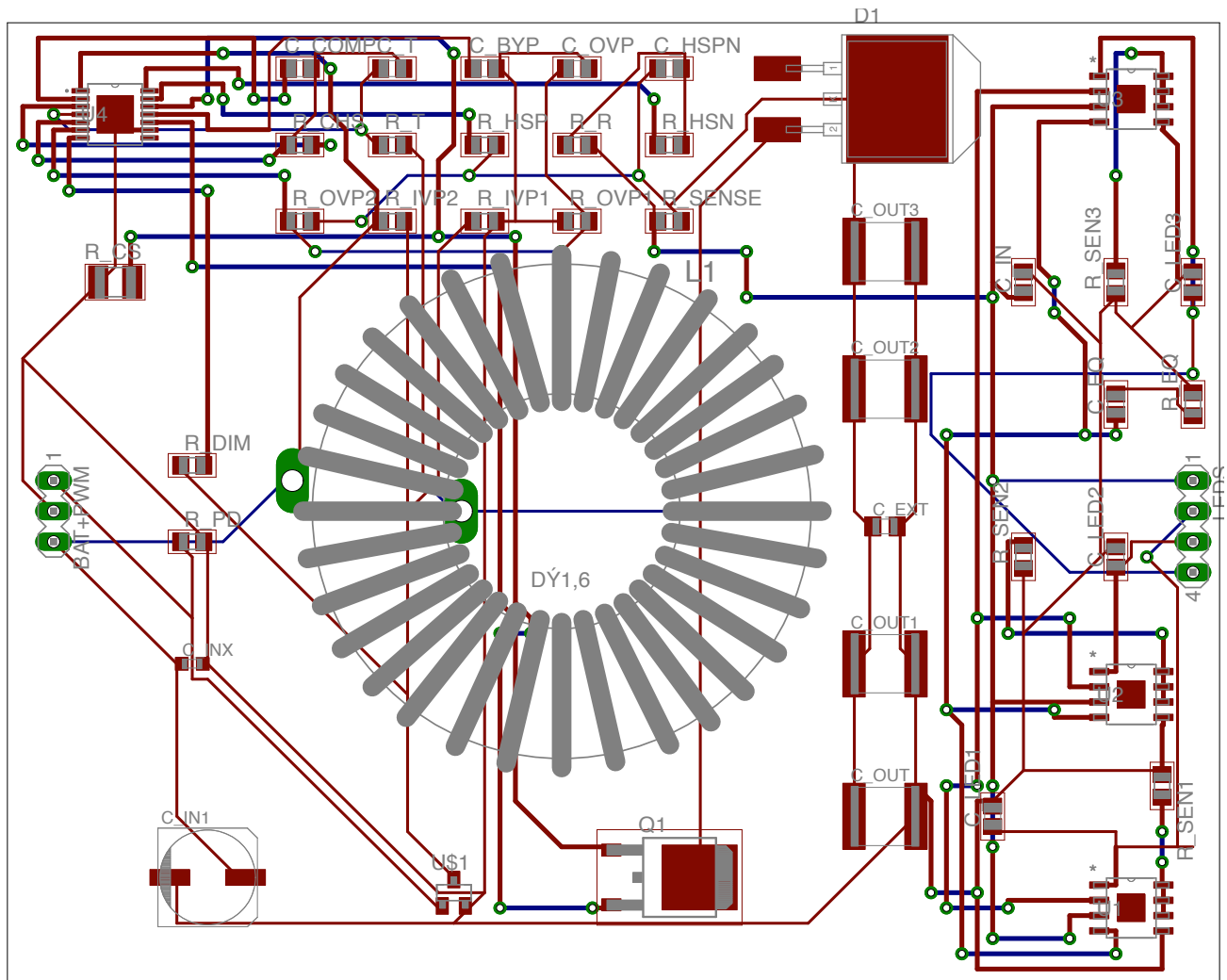
Το εν λόγω στοιχείο είναι εξαιρετικά απλό στη χρήση του και απαιτεί τη σύνδεση ελάχιστων εξωτερικών στοιχείων:

- **R_{sen} :** Διαρρέεται από το ρεύμα του αντίστοιχου κλάδου και ρυθμίζει το λόγο διαμοιρασμού του ρεύματος. Για ισοκατανομή του ρεύματος σε τρεις παράλληλους κλάδους, απαιτούνται 3 αντιστάσεις ίδιας τιμής, μια για κάθε κλάδο. Ενδεικνύμενη τιμή της πτώσης τάσης στα άκρα της εν λόγω αντίστασης είναι τα 0.3V. Έτσι για ρεύμα 350mA, επιλέγεται $R_{sen}=1\Omega$.
- **C_{LED} :** Χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση του θορύβου, την οποία εισάγει η παρασιτική επαγωγή του κλάδου, σε περίπτωση που ο αγωγίμος δρόμος που ενώνει τα LEDs είναι αρκετά μεγάλος. Συστήνεται η χρήση κεραμικού πυκνωτή υψηλής ποιότητας, χωρητικότητας 1 μ F.
- **C_{in} :** Κεραμικός πυκνωτής υψηλής ποιότητας για σύνδεση μεταξύ του ολοκληρωμένου κυκλώματος και της τάσης τροφοδοσίας, προτεινόμενης χωρητικότητας 10nF.
- **R_{EQ} , C_{EQ} :** Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των επιμέρους EQ-pins του κάθε LM3466, μεταξύ τους, και στη συνέχεια με τη γείωση. Προτεινόμενες τιμές αντίστασης και χωρητικότητας είναι 51.1 Ω και 1 μ F αντιστοίχως.

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 5-15 και στην Εικόνα 5-16 παρατίθενται, το συνολικό σχηματικό του, προς κατασκευή, κυκλώματος οδήγησης των LEDs, καθώς και το αντίστοιχο σχεδιάγραμμα του τυπωμένου κυκλώματος, όπως σχεδιάστηκαν μέσω του λογισμικού *Eagle PCB*.



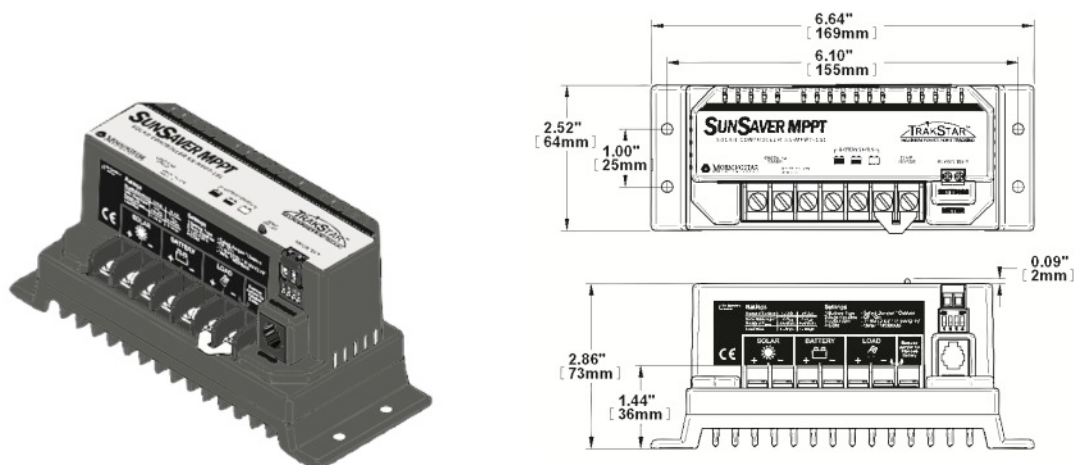
Εικόνα 5-15: Σχηματικό του συνολικού κυκλώματος οδήγησης



Εικόνα 5-16: Σχεδιάγραμμα του συνολικού τυπωμένου κυκλώματος.

5.4.4 Επιλογή Ρυθμιστή Φόρτισης

Για την υλοποίηση των λειτουργιών, της ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος, της φόρτισης και προστασίας του συσσωρευτή και της σύνδεσης και αποσύνδεσης του φορτίου από την τροφοδοσία, μετά από την αντίστοιχη έρευνα αγοράς, επιλέγεται ο ρυθμιστής φόρτισης *Sunsaver MPPT* της *MORNINGSTAR*.



Εικόνα 5-17: Φορτιστής MPPT

Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ρυθμιστή φόρτισης είναι τα εξής:

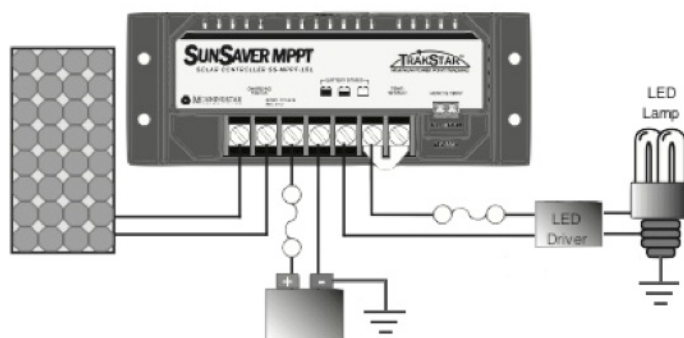
- Υλοποίηση έξυπνου αλγορίθμου MPPT με πολύ καλή απόδοση σε χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και συνολική απόδοση έως και 97%.
- Συμβατότητα με συσσωρευτές 12V, 24V και 36V.
- Υλοποίηση αλγορίθμου φόρτισης τεσσάρων σταδίων για μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή
- Προστασία του πάνελ, του φορτίου και του συσσωρευτή από υπερτάσεις, υπερφορτίσεις, βραχυκυκλώματα, υψηλές θερμοκρασίες, ανάστροφη ροή ρεύματος τις νυχτερινές ώρες και τέλος, προστασία από συνδέσεις λανθασμένης πολικότητας.
- Καταγραφή δεδομένων και παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος, για διάστημα 30 ημερών (Data logging).
- Δυνατότητα προγραμματισμού και προσδιορισμού των ρυθμίσεων λειτουργίας αναλόγως με τις ανάγκες της εφαρμογής.
- Αυτόματος εντοπισμός ανατολής και δύσης του ηλίου και δυνατότητα χρονισμού της σύνδεσης και αποσύνδεσης του φορτίου με την τροφοδοσία.

Η δυνατότητα εντοπισμού των εναλλαγών μεταξύ ημέρας και νύχτας, μέσω επιτήρησης της τάσης του φ/β πάνελ, καθιστούν την εξεταζόμενη διάταξη ιδανική για την εφαρμογή ενός αυτόνομου φωτιστικού. Συγκεκριμένα, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί δύο προκαθορισμένα κατώφλια τάσης, ένα για την

ανατολή και ένα για τη δύση του ηλίου. Κατά το ξημέρωμα, η τάση του φ/β αυξάνεται σταδιακά έως ότου φτάσει τη μέγιστη τιμή της. Όταν, η τάση ξεπεράσει την τιμή εκείνη, η οποία εκφράζει το κατώφλι ανατολής του ηλίου, τότε ο ελεγκτής αναγνωρίζει μετάβαση από νύχτα σε ημέρα και διακόπτει την τροφοδοσία του φορτίου. Αντιστοίχως, όταν η τάση του πάνελ μειωθεί πέραν της τιμής εκείνης, η οποία εκφράζει το κατώφλι δύσης του ηλίου, τότε ο ελεγκτής αναγνωρίζει μετάβαση από μέρα σε νύχτα και συνδέει το φορτίο με την τροφοδοσία. Τα δύο αυτά κατώφλια τάσης ορίζονται σαν ποσοστά της μέγιστης τάσης του φ/β, δηλαδή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Τυπικές τιμές για τα κατώφλια τάσης, ανατολής και δύσης του ηλίου είναι 53% και 42% της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του πάνελ, αντιστοίχως. Οι τιμές αυτές μπορούν να μεταβληθούν, προκειμένου να ικανοποιούνται επακριβώς οι ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Θα πρέπει ωστόσο πάντα να τηρούνται οι εξής κανόνες:

- Το κατώφλι ανατολής του ηλίου θα πρέπει να είναι πάντα υψηλότερο από αυτό της δύσης. Αποφεύγονται έτσι ψευδείς εναλλαγές ημέρας-νύχτας, λόγω σκιάσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας ή παράσιτων φωτισμών κατά τη διάρκεια της νύχτας.
- Οι δύο τιμές θα πρέπει να απέχουν, κατ' ελάχιστο, 10% μεταξύ τους. Έτσι αποφεύγονται τυχόν ψευδείς εναλλαγές ημέρας-νύχτας, λόγω απότομων μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας.

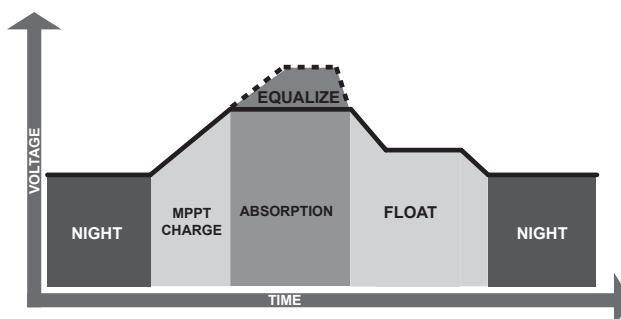
Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα προσαρμόζεται αυτομάτως στις μεταβολές της διάρκειας ημέρας, κατά τη διάρκεια ενός έτους και εξοικονομεί ενέργεια.



Εικόνα 5-18: Σχεδιάγραμμα της συνδεσμολογίας του συνολικού συστήματος.

Ο αλγόριθμος φόρτισης που υλοποιείται, αποτελείται από τρία βασικά στάδια και ένα προαιρετικό και έχει σαν στόχο την ταχεία, αποδοτική και ασφαλή φόρτιση του συσσωρευτή. Το πρώτο στάδιο διαρκεί μέχρι η τάση της μπαταρίας να φτάσει ένα προκαθορισμένο επίπεδο, και κατά τη διάρκεια του, εφαρμόζεται η τεχνική ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος και μεταφέρεται στην μπαταρία το 100% της διαθέσιμης παραγόμενης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια του 2^{ου} σταδίου, εφαρμόζεται σταθερή τάση στα άκρα του συσσωρευτή, για την αποφυγή υπερθερμάνσεων και εξάτμισης του ηλεκτρολύτη. Αναλόγως με το ιστορικό της μπαταρίας, το 2^ο στάδιο φόρτισης μπορεί να διαρκέσει μέχρι 4 ώρες. Όταν ολοκληρωθεί η πλήρης φόρτιση του

συσσωρευτή, ο ρυθμιστής μειώνει το επίπεδο της σταθερής τάσης που εφαρμόζεται στη μπαταρία, προκειμένου να αποφευχθεί η αυτοεκφόρτιση της. Το τέταρτο, προαιρετικό στάδιο φόρτισης, αφορά αποκλειστικά τους συσσωρευτές υγρού ηλεκτρολύτη (flooded) και ,αναλόγως με την επιλεγμένη ρύθμιση, εφαρμόζεται αυτομάτως κάθε 28 ημέρες και διαρκεί τρεις ώρες.



Εικόνα 5-19: Στάδια φόρτισης του συσσωρευτή.

Σκοπός του σταδίου αυτού είναι η αποφυγή του διαχωρισμού των συστατικών του διαλύματος του ηλεκτρολύτη. Συγκεκριμένα αποφεύγεται η κατακάθιση του οξέος. Αυτό επιτυγχάνεται με την περιοδική εφαρμογή μιας σταθερής τάσης, τιμής υψηλότερης από αυτή που εφαρμόζεται στο 2^ο στάδιο, η οποία προκαλεί διάσπαση μικρής ποσότητας νερού σε φυσαλίδες υδρογόνου και οξυγόνου (electrolyte gassing). Μια επιπλέον θετική συνέπεια της διαδικασίας αυτής είναι η ισοστάθμιση των επιμέρους τάσεων των κελιών της μπαταρίας.

5.4.5 Ρύθμιση Φωτεινότητας

Για την περίπτωση της υπό εξέταση εφαρμογής, προτείνεται η υλοποίηση προφίλ φωτεινότητας, το οποίο εκμεταλλεύεται το μέγιστο χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου το φωτιστικό θα μπορεί να αποδώσει το 100% της φωτεινότητας του, ενώ παράλληλα ενσωματώνει γραμμικό dimming, εξασφαλίζοντας τη λειτουργία του φωτιστικού καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας. Η υλοποίηση του εν λόγω προφίλ φωτεινότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 5-22



Σχήμα 5-22: Προτεινόμενο προφίλ φωτεινότητας

Στη γενική περίπτωση, διακρίνουμε τρεις καταστάσεις λειτουργίας του φωτιστικού. Αν θεωρήσουμε ότι τη χρονική στιγμή $t=0$ το φωτιστικό τίθεται σε λειτουργία, τότε κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης λειτουργίας, η φωτεινότητα του φωτιστικού αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, έως ότου φτάσει το 100%, τη χρονική στιγμή t_1 . Η φωτεινότητα του φωτιστικού παραμένει σταθερή στη μέγιστη τιμή της, για ένα χρονικό διάστημα t_2-t_1 . Τη χρονική στιγμή t_2 , η φωτεινότητα αρχίζει να μειώνεται με σταθερό ρυθμό, μέχρι να μηδενιστεί τη χρονική στιγμή $t=t_{ολ}$.

Σκοπός του ελεγκτή του συστήματος είναι, ο δυναμικός προσδιορισμός των χρονικών διαστημάτων $t_{ολ}$ και t_2-t_1 , και ο κατάλληλος έλεγχος του duty cycle του παλμού που συνδέει και αποσυνδέει το κύκλωμα οδήγησης των LEDs από την τροφοδοσία, ώστε να επιτυγχάνεται η ρύθμιση της φωτεινότητας με έλεγχο PWM. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το απαιτούμενο συνολικό χρονικό διάστημα λειτουργίας του φωτιστικού, $t_{ολ}$, προσδιορίζεται αναλόγως με τη διάρκεια λειτουργίας της προηγούμενης ημέρας και για τις ανάγκες της εργασίας θα το θεωρήσουμε δεδομένο. Ως δεδομένα θα θεωρήσουμε, επίσης, την καταναλισκόμενη ισχύ, η οποία μπορεί με καλή προσέγγιση να θεωρηθεί σταθερή, χάρη στον PWM έλεγχο της φωτεινότητας, καθώς και τη μέτρηση του διαθέσιμου αποθηκευμένου φορτίου στο συσσωρευτή, $C_{διαθέσιμο}$, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί από το μικροεπεξεργαστή του συστήματος, μέσω καταγραφής των ρευμάτων φόρτισης και αποφόρτισης και ολοκλήρωσής τους στο πεδίο χρόνου. Δεδομένου ότι η ισχύς είναι σταθερή και η φωτεινότητα είναι ευθέως ανάλογη με το duty cycle, D , η μορφή του Σχήμα 5-22, θα παραμείνει ίδια, αν στον κάθετο άξονα απεικονίσουμε το γινόμενο $P \cdot D(t)$. Τότε, το εμβαδόν του σχηματιζόμενου τραπεζίου, θα εκφράζει την ενέργεια που καταναλώνεται από το φωτιστικό, για ένα χρονικό διάστημα λειτουργίας $t_{ολ}$ και θα δίνεται ως:

$$E_{καταναλισκόμενη} = \frac{(t_2 - t_1 + t_{ολ}) \cdot D_2 \cdot P}{2} = \frac{(t_2 - t_1 + t_{ολ}) \cdot P}{2} \quad (5.4.5.1)$$

Αντιστοίχως, η ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί από το σύστημα, δίνεται ως:

$$E_{διαθέσιμη} = C_{διαθέσιμο} \cdot V_{bat}$$

Από την απαίτηση

$$E_{καταναλισκόμενη} = E_{διαθέσιμη}$$

προκύπτει το μέγιστο χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου το φωτιστικό δύναται να λειτουργεί στο 100% της φωτεινότητας του:

$$t_2 - t_1 = \frac{2 \cdot C_{διαθέσιμο} \cdot V_{bat}}{P} - t_{ολ} \quad (5.4.5.2)$$

Αν το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο επιθυμούμε το φωτιστικό να φτάσει στη μέγιστη φωτεινότητα του, αφηθεί σαν παράμετρος ελεύθερη προς επιλογή, στο σχεδιαστή της εφαρμογής, τότε ο ελεγκτής του συστήματος θα πρέπει να ρυθμίζει το duty cycle, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$D(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_1} & \text{για } 0 \leq t < t_1 \\ 1 & \text{για } t_1 \leq t < t_2 \\ -\frac{1}{t_{o\lambda} - t_2} \cdot t + \frac{t_{o\lambda}}{t_{o\lambda} - t_2} & \text{για } t_2 \leq t < t_{o\lambda} \end{cases} \quad (5.4.5.3)$$

Στην περίπτωση που προκύψει

$$t_2 - t_1 \geq t_{o\lambda}$$

τότε, η διαθέσιμη ενέργεια επαρκεί ώστε το φωτιστικό να λειτουργεί στο 100% της φωτεινότητας του, καθ' όλη τη διάρκεια της νύχτας και τίθεται $D=1$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΟΨΗ

6.1 Συμπεράσματα

Κεντρικός άξονας της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας στη σχεδίαση και την κατασκευή φωτιστικών, δρόμων και εξωτερικών χώρων. Η προτεινόμενη σχεδίαση, αποκάλυψε τα σημαντικά πλεονεκτήματα της υιοθέτησης νέων τεχνολογιών φωτισμού, ενώ παράλληλα ανέδειξε τη δυνατότητα υλοποίησης ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων.

Όπως έγινε φανερό κατά τη διάρκεια της σχεδίασης, η χρήση λαμπτήρων στερεάς κατάστασης LED, προσέφερε μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό της φωτεινής πηγής. Συγκεκριμένα, το μεγάλο εύρος διαθέσιμων θερμοκρασιών χρώματος, η δυνατότητα σύνθεσης του επιθυμητού πολικού διαγράμματος και η δυνατότητα ελέγχου της φωτεινότητας, επιτρέπουν το σχεδιασμό της φωτεινής πηγής αναλόγως με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στην διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής του σχεδιαζόμενου φωτιστικού. Αποδείχθηκε δε, ότι με την προσεκτική επιλογή των χρησιμοποιούμενων LEDs και την κατάλληλη σχεδίαση της φωτεινής πηγής, αυτή, μπορεί να αντεπεξέλθει στην κάλυψη των πιο απαιτητικών προδιαγραφών στο φωτισμό δρόμων. Επιπλέον, είδαμε, πως, οι ήδη υψηλές, φωτεινές αποδόσεις, οι οποίες διαρκώς αυξάνονται, η ανθεκτικότητα, η ποιότητα του παραγόμενου φωτός και η ιδιαιτέρως αυξημένη διάρκεια ζωής, καθιστούν την τεχνολογία των LEDs ιδανική για χρησιμοποίηση σε εφαρμογές φωτισμού δρόμων και εξωτερικών χώρων και τους δίνουν σημαντικό προβάδισμα έναντι των συμβατικών πηγών φωτισμού. Η τεχνολογία των LEDs αποτελεί αδιαμφισβήτητο το μέλλον στον κλάδο του φωτισμού.

Δεδομένου του μεγάλου ποσοστού που κατέχει ο φωτισμός στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, η προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας σε εφαρμογές φωτισμού είναι μεγάλης σημασίας. Στην κατεύθυνση αυτή, μπορεί, όπως είδαμε, να συμβάλει σημαντικά η ενσωμάτωση, στα συστήματα φωτισμού, συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Η προσεκτική ανάλυση, μάλιστα, των εκάστοτε αναγκών της εφαρμογής και του διαθέσιμου ενεργειακού δυναμικού, και η κατάλληλη διαστασιολόγηση των συνιστωσών του συστήματος, μπορεί να εξασφαλίσει σημαντικό βαθμό αυτονομίας, ο οποίος μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, με την εφαρμογή έξυπνων συστημάτων εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού και ρύθμισης της φωτεινότητας.

6.2 Προτάσεις Για Μελέτη

Η προκαταρκτική μελέτη και σχεδίαση του αυτόνομου συστήματος φωτισμού δρόμων και εξωτερικών χώρων, που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, ανοίγει το δρόμο για τη μελέτη μιας σειράς σχετικών θεμάτων:

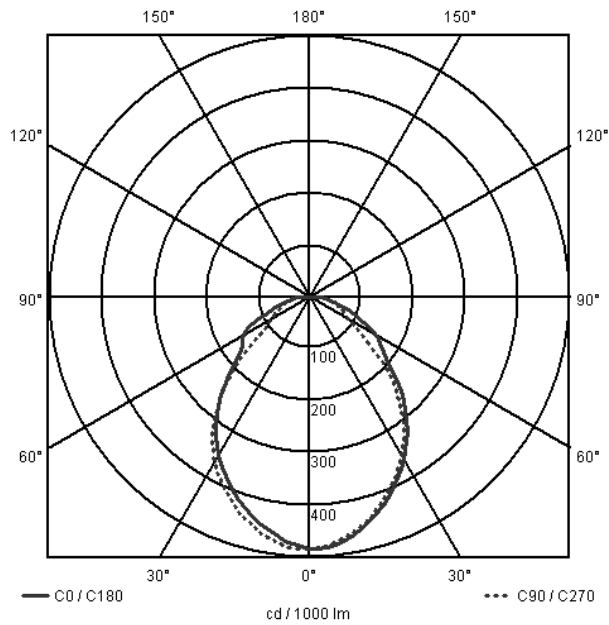
- Η εφαρμογή πολυκριτηριακών συστημάτων αποφάσεων και έξυπνων αλγορίθμων για την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού του πολιικού διαγράμματος της φωτεινής πηγής, αναλόγως με τις προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής.
- Η εφαρμογή μοντέλων μεσοπικής οράσεως για την βέλτιστη επιλογή της θερμοκρασίας χρώματος της πηγής, με κριτήριο τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας όσο και την ποιότητα του φωτισμού.
- Η ανάπτυξη και υλοποίηση αλγορίθμων ρύθμισης της φωτεινότητας του φωτιστικού αναλόγως με τη διάβαση περαστικών.
- Η μελέτη σύνδεσης του φωτιστικού στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάπτυξη των αντίστοιχων συστημάτων και αλγορίθμων διαχείρισης της ροής ενέργειας από και προς το σύστημα φωτισμού.
- Η υλοποίηση τοπικού δικτύου μεταξύ των ιστών φωτισμού για την κεντρική διαχείριση των συστημάτων φωτισμού, την καταγραφή, τη διαχείριση και τη μετάδοση πληροφοριών σχετικών με τη λειτουργία των φωτιστικών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

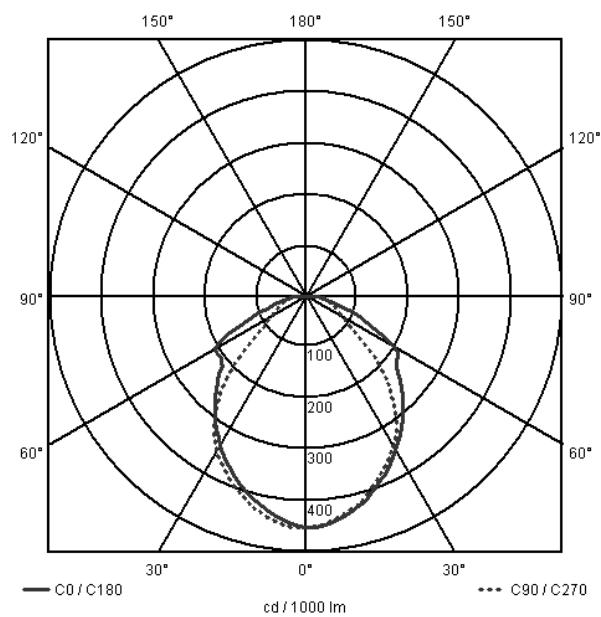
- [1] Δέρβος, Κ. Θ. (2010). *Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [2] Μανιάς, Σ. Ν. (2007). *Ηλεκτρονικά Ισχύος* (6η εκδ.). Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- [3] Αθανασοπούλου, Μ. Α., Μπουρούσης, Κ. Α., (2004). *Φωτισμός Δρόμων με Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Σύστημα*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [4] Τοπαλής, Φ. Β. (1994). *ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑ : Βασικές Αρχές Φωτομετρίας και Μελέτες Φωτισμού*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [5] Παπαδόπουλος, Μ. Π. (1997). *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [6] Clanton & Associates Inc. (2010). *Advanced Street Lighting Technologies Assessment Project- City of San Diego*. San Diego, CA: Clanton & Associates Inc.
- [7] Cook, T., Shackelford, J., & Pang, T. (2008). *LED Street Lighting*. San Francisco, CA: Pacific Gas and Electric Company.
- [8] Dunlop, J. (1998). *Stand-Alone Photovoltaic Lighting Systems: A Decision Maker's Guide Series*. Florida: Florida Solar Energy Center.
- [9] IDA Model Outdoor Lighting Code Committee. (2002). *Outdoor Lighting Code Handbook*. Tucson, Arizona: International Dark Sky Association.
- [10] Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. (A. Press, Επιμ.)
- [11] Mohan, N., & Undeland, T. M. (2007). *Power electronics: converters, applications, and design* (3rd εκδ.). India: Wiley.
- [12] ON Semiconductor. (2002). *Linear and Switching Voltage Regulator Handbook*. Denver, Colorado: ON Semiconductor.
- [13] Ono, M., & Chikazawa, Y. (2009). *Street Lighting with LED Light Sources*. Osram Opto Semiconductors.
- [14] Remaking Cities Institute. (2011). *Led Street Light Research Project*. Pittsburgh: Remaking Cities Institute.
- [15] Ylinen, A.-M., Tahkamo, L., Puolakka, M., & Halonen, L. (2011, July). Road Lighting Quality, Energy Efficiency and Mesopic Design- LED Street Lighting Case Study. *Leukos*, 9-24.
- [16] <http://osram.com/>
- [17] http://www.osram-os.com/osram_os/en/
- [18] <http://www.ti.com/>
- [19] <http://www.morningstarcorp.com/en/sunsavermppt>
- [20] <http://www.wikipedia.org/>
- [21] <http://www.onsemi.com/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΦΩΤΕΙΝΗ ΠΗΓΗ

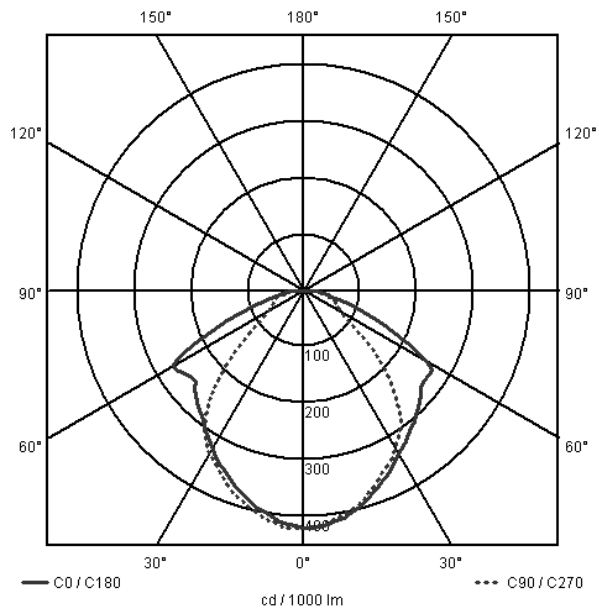
ΠΟΛΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ



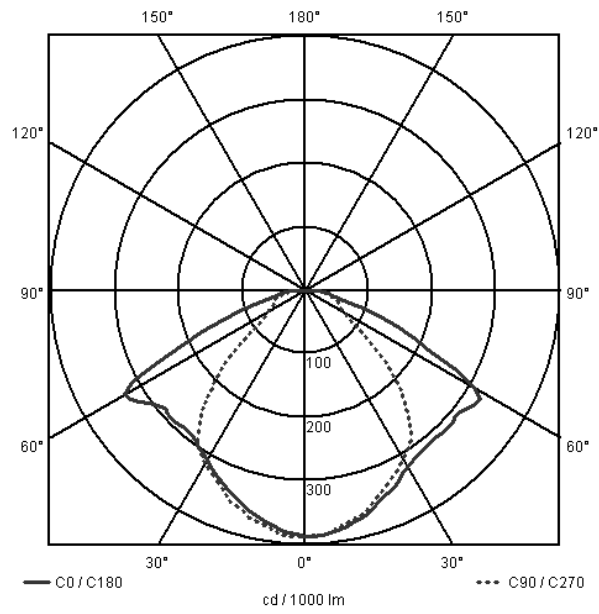
Σχήμα Α-1 : Συνδυασμός «10-90»



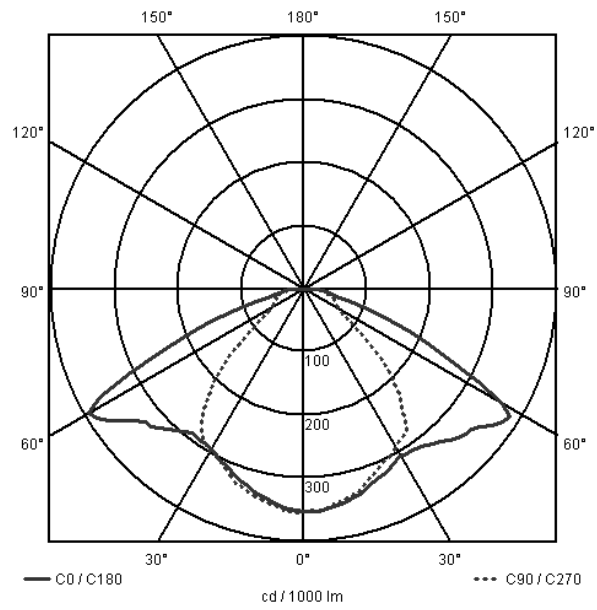
Σχήμα Α-2 : Συνδυασμός «20-80»



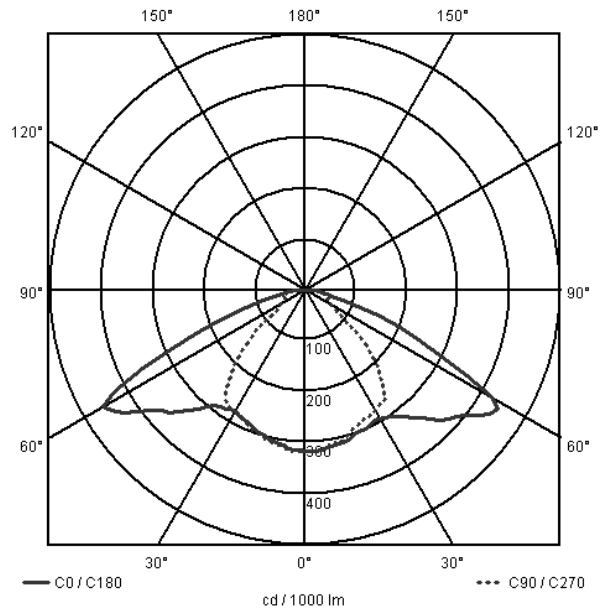
Σχήμα Α-3 : Συνδυασμός «30-70»



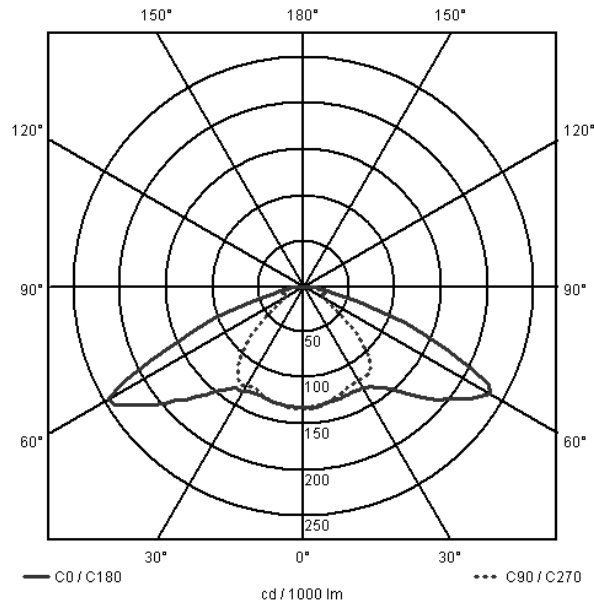
Σχήμα Α-4 : Συνδυασμός «40-60»



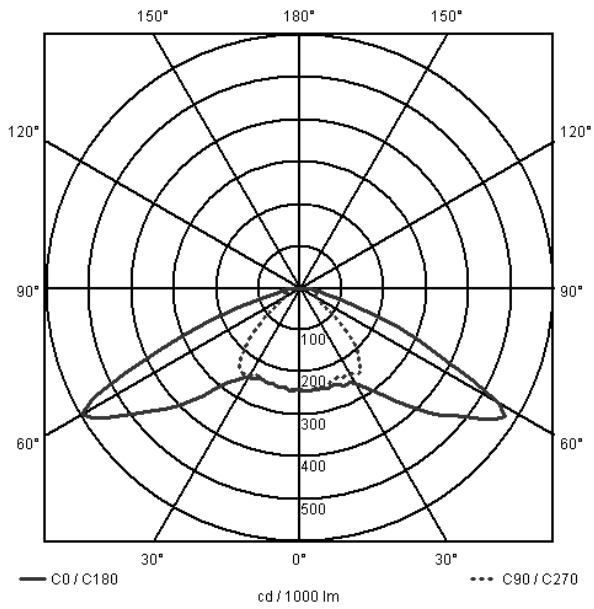
Σχήμα Α-5 : Συνδυασμός «50-50»



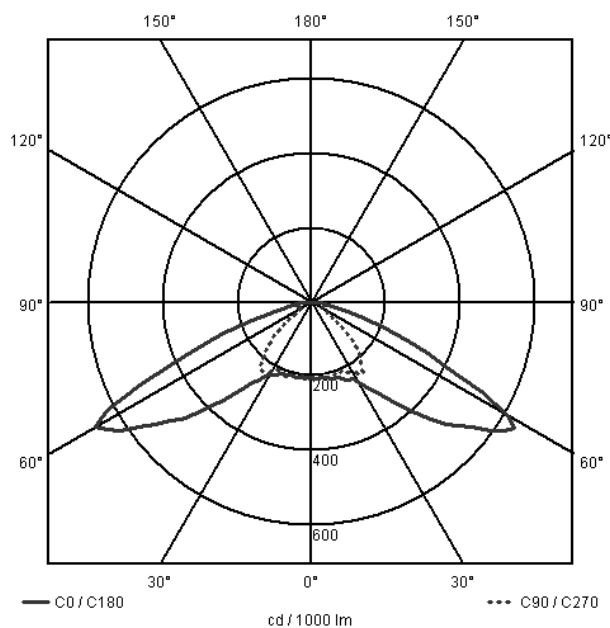
Σχήμα Α-6 : Συνδυασμός «60-40»



Σχήμα A-7 : Συνδυασμός «70-30»



Σχήμα A-8 : Συνδυασμός «80-20»



Σχήμα Α-9 : Συνδυασμός «10-90»

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες που συγκεντρώνουν τους υπολογισμούς των διαφόρων φωτομετρικών μεγεθών, όπως αυτοί προέκυψαν από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις στο λογισμικό *Relux*, για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους συνδυασμούς των δύο τύπων LED, που συνθέτουν τη φωτεινή πηγή. Η διάταξη των ιστών φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται στην Ενότητα 2.5.5.

Κάθε σειρά μετρήσεων χρωματίζεται αναλόγως με τις προδιαγραφές φωτισμού τις οποίες μπορεί να επιτύχει και συνεπώς, αναλόγως με τις κλάσεις φωτισμού για τις οποίες ο εξεταζόμενος συνδυασμός είναι κατάλληλος. Ο χρωματισμός γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα Α-10

ME1	ME2	ME3a
ME3b	ME4a	
ME3c	ME4b	

Σχήμα Α-10

Πίνακας Α-1: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «10-90»

10% Oval + 90% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,27	0,3	0,32	0,35	0,37	0,4	0,42	0,45	0,48
E_{U_0}	0,23	0,26	0,28	0,31	0,35	0,38	0,41	0,45	0,48
U_1	0,38	0,4	0,43	0,47	0,51	0,54	0,56	0,58	0,61
TI%	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,25	0,28	0,3	0,32	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44
E_{U_0}	0,2	0,22	0,25	0,27	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42
U_1	0,32	0,36	0,39	0,41	0,44	0,47	0,5	0,53	0,55
TI%	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,36	0,39	0,41
E_{U_0}	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37
U_1	0,28	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44	0,47	0,5
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,35	0,37	0,39
E_{U_0}	0,15	0,17	0,19	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31
U_1	0,24	0,27	0,3	0,33	0,36	0,38	0,41	0,43	0,45
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,36
E_{U_0}	0,13	0,15	0,17	0,19	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28
U_1	0,21	0,24	0,26	0,29	0,31	0,35	0,37	0,39	0,41
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74

Πίνακας Α-2: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «20-80»

20% Oval + 80% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,31	0,33	0,36	0,38	0,41	0,43	0,45	0,48	0,5
E_{U₀}	0,27	0,3	0,33	0,37	0,4	0,43	0,46	0,49	0,52
U₁	0,48	0,51	0,54	0,57	0,6	0,62	0,63	0,65	0,67
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.64	0.66	0.68	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,46	0,47
E_{U₀}	0,24	0,27	0,3	0,33	0,36	0,38	0,41	0,44	0,47
U₁	0,42	0,47	0,5	0,52	0,54	0,58	0,6	0,61	0,63
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.64	0.66	0.68	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,28	0,3	0,33	0,35	0,38	0,39	0,42	0,44	0,46
E_{U₀}	0,21	0,24	0,27	0,3	0,32	0,35	0,37	0,4	0,42
U₁	0,37	0,42	0,46	0,48	0,51	0,53	0,55	0,58	0,6
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.64	0.66	0.68	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,26	0,29	0,31	0,34	0,36	0,38	0,4	0,43	0,44
E_{U₀}	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37
U₁	0,31	0,35	0,4	0,44	0,48	0,5	0,52	0,55	0,56
TI%	8.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.64	0.66	0.68	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,25	0,27	0,3	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43
E_{U₀}	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29	0,31	0,33	0,35
U₁	0,27	0,31	0,35	0,39	0,42	0,46	0,49	0,51	0,53
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.64	0.66	0.68	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75

Πίνακας Α-3: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «30-70»

30% Oval + 70% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5	0,52
E_{U₀}	0,32	0,35	0,39	0,42	0,45	0,49	0,51	0,54	0,57
U₁	0,6	0,62	0,64	0,68	0,7	0,71	0,71	0,71	0,72
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.65	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	0.77
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,32	0,36	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,5
E_{U₀}	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,47	0,5	0,52
U₁	0,54	0,58	0,61	0,63	0,66	0,69	0,69	0,7	0,71
TI%	8.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.65	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	0.77
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,31	0,34	0,38	0,4	0,43	0,44	0,46	0,48	0,5
E_{U₀}	0,26	0,29	0,32	0,36	0,39	0,41	0,44	0,46	0,49
U₁	0,47	0,52	0,57	0,61	0,63	0,65	0,67	0,68	0,69
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.65	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	0.77
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48	0,49
E_{U₀}	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,37	0,4	0,42	0,44
U₁	0,39	0,44	0,5	0,55	0,59	0,63	0,65	0,67	0,68
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.65	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	0.77
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,28	0,31	0,34	0,37	0,4	0,43	0,45	0,47	0,49
E_{U₀}	0,2	0,23	0,26	0,3	0,32	0,35	0,38	0,4	0,42
U₁	0,33	0,38	0,42	0,48	0,52	0,57	0,61	0,64	0,66
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.65	0.67	0.69	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	0.77

Πίνακας Α-4: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «40-60»

40% Oval + 60% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U ₀	0,37	0,4	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,52	0,54
E _{U₀}	0,36	0,4	0,44	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59	0,61
U ₁	0,72	0,74	0,76	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,76
TI%	8.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.66	0.68	0.70	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U ₀	0,36	0,4	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,52	0,53
E _{U₀}	0,33	0,37	0,41	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,58
U ₁	0,64	0,7	0,74	0,76	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.66	0.68	0.70	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U ₀	0,35	0,38	0,42	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,54
E _{U₀}	0,3	0,34	0,38	0,42	0,45	0,48	0,5	0,53	0,55
U ₁	0,55	0,61	0,67	0,73	0,77	0,78	0,78	0,78	0,78
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.66	0.68	0.70	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U ₀	0,34	0,37	0,4	0,44	0,46	0,49	0,51	0,52	0,54
E _{U₀}	0,27	0,31	0,35	0,39	0,42	0,44	0,47	0,49	0,51
U ₁	0,48	0,54	0,59	0,65	0,7	0,74	0,78	0,77	0,78
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.66	0.68	0.70	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U ₀	0,31	0,35	0,38	0,42	0,45	0,48	0,5	0,52	0,54
E _{U₀}	0,24	0,28	0,31	0,35	0,39	0,42	0,45	0,47	0,49
U ₁	0,4	0,46	0,52	0,58	0,63	0,67	0,71	0,74	0,76
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.66	0.68	0.70	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78

Πίνακας Α-5: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «50-50»

50% Oval +50% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,4	0,43	0,46	0,48	0,5	0,52	0,53	0,54	0,55
E_{U_0}	0,41	0,46	0,5	0,53	0,57	0,6	0,62	0,64	0,66
U_1	0,73	0,78	0,8	0,8	0,81	0,81	0,79	0,78	0,78
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,39	0,43	0,46	0,48	0,5	0,52	0,54	0,55	0,56
E_{U_0}	0,38	0,43	0,47	0,51	0,54	0,57	0,6	0,62	0,64
U_1	0,66	0,69	0,75	0,78	0,79	0,8	0,81	0,81	0,8
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,38	0,42	0,46	0,48	0,51	0,53	0,55	0,56	0,57
E_{U_0}	0,35	0,39	0,44	0,48	0,52	0,55	0,57	0,59	0,62
U_1	0,57	0,62	0,67	0,71	0,77	0,78	0,79	0,8	0,81
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,37	0,4	0,44	0,47	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58
E_{U_0}	0,31	0,36	0,41	0,45	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59
U_1	0,5	0,55	0,59	0,62	0,66	0,73	0,77	0,78	0,79
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,34	0,38	0,42	0,45	0,48	0,5	0,52	0,54	0,57
E_{U_0}	0,27	0,32	0,37	0,41	0,45	0,49	0,52	0,55	0,57
U_1	0,44	0,5	0,54	0,57	0,61	0,65	0,68	0,74	0,77
TI%	9.00	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79

Πίνακας Α-6: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «60-40»

60% Oval +40% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,42	0,46	0,48	0,5	0,51	0,53	0,54	0,55	0,56
E_{U₀}	0,46	0,51	0,55	0,59	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71
U₁	0,66	0,68	0,71	0,71	0,73	0,74	0,76	0,77	0,76
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81
27.50									
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,42	0,46	0,48	0,49	0,52	0,53	0,55	0,56	0,57
E_{U₀}	0,43	0,48	0,53	0,57	0,61	0,63	0,66	0,68	0,7
U₁	0,6	0,62	0,66	0,68	0,7	0,71	0,73	0,74	0,75
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81
30.00									
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,41	0,45	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,56	0,58
E_{U₀}	0,39	0,45	0,5	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,68
U₁	0,52	0,57	0,6	0,63	0,66	0,69	0,7	0,71	0,73
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.81
32.50									
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,39	0,43	0,47	0,48	0,5	0,52	0,54	0,55	0,57
E_{U₀}	0,35	0,41	0,47	0,52	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66
U₁	0,46	0,51	0,55	0,57	0,61	0,66	0,66	0,67	0,69
TI%	9.00	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81
35.00									
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,37	0,41	0,44	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57
E_{U₀}	0,31	0,37	0,42	0,48	0,52	0,56	0,6	0,62	0,65
U₁	0,4	0,45	0,49	0,52	0,56	0,59	0,62	0,65	0,66
TI%	10.00	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.80	0.81

Πίνακας Α-7: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «70-30»

70% Oval + 30% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,45	0,47	0,49	0,5	0,52	0,53	0,53	0,54	0,55
E_{U₀}	0,55	0,6	0,64	0,67	0,7	0,72	0,73	0,74	0,75
U₁	0,6	0,61	0,66	0,68	0,71	0,75	0,76	0,77	0,77
TI%	8.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,44	0,46	0,48	0,49	0,51	0,53	0,54	0,55	0,56
E_{U₀}	0,53	0,58	0,62	0,66	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75
U₁	0,53	0,57	0,6	0,62	0,67	0,68	0,71	0,75	0,75
TI%	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00	4.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,43	0,44	0,47	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55	0,56
E_{U₀}	0,5	0,55	0,6	0,64	0,68	0,7	0,72	0,74	0,75
U₁	0,46	0,5	0,56	0,59	0,6	0,63	0,67	0,69	0,71
TI%	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,41	0,44	0,46	0,48	0,5	0,51	0,53	0,54	0,56
E_{U₀}	0,46	0,52	0,57	0,61	0,65	0,68	0,71	0,73	0,75
U₁	0,42	0,46	0,5	0,52	0,56	0,6	0,61	0,63	0,66
TI%	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,4	0,42	0,44	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55
E_{U₀}	0,42	0,48	0,53	0,58	0,62	0,66	0,69	0,71	0,73
U₁	0,36	0,41	0,45	0,47	0,51	0,56	0,58	0,59	0,61
TI%	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83

Πίνακας Α-8: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «80-20»

80% Oval +20% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,54	0,56	0,57
E_{U₀}	0,56	0,62	0,67	0,72	0,75	0,77	0,78	0,8	0,81
U₁	0,47	0,49	0,53	0,55	0,59	0,64	0,66	0,7	0,72
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.80	0.81	0.83	0.84
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,43	0,44	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57
E_{U₀}	0,53	0,6	0,66	0,71	0,74	0,77	0,79	0,8	0,81
U₁	0,47	0,46	0,47	0,5	0,53	0,55	0,59	0,63	0,65
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.70	0.73	0.75	0.77	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,43	0,44	0,45	0,47	0,48	0,5	0,52	0,54	0,55
E_{U₀}	0,49	0,56	0,62	0,68	0,73	0,75	0,77	0,78	0,8
U₁	0,4	0,44	0,46	0,46	0,47	0,51	0,53	0,56	0,59
TI%	9.00	8.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.84
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,43	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,53
E_{U₀}	0,45	0,52	0,58	0,65	0,7	0,73	0,76	0,77	0,78
U₁	0,36	0,4	0,42	0,44	0,45	0,47	0,48	0,5	0,53
TI%	10.00	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.84
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U₀	0,42	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49	0,5	0,51	0,52
E_{U₀}	0,39	0,46	0,53	0,6	0,65	0,7	0,74	0,75	0,77
U₁	0,33	0,37	0,39	0,41	0,44	0,45	0,45	0,46	0,49
TI%	10.00	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.80	0.81	0.83	0.84

Πίνακας Α-9: Υπολογισμοί φωτομετρικών μεγεθών για το συνδυασμό «90-10»

90% Oval + 10% Oslon									
Distance	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,4	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,54	0,55	0,57
E_{U_0}	0,62	0,68	0,72	0,73	0,75	0,77	0,79	0,81	0,84
U_1	0,39	0,42	0,46	0,49	0,53	0,58	0,62	0,66	0,69
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85
Distance	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50	27.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,39	0,41	0,42	0,45	0,46	0,49	0,51	0,53	0,56
E_{U_0}	0,58	0,66	0,72	0,74	0,75	0,76	0,78	0,8	0,82
U_1	0,38	0,38	0,4	0,43	0,46	0,49	0,53	0,57	0,61
TI%	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.85
Distance	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,39	0,4	0,41	0,43	0,45	0,47	0,48	0,5	0,53
E_{U_0}	0,54	0,62	0,69	0,74	0,75	0,76	0,78	0,79	0,8
U_1	0,35	0,37	0,37	0,38	0,4	0,44	0,46	0,49	0,53
TI%	10.00	9.00	8.00	7.00	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85
Distance	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50	32.50
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,4	0,41	0,41	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,5
E_{U_0}	0,49	0,57	0,64	0,71	0,75	0,77	0,77	0,77	0,79
U_1	0,32	0,35	0,35	0,36	0,37	0,4	0,41	0,43	0,46
TI%	10.00	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85
Distance	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00
Height	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00
U_0	0,41	0,41	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,48
E_{U_0}	0,43	0,51	0,59	0,67	0,72	0,76	0,77	0,77	0,77
U_1	0,29	0,32	0,34	0,34	0,36	0,36	0,37	0,39	0,42
TI%	10.00	9.00	8.00	7.00	7.00	6.00	6.00	5.00	5.00
SR	0.71	0.74	0.76	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.85

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΚΥΚΛΩΜΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

ΠΙΝΑΚΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Στη συνέχεια παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί πίνακες των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή του κυκλώματος οδήγησης των LEDs.

Πίνακας Β-1: Λίστα αντιστάσεων

Part	Quantity	Resistance	Tolerance	Power	Footprint
Rchs	1	12.4kOhm	1%	0.125W	805
Rcs	1	0.039Ohm	1%	0.33W	1210
Rdim	1	12.7kOhm	1%	0.125W	805
Rhsn	1	1000Ohm	1%	0.125W	805
Rhsp	1	1000Ohm	1%	0.125W	805
Rivp1	1	1.62kOhm	1%	0.125W	805
Rivp2	1	10kOhm	1%	0.125W	805
Rovp1	1	14.3kOhm	1%	0.125W	805
Rovp2	1	511kOhm	1%	0.125W	805
Rr	1	10Ohm	1%	0.125W	805
Rsense	1	0.09Ohm	1%	0.25W	805
Rt	1	162kOhm	1%	0.125W	805
R_SEN	3	10Ohm	1%	0.125W	805
R_EQ	1	51.1Ohm	1%	0.125W	805
R_PD	1	100kOhm	1%	0.125W	805

Πίνακας Β-2: Λίστα πυκνωτών

Part	Quantity	Capacitance	ESR	V_DC	Footprint
Cbyp	1	2.2uF	0Ohm	16V	805
Ccomp	1	680nF	0Ohm	16V	805
Cext	1	100nF	0.064Ohm	50V	805
Chspn	1	100nF	0Ohm	25V	805
Cin1	1	100uF	0.3Ohm	35V	UD-8X10_NICHICON
Cinx	1	100nF	0Ohm	50V	603
Cout	4	10uF	3mOhm	50V	2220
Covp	1	47pF	0Ohm	50V	805
Ct	1	1.5nF	0Ohm	50V	805
C_EQ	1	1uF	0Ohm	50V	805
C_IN	1	10nF	0Ohm	50V	805
C_LED	3	1uF	0Ohm	50V	805

Πίνακας Β-3: Λίστα ολοκληρωμένων και λοιπών στοιχείων

Part	Quantity	Attribute1	Attribute2	Attribute3	Footprint
D1	1	Vf=0.56V	Io=15A	Vrrm=60V	DDPAK
L1	1	L=68uH	DCR=0.027Ohm	I _{dc} =6A	RKE6
M1	1	60V	V _{dsmax} =60V	I _{dsmax} =10A	DPAK
U\$1 NMOS	1	IRF520	-	-	SOT-23
U1	3	LM3466	-	-	MRA08A
U4	1	LM3429	-	-	MXA14A

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Στη συνέχεια παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κυκλώματος οδήγησης των LEDs, όπως αυτά προκύπτουν από την αντίστοιχη προσομοίωση.

ΠίνακαςΠ Β-4: Λειτουργικά χαρακτηριστικά κυκλώματος οδήγησης LED

Operating Values

#	Name	Value	Category	Description
1.	Cin IRMS	300.475 m A	Current	Input capacitor RMS ripple current
2.	Cout IRMS	1.593 A	Current	Output capacitor RMS ripple current
3.	Iin Avg	3.636 A	Current	Average input current
4.	L Ipp	1.041 A	Current	Peak-to-peak inductor ripple current
5.	L1 Irms	3.51 A	Current	Inductor ripple current
6.	LED Iavg	350.0 m A	Current	LED Average Current
7.	LED Ipp	5.531 m A	Current	LED Ripple Current
8.	M Irms	3.727 A	Current	MOSFET RMS ripple current
9.	SW Ipk	4.017 A	Current	Peak switch current
10.	BOM Count	58.0	General	Total Design BOM count
11.	FootPrint	7.261 k mm2	General	Total Foot Print Area of BOM components
12.	Frequency	98.765 k Hz	General	Switching frequency
13.	IC Tolerance	25.0 m V	General	IC Feedback Tolerance
14.	M Rdson	13.5 m Ohm	General	Drain-Source On-resistance
15.	M Vds Act	50.31 m V	General	M Vds
16.	Mode	CCM	General	Conduction Mode
17.	Pout	34.259 W	General	Total output power
18.	Total BOM	\$0.0	General	Total BOM Cost
19.	D1 Tj	30.0 degC	Op_Point	D1 junction temperature
20.	Vout OP	32.627 V	Op_Point	Operational Output Voltage
21.	Duty Cycle	71.12 %	Op_point	Duty cycle
22.	Efficiency	94.21 %	Op_point	Steady state efficiency
23.	IC Tj	33.592 degC	Op_point	IC junction temperature
24.	ICThetaJA	37.0 degC/W	Op_point	IC junction-to-ambient thermal resistance
25.	IOUT_OP	1.05 A	Op_point	Iout operating point
26.	LED Rd	760.0 m Ohm	Op_point	LED DynamicResistance
27.	LED Vf	32.627 V	Op_point	Total LED Forward Calculated Voltage
28.	M ThetaJA	50.0 degC/W	Op_point	MOSFET junction-to-ambient thermal resistance
29.	M TjOp	51.471 degC	Op_point	MOSFET junction temperature
30.	VIN_OP	10.0 V	Op_point	Vin operating point
31.	Cin Pd	27.086 m W	Power	Input capacitor power dissipation
32.	Cout Pd	1.903 m W	Power	Output capacitor power dissipation
33.	Diode Pd	588.0 m W	Power	Diode power dissipation
34.	IC Pd	97.09 m W	Power	IC power dissipation
35.	L Pd	399.144 m W	Power	Inductor power dissipation
36.	LED Pd	34.259 W	Power	LED Power Dissipation
37.	M Pd	429.423 m W	Power	MOSFET power dissipation
38.	M1 PdCond	230.505 m W	Power	M1 MOSFET conduction losses
39.	M1 PdSw	198.918 m W	Power	M1 MOSFET switching losses
40.	Total Pd	2.105 W	Power	Total Power Dissipation
41.	Total LED load Rd	2.533 Ohm	Unknown	Total LED Load DynamicResistance

Design Inputs

#	Name	Value	Description
1.	Iout	1.05 A	Maximum Output Current
2.	Iout1	1.05 Amps	Output Current #1
3.	VinMax	13.0 V	Maximum input voltage
4.	VinMin	10.0 V	Minimum input voltage
5.	Vout	32.0 V	Output Voltage
6.	Vout1	32.0 Volt	Output Voltage #1
7.	application	LED_DRIVER	LED Application
8.	base_pn	LM3429	National Based Product Number
9.	LED_Architect	N	LED Architect Project
10.	ledparallel	3.0	Number of LED in parallel
11.	ledpartnumber	LCW	LED Part number
		W5PMJYKY5R8T	
12.	ledseries	10.0	Number of LED in series
13.	line_fsw	60.0	AC Line Frequency
14.	source	DC	Input Source Type
15.	Ta	30.0 degC	Ambient temperature