



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Φωτισμός Δρόμων με Φωτοβολταϊκό Σύστημα

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΠΑΚΑΡΑ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΑΜ: 2007260

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :

Επικ. καθηγητής ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ Ευστάθιος

ΜΑΡΤΙΟΣ 2011

Περίληψη

Ο σκοπός της πτυχιακής είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος οδικού φωτισμού το οποίο κάνει χρήση της ηλιακής ενέργειας. Το σύστημα αυτό υλοποιείται σε ένα μονό ιστό φωτισμού και αποτελεί μια ολοκληρωμένη και ανεξάρτητη μονάδα. Πρώτο βήμα είναι η καταγραφή μετεωρολογικών δεδομένων όπου θα υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή της Σπάρτης. Με κατάλληλη μεθοδολογία υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια με παράμετρο την γωνία κλίσης της επιφάνειας αυτής, προς το οριζόντιο επίπεδο. Με βάση το δεδομένο αυτό γίνεται, στη συνέχεια, η επιλογή του κατάλληλου φωτοβολταϊκού πάνελ. Άλλα σημαντικά τμήματα του συστήματος είναι ο φορτιστής, ο συσσωρευτής, η μονάδα ελέγχου και ο inverter των οποίων τα ακριβή χαρακτηριστικά αναλύονται στη συνέχεια. Η ισχύς εξόδου του συστήματος καθορίζεται ύστερα από υπολογισμούς με χρήση των αποδόσεων των επιμέρους τμημάτων και συσκευών του συστήματος, με αποτέλεσμα την κατάλληλη επιλογή φωτιστικού. Σύμφωνα με αναλυτικές μελέτες φωτισμού καθορίζεται η δυνατότητα του συστήματος να φωτίσει διάφορους τύπους δρόμων μέσα στα όρια που θεσπίζουν οι διεθνείς προδιαγραφές. Βάση της συνολικής απόδοσης αναλύεται το ποσοστό της αυτονομίας του συστήματος και επιπλέον η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την χρήση του.

Λέξεις Κλειδιά

Φωτοβολταϊκά, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, φωτισμός εξωτερικών χώρων, φωτισμός δρόμων, εξοικονόμηση ενέργειας.

Abstract

The aim of this thesis is to study a road lighting system which makes use of solar energy. This system is materialised in a stand alone lighting pole and it's a completed and independent unit. First step is the recording of meteorological data in order to calculate the solar radiation in the region of Sparta. With suitable methodology is calculated the solar radiation in a tilted surface with parameter the tiltangle of this surface. According to this calculation, the suitable solar panel is selected. Other important elements of system are the charger, the battery, the control unit and inverter. The precise characteristics of these elements are further analyzed. The power potential of system is determined after calculations according to energy losses of all electric parts of the system. A suitable lighting system is also selected. According to analytic lighting calculations is determined the possibility of system to illuminate various types of roads in order to meet the international lighting standards. The total output is analyzed in order to determine the percentage of autonomy of system and moreover the energy savings that can be achieved.

KeyWords

Photovoltaics, renewable energy sources, outdoor lighting, street lighting, energy saving.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

➤ 1 Εισαγωγή

➤ 2 Φωτοβολταϊκά

2.1 Εισαγωγή

2.2 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια

2.3 Οι πρώτες φωτοβολταϊκές εφαρμογές

2.4 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

2.5 Μειονεκτήματα- Πλεονεκτήματα

2.6 Το παρόν και το μέλλον της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας

➤ 3 Φωτισμός δρόμων

3.1 Γενικά

3.2 Επίπεδα φωτισμού για αστικές περιοχές

3.3 Ικανότητα διάκρισης αντικειμένων - θάμβωση

3.4 Προτάσεις σχεδιασμού εγκατάστασης φωτισμού

3.4.1 Γενικές αρχές φωτισμού δρόμου

3.4.2 Αξιολόγηση δρόμου

3.4.3 Έλεγχος της θάμβωσης

3.4.4 Λόγος φωτεινότητας περιβάλλοντος χώρου (SR)

3.4.5 Επιφάνεια δρόμου

3.4.6 Διακλαδώσεις δρόμου

3.4.7 Τύποι ιστών φωτισμού

3.5 Διάχυση φωτός φωτιστικών δρόμων

3.6 Προδιαγραφές φωτισμού δρόμων

3.7 Φωτορύπανση και κατάχρηση φωτός

➤ 4 Λαμπτήρες

4.1 Γενικά

4.2 Λαμπτήρες για φωτισμό δρόμων

4.3 Σύγκριση φωτεινών πηγών

➤ 5 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων Ηλιακής Ακτινοβολίας

5.1 Αναζήτηση μετρήσεων

5.2 Επιλογή Χρονοσειράς

5.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

5.4 Μετασχηματισμός τιμών για κεκλιμένο επίπεδο

➤ 6 Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα Φωτισμού

6.1 Εισαγωγή

6.2 Φωτοβολταϊκό Σύστημα

6.2.1 Φωτοβολταϊκό Πάνελ

6.2.2 Συσσωρευτής

6.2.3 Αντιστροφέας (inverter)

6.3 Απόδοση Φωτοβολταϊκού συστήματος

- 6.3.1 Συντελεστής απόδοσης στοιχείων
- 6.3.2 Απόδοση φωτοβολταϊκού πάνελ
- 6.3.3 Απόδοση ισχύος συστήματος
- 6.3.4 Παρατηρήσεις
- 6.4 Σύστημα Φωτισμού
- 6.4.1 Εισαγωγή
- 6.4.2 Επιλογή λαμπτήρα και φωτιστικού σώματος
- 6.4.3 Ικανότητα φωτισμού
- 6.5 Μονάδα Ελέγχου
- 6.5.1 Γενικά
- 6.5.2 Λειτουργίες της μονάδας ελέγχου
- 6.5.3 Παρατηρήσεις

➤ 7 Η αυτονομία του συστήματος

- 7.1 Έλεγχος αυτονομίας
- 7.2 Επιλογή βέλτιστης κλίσης φωτοβολταϊκού πάνελ
- 7.3 Εξοικονόμηση Ενέργειας

➤ 8 Συμπεράσματα – Προτάσεις

➤ 9 Βιβλιογραφία 98

➤ 10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 100

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ - Εικόνες

Εικόνα 3-1 Συνήθεις τύποι ιστών φωτισμού δρόμων.....	
Εικόνα 3-2 Φωτιστικό τύπου Non-cutoff	
Εικόνα 3-3 Φωτιστικό τύπου semi-cutoff	
Εικόνα 3-4 Φωτιστικό τύπου full-cutoff	
Εικόνα 3-5 Φωτιστικό τύπου cutoff	
Εικόνα 4-1 Λαμπτήρας Πυράκτωσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του	
Εικόνα 4-2 Λαμπτήρας ατμών υδραργύρου και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του.....	
Εικόνα 4-3 Λαμπτήρας ατμών υδραργύρου φωσφορούχου επίστρωσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του	
Εικόνα 4-4 Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του.....	
Εικόνα 4-5 Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής	
Εικόνα 4-6 Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής	
Εικόνα 6-1 Ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα φωτισμού	
Εικόνα 6-2 Επιλεγμένο φωτοβολταϊκό πάνελ	
Εικόνα 6-3 Ο επιλεγμένος συσσωρευτής	
Εικόνα 6-4 Ο επιλεγμένος inverter.....	
Εικόνα 6-5 Ο επιλεγμένος λαμπτήρας για το σύστημα φωτισμού	

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ – Διαγράμματα

Διάγραμμα 5-1 Ετήσια ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε	
--	--

οριζόντιο επίπεδο (μετρήσεις από πυρανόμετρο).....	
Διάγραμμα 5-2 Ετήσια μετρούμενη ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο	
Διάγραμμα 5-3 Υπολογιζόμενη ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσκύπτει σε κεκλιμένο επίπεδο (υπολογισμοί για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ, από 0 έως 90 μοίρες).....	
Διάγραμμα 6-1 Ετήσια απολαβή φωτοβολταϊκού πάνελ τοποθετημένο σε οριζόντιο επίπεδο	
Διάγραμμα 6-2 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ για διάφορες γωνίες στήριξής του	
Διάγραμμα 6-3 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος για διάφορες γωνίες στήριξης του φωτοβολταϊκού πάνελ.....	
Διάγραμμα 6-4 Ετήσια χρονική διάρκεια ημέρας και νύχτας.....	
Διάγραμμα 6-5 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος για κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ 0°.....	
Διάγραμμα 6-6 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ....	
Διάγραμμα 6-7 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m ²)....	
Διάγραμμα 6-8 Κατανομή της έντασης φωτισμού στο επίπεδο του δρόμου (lux)	
Διάγραμμα 6-9 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m ²)....	
Διάγραμμα 6-10 Κατανομή της έντασης φωτισμού στο επίπεδο του δρόμου (lux)....	
Διάγραμμα 6-11 Κάτοψη της υπό μελέτης διασταύρωσης	
Διάγραμμα 6-12 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m ²) με τη χρήση ενός φωτιστικού	
Διάγραμμα 6-13 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m ²) με τη χρήση δύο φωτιστικών.....	
Διάγραμμα 6-14 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m ²) με τη χρήση τεσσάρων φωτιστικών.....	
Διάγραμμα 7-1 Ημέρες αυτονομίας του συστήματος για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ.....	
Διάγραμμα 7-2 Ετήσιο ισοζύγιο ενέργειας	

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ – Πίνακες

Πίνακας 3-1 Επίπεδα φωτισμού αστικών περιοχών κατά CIE.....	
Πίνακας 3-2 Προδιαγραφές για τα επίπεδα φωτισμού P1 έως P7.....	
Πίνακας 4-1 Φωτεινή απόδοση κοινών τύπων λαμπτήρων.....	
Πίνακας 4-2 Χαρακτηριστικά λαμπτήρων φωτισμού δρόμων	
Πίνακας 4-3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας διαφόρων λαμπτήρων.....	
Πίνακας 6-1 Χαρακτηριστικά επιλεγμένου φωτοβολταϊκού πάνελ	
Πίνακας 6-2 Χαρακτηριστικά επιλεγμένου συσσωρευτή.....	
Πίνακας 6-3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου λαμπτήρα	
Πίνακας 6-4 Χαρακτηριστικά του επιλεγμένου φωτιστικού σώματος.....	
Πίνακας 6-5 Προδιαγραφές φωτισμού δρόμου κατά την CIE.....	
Πίνακας 6-6 Χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δρόμου	
Πίνακας 6-7 Συνδυασμοί φωτιστικών σωμάτων	
Πίνακας 6-8 Αποτελέσματα εξομοίωσης φωτισμού για τις απαιτήσεις της κλάσης CIE-M5	
Πίνακας 6-9 Αποτελέσματα εξομοίωσης φωτισμού για τις απαιτήσεις της κλάσης CIE-M4	

1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας των πολλών επιπλέον χρήσεων που έχουν δημιουργηθεί με την ραγδαία πρόοδο της τεχνολογίας, αλλά και του υπερκαταναλωτισμού της εποχής μας. Οι φυσικοί πόροι, όμως, που μέχρι τώρα χρησιμοποιούνταν για να εξυπηρετήσουν τις καθημερινές ανάγκες της ανθρωπότητας πλέον δεν επαρκούν και για το λόγο αυτό η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί στην εύρεση λύσεων ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ενέργεια. Η παγκόσμια, λοιπόν, ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας απαιτεί την χρήση των ανανεώσιμων πηγών σε πολλές εφαρμογές. Η ενέργεια που λαμβάνεται από την ακτινοβολία του ηλίου, ο οποίος αποτελεί μια αστείρευτη πηγή ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την δημιουργία κατάλληλων συστημάτων για ποικίλες χρήσεις καθώς και για φωτισμό δρόμου. Η χαμηλή απόδοση των φωτοβολταϊκών περιορίζει τις χρήσεις των συστημάτων αυτών σε περιπτώσεις χαμηλής απαίτησης ισχύος. Κύριος σκοπός αυτής της έρευνας είναι η ανάπτυξη ενός ημιαυτόνομου ή πλήρως αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για το φωτισμό οδών χαμηλής κυκλοφορίας, αλλά και για παρόμοιες εφαρμογές, όπως φωτισμό πλατειών, πάρκων κλπ.

Για τη διεξαγωγή μιας μελέτης φωτισμού δρόμου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι παράμετροι που αφορούν κυρίως τις συνθήκες τη νύχτα που είναι ιδιαίτερες, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι επιτυχές, δηλαδή να παρέχεται τόσο στους οδηγούς των αυτοκινήτων όσο και στους πεζούς ασφάλεια και λειτουργικότητα του δρόμου και του περιβάλλοντος σε αυτόν χώρο. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φωτισμό δρόμων ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμο το δίκτυο παροχής ενέργειας. Εξαιτίας του χαμηλού κόστους συντήρησης και της εξοικονόμησης της ενέργειας που επιτυγχάνεται, τα συστήματα φωτισμού με την χρήση των φωτοβολταϊκών μπορούν να αποτελέσουν και οικονομικά συμφέρουσα πρόταση για τον οδικό φωτισμό. Πολλές εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί, ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία ανά τον κόσμο [01],[02], [03],[04], [05],[06], ενώ σε χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Βρετανία και η Ιταλία φωτοβολταϊκά συστήματα για φωτισμό δρόμων έχουν πραγματοποιηθεί με κύριο σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

Αρκετές προσπάθειες έχουν γίνει και στην Ελλάδα για τη χρήση, την εξέλιξη και κυρίως για την εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας, ακόμα όμως τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά. Οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές έχουν περιορισθεί σε απομονωμένες περιοχές όπου δεν είναι εύκολη η πρόσβαση από το

δίκτυο, αλλά ούτε και οικονομικά συμφέρουσα, όπως σε φάρους ή ακόμα και σε κτίρια όπου εκτός από την παροχή του δικτύου κρίνεται απαραίτητη και συμφέρουσα η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η μεγάλη ανάγκη για φθηνή και καθαρή ενέργεια, ιδιαίτερα στην Ελλάδα που διαθέτει πλούσιο ηλιακό δυναμικό, το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε εύρος εφαρμογών, έχει οδηγήσει στην έρευνα αλλά και στην πραγματοποίηση συστημάτων φωτισμού δρόμου με χρήση φωτοβολταϊκών, τα οποία όμως βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο.

Στη συγκεκριμένη μελέτη αναπτύσσεται ένα σύστημα οδικού φωτισμού το οποίο κάνει χρήση της ηλιακής ενέργειας. Το σύστημα αυτό υλοποιείται σε ένα μονό ιστό φωτισμού και αποτελεί μια ολοκληρωμένη και ανεξάρτητη μονάδα. Πρώτο βήμα είναι η καταγραφή μετεωρολογικών δεδομένων από τα υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή της Σπάρτης. Με κατάλληλη μεθοδολογία υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια με παράμετρο την γωνία κλίσης της επιφάνειας αυτής προς το οριζόντιο επίπεδο. Με βάση το δεδομένο αυτό γίνεται, στη συνέχεια, η επιλογή του κατάλληλου φωτοβολταϊκού πάνελ. Άλλα σημαντικά τμήματα του συστήματος είναι ο φορτιστής, ο συσσωρευτής, η μονάδα ελέγχου και ο inverter των οποίων τα ακριβή χαρακτηριστικά αναλύονται στη συνέχεια. Η ισχύς εξόδου του συστήματος καθορίζεται ύστερα από υπολογισμούς με χρήση των αποδόσεων των επιμέρους τμημάτων και συσκευών του συστήματος, με αποτέλεσμα την κατάλληλη επιλογή φωτιστικού. Σύμφωνα με αναλυτικές μελέτες φωτισμού καθορίζεται η δυνατότητα του συστήματος να φωτίσει διάφορους τύπους δρόμων μέσα στα όρια που θεσπίζουν οι διεθνείς προδιαγραφές. Βάση της συνολικής απόδοσης αναλύεται το ποσοστό της αυτονομίας του συστήματος και επιπλέον η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την χρήση του.

2 Φωτοβολταϊκά

2.1 Εισαγωγή

Είναι πολλές εκείνες οι εφαρμογές όπου απαιτείται η χρήση ενέργειας χωρίς όμως να είναι εύκολη η εξασφάλιση αυτής, όπως συμβαίνει σε συστήματα διαστημικών σταθμών. Η αδυναμία να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας εκτός της ηλιακής στις διαστημικές εφαρμογές λόγω της εξ' ορισμού δυσκολίας που προσφέρει το διαστημικό περιβάλλον, αποτέλεσε την αφορμή για την έρευνα και ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, της τεχνολογίας δηλαδή που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική.

Οι πρώτες εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα ξεκίνησαν την δεκαετία του '70. Η χρήση ηλεκτρικών θερμαντήρων σε όλα σχεδόν τα ελληνικά νοικοκυριά, σε συνδυασμό με την κρίση του πετρελαίου, με την ταυτόχρονη αύξηση της τιμής του ηλεκτρισμού κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αποτέλεσε πρόσφορο έδαφος για την εμπορική ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Οι διαφημιστικές εκστρατείες πολλών μεγάλων εταιριών βοήθησαν, επίσης, πολύ κατά την αρχική φάση αυτής της εξέλιξης. Μέχρι το 1987 υπήρξε σταθερή ανάπτυξη των εμπορικών δραστηριοτήτων, ενώ την περίοδο 1984-1986 μια μεγάλη διαφημιστική εκστρατεία που

υποστηρίχτηκε από την ελληνική κυβέρνηση, σε συνδυασμό με οικονομικά κίνητρα, ώθησαν τις πωλήσεις των φωτοβολταϊκών συλλεκτών στα 218000m². Εκτιμήθηκε πως ο αριθμός των κατασκευαστών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε αυτή την περίοδο έφτανε τους 300 [07].

Από το 1987 η σταθεροποίηση του βαθμού ανάπτυξης της αγοράς των φωτοβολταϊκών πραγματοποιήθηκε κυρίως γιατί:

- ↓ Οι οικονομικοί περιορισμοί επιβράδυναν τον ρυθμό κατασκευής νέων κτιρίων.
- ↓ Η τιμή του πετρελαίου άρχισε να μειώνεται με την λήξη της κρίσης πετρελαίου.
- ↓ Το κόστος του ηλεκτρισμού παρέμεινε χαμηλό έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση της ανταγωνιστικότητας στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στην προσπάθεια να υποστηριχτούν εφαρμογές κεντρικών φωτοβολταϊκών συστημάτων στον βιομηχανικό τομέα, όπου ακόμα είναι περιορισμένες, μέσω ειδικού προγράμματος για την ενέργεια υποστηρίχθηκε ένας αξιοσημείωτος αριθμός φωτοβολταϊκών συστημάτων για ξενοδοχεία και τη βιομηχανία με επιχορήγηση έως και 50% του βασικού κόστους. Σήμερα, 45 κατασκευαστές φωτοβολταϊκών συλλεκτών είναι ενεργοί, παράγοντας πάνω από 300000m² συλλεκτών ετησίως.

2.2 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια, με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Ανάλογα με τον βαθμό πολυπλοκότητας στην κατασκευή και την λειτουργία, οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες μπορούν να καταταγούν σε 3 κυρίως κατηγορίες:

- ↓ Τις απλές διατάξεις, όπου τα ηλιακά κύτταρα είναι τοποθετημένα σε σταθερά επίπεδα πλαίσια και δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με την φυσική της πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας.
- ↓ Τις διατάξεις με κινητά πλαίσια που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά κύτταρα να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα ηλιακό κύτταρο μέχρι 50% περίπου, αφού δέχεται πυκνότερη ακτινοβολία ανά μονάδα εμβαδού της επιφάνειάς του.
- ↓ Τις διατάξεις που με την χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν πολύ συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά κύτταρα. Για την αποφυγή θέρμανσης, στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνητή ψύξη των ηλιακών κυττάρων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών υγρών.

2.3 Οι πρώτες φωτοβολταϊκές εφαρμογές

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία, τα οποία ονομάζονται επίσης φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι μια πολύ πρόσφατη τεχνολογική ανακάλυψη που βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης της. Παρόλα αυτά ως φαινόμενο είναι γνωστό από τον περασμένο, κίονα, αιώνα. Οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής είναι οι ακόλουθοι:

- 1839 Παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες.
- 1937 Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από PbS
- 1939 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Se, με απόδοση 1%
- 1941 Κατασκευή του πρώτου ηλιακού στοιχείου από Si
- 1952 Ανακάλυψη της μεθόδου της τηγμένης ζώνης για την κατασκευή στερεών πολύ μεγάλης καθαρότητας.
- 1953 Ανακάλυψη της μεθόδου σχηματισμού ενώσεων p- n με διάχυση προσμίξεων
- 1954 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Si με σχηματισμό ένωσης p- n με διάχυση προσμίξεων και με απόδοση 6%.
- 1956 Εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων
- 1958 Εκτόξευση του αμερικανικού τεχνητού δορυφόρου Vanguard I, εξοπλισμένου με 6 μικρά στοιχεία Si ισχύος 5 mW βοηθητική ενεργειακή πηγή.
- 1958 Εκτόξευση σοβιετικού τεχνητού δορυφόρου με αποκλειστική τροφοδοσία από ηλιακά στοιχεία.
- 1959 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από CdS, με απόδοση 5%
- 1972 Κατασκευή του «ιώδους» ηλιακού στοιχείου Si , με απόδοση 14%.
- 1976 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από άμορφο Si , με απόδοση 0,01%.
- 1977 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs, με απόδοση 16%
- 1981 Πτήση πάνω από τη Μάγχη του αεροπλάνου Solar Challenger, εξοπλισμένου με 16128 ηλιακά στοιχεία Si, ισχύος 2,7 kW.
- 1983 Έναρξη εμπορικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού της Βικτροβίλ, ισχύος 1 MW.
- 1984 Έναρξη βιομηχανικής παραγωγής ηλιακών στοιχείων στην Ιαπωνία από άμορφο πυρίτιο με απόδοση 5%.

2.4 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Η ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στηρίζεται σε ένα σύστημα κρυστάλλων το οποίο στην ουσία αποθηκεύει την ηλιακή ακτινοβολία και με κατάλληλες διαδικασίες επιτυγχάνει την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Αναλυτικότερα το σύστημα αυτό είναι γνωστό ως φωτοβολταϊκό κύτταρο (Φ/Β) και αποτελεί ένα ημιαγώγιμο στοιχείο, μια

κρυσταλλοδίοδο (ένωση p-n που εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που μετατρέπει μέρος της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική [08].

Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο προσπίπτει η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p- n οπότε να δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δυο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Αυτό ακριβώς το ρεύμα χρησιμοποιείται για να τροφοδοτηθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο, όπως για παράδειγμα ένας λαμπτήρας.

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στην συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά ο ημιαγωγός αυτός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη ακτινοβολία να διαπερνά άθικτη το ημιαγωγικό υλικό του στοιχείου και να απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, ώστε να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια αυτά που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου, ενώ το υπόλοιπο μεταφέρεται σαν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα.

Όπως και οι συσσωρευτές, το ηλιακό κύτταρο είναι αθόρυβο στη λειτουργία του. Σε αντίθεση με του συσσωρευτές, το ηλιακό κύτταρο δεν αλλοιώνεται κατά την διαδικασία της ενεργειακής μετατροπής και δεν επιβαρύνει το περιβάλλον, γιατί μέσα του δεν εξελίσσεται καμία χημική αντίδραση.

Με την τοποθέτηση ενός τέτοιου Φ/Β κυττάρου κάτω από τον ήλιο παράγεται ηλεκτρική ισχύς, ενώ μεταξύ των μεταλλικών επαφών του ηλιακού κυττάρου δημιουργείται μια συνεχή τάση, που οι τιμές της κυμαίνονται ανάλογα με το υλικό. Επειδή η τάση επί του ακροδέκτη εξαρτάται απόλυτα από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας έτσι και το ρεύμα που διαρρέει το κύτταρο εξαρτάται από αυτή. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι ότι η ισχύς που αποδίδει το ηλιακό κύτταρο μεταβάλλεται σε μια ευρεία περιοχή ανάλογα με την ακτινοβολούμενη ένταση φωτισμού. Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαίο να ορισθεί ο βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β κυττάρου, με βάση τον οποίο μπορούν να εξαχθούν κρίσιμα συμπεράσματα για το πότε ένα ηλιακό κύτταρο θεωρείται αποδοτικό. Η απόδοση, λοιπόν, ενός Φ/Β κυττάρου ορίζεται ως το επί της εκατό ποσοστό της φωτεινής ισχύος εισόδου, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ εξόδου, δηλαδή ορίζεται από το λόγο:

$$\text{Απόδοση Ηλιακού Κυττάρου} = \frac{\text{Ηλεκτρική Ισχύς Εξόδου}}{\text{Φωτεινή Ισχύς Εισόδου}} \times 100$$

Τα σημερινά αποδεκτά ηλιακά κύτταρα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως έχουν βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ του 10% και του 20%, αν και εργαστηριακά έχει επιτευχθεί βαθμός απόδοσης 25% για ηλιακά κύτταρα GaAs. Αναμένεται ότι η μέγιστη απόδοση για τις εμπορικές συσκευές σιλικόνης θα συνεχίσει να αυξάνεται και στο μέλλον θα φθάσει το 17% έως 20% από 13% έως 15% που είναι σήμερα.

Στην πράξη δύο ή περισσότερες βαθμίδες (στρώσεις) μπορούν να διαταχθούν η μια πίσω από την άλλη. Κάθε βαθμίδα κατασκευάζεται για ειδική φασματική περιοχή της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτά ονομάζονται κύτταρα πολλών βαθμίδων (multi-junction cells). Για κύτταρα δύο βαθμίδων η μέγιστη θεωρητική απόδοση είναι 35%. Θεωρητικά για άπειρο αριθμό βαθμίδων ο βαθμός απόδοσης μπορεί να φθάσει το 54%.

Όπως φαίνεται, η πρόοδος του ηλιακού κυττάρου στον τομέα του βαθμού απόδοσης είναι σχετικά μικρή. Ένα σημερινό τυπικό εμπορικό μοντέλο δεν έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από μία καλή διαστημική συσκευή του τέλους της δεκαετίας του 1960. Παρόλα αυτά για τους ειδικούς των φωτοβολταϊκών κυττάρων το ζήτημα της βελτίωσης του βαθμού απόδοσης αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση.

Στην σημερινή αγορά των ηλιακών κυττάρων και συστημάτων χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικοί τύποι ημιαγωγικών υλικών: η κρυσταλλική σιλικόνη, η άμορφη σιλικόνη και πιο πρόσφατα τα CuInSe₂ και CdTe. Η κρυσταλλική σιλικόνη είναι το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία ημιαγωγών. Αυτό οφείλεται στο ότι υπάρχει μαζική παραγωγή για την κρυσταλλική σιλικόνη, καθώς επίσης και στο ότι εμφανίζει εξαιρετική σταθερότητα ως υλικό με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται μεγάλη διάρκεια ζωής στο ηλιακό κύτταρο.

Παράλληλα με την κρυσταλλική σιλικόνη επεκτάθηκε τα τελευταία χρόνια και η χρήση της άμορφης σιλικόνης. Η άμορφη σιλικόνη κατέκτησε την αγορά των μικρών εφαρμογών όπως ρολογιών, υπολογιστικών μηχανών τσέπης, όπου χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά, ενώ μόνο σε σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν κρυσταλλική σιλικόνη ή CdTe. Εξαιτίας όμως του μικρού βαθμού απόδοσης και των προβλημάτων σταθερότητας που εμφανίζει το καθιστούν απαγορευτικό ως υλικό για να χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερες εφαρμογές.

Το ηλιακό κύτταρο είναι σχετικά μικρό σε διαστάσεις, περίπου 10x10cm, και παράγει επίσης χαμηλή τάση. Η τάση που παράγει το Φ/Β μεταβάλλεται ελάχιστα με την ένταση της ακτινοβολίας, σε αντίθεση με το παραγόμενο ρεύμα, το οποίο είναι ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν αυξάνεται δηλαδή η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνεται και το ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β κύτταρο.

Τα Φ/Β κύτταρα έχουν σκούρο χρώμα, γεγονός που βοηθά στην απορρόφηση μεγαλύτερων ποσοστών ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Η αύξηση της θερμοκρασίας όμως, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης που δημιουργείται στα άκρα του Φ/Β κυττάρου, συγκεκριμένα πάνω από

τους 25°C για κάθε ένα παραπάνω βαθμό υπάρχει αντίστοιχη μείωση της απόδοσης κατά 0,4%.

Για να εξασφαλίσουμε τις επιθυμητές τιμές τάσης και ρεύματος, τοποθετούμε αντίστοιχα πολλά Φ/Β κύτταρα σε σειρά και παράλληλα. Οι συνδέσεις των κυττάρων μεταξύ τους γίνονται πίσω από μία γυάλινη επιφάνεια, πάνω στην οποία τοποθετούνται τα κύτταρα. Η γυάλινη πλάκα ενισχύεται με ένα πλαίσιο από αλουμίνιο ή από ευγενή χάλυβα που βελτιώνει την σταθερότητά της, με τον τρόπο αυτό κατασκευάζεται η ηλιακή γεννήτρια ή διαφορετικά το Φ/Β πλαίσιο. Το συνηθέστερο μέγεθος μιας ηλιακής γεννήτριας κυμαίνεται μεταξύ του 0.25 έως 1m². Για μεγαλύτερη ισχύ χρειαζόμαστε περισσότερες ηλιακές γεννήτριες συνδεδεμένες μεταξύ τους. Μια τέτοια σύνθεση λέγεται Φ/Β πάνελ. Πολλά τέτοια σε σειρά ή παράλληλα μας κάνουν μια Φ/Β Συστοιχία. Πολλές τέτοιες μαζί διαμορφώνουν ένα Φ/Β Πάρκο ή Φ/Β Σύστημα. Ανάλογα με τον τρόπο συνδεσμολογίας των Φ/Β συστημάτων διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

↓ **Αυτοδύναμα ή Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα**

Ιδανικά για απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν υπάρχει τρόπος σύνδεσης με το δίκτυο και όπου είναι δύσκολη η μεταφορά καυσίμου σε περίπτωση που χρησιμοποιούνταν μία γεννήτρια ντίζελ. Τα συστήματα αυτά απαιτούν συσσωρευτές για την εξασφάλιση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις νυκτερινές ώρες ή σε μέρες συννεφιάς.

↓ **Φ/Β Συστήματα Διασυνδεδεμένα με το δίκτυο**

Τα συστήματα αυτά βρίσκονται εγκατεστημένα κοντά σε ήδη υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο και παρέχουν την ηλεκτρική τους ισχύ σε αυτό.

↓ **Συμμετοχή Φ/Β σε Υβριδικά Συστήματα**

Τα Υβριδικά συστήματα αποτελούνται από διάφορες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας ανανεώσιμες και συμβατικές. Για παράδειγμα, αναφέρεται το Φωτοβολταϊκό Σύστημα των 20MW στην Αυστραλία από την BP Solar Australia. Ας σημειωθεί, ότι αυτό και μόνο μπορεί να καλύψει τις ανάγκες 10.000 σπιτιών, ενώ το κάρβουνο που θα καιγόταν για να τις καλύψει θα απελευθέρωνε περί τους 8.000 τόνους CO₂ το χρόνο.

2.5 Μειονεκτήματα- Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα των Φ/Β Συστημάτων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- ↓ Παράγουν «δωρεάν» ηλεκτρική ενέργεια από τον Ήλιο που είναι μια ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- ↓ Δεν έχουν κινούμενα μέρη και παράγουν ισχύ αθόρυβα.
- ↓ Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον με αέρια ή με άλλα κατάλοιπα.

- ↓ Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή.
- ↓ Μπορούν να εγκατασταθούν σε απομονωμένες περιοχές.
- ↓ Δεν καταναλώνουν καύσιμο.
- ↓ Μπορούν εύκολα να λειτουργήσουν παράλληλα με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- ↓ Λειτουργούν χωρίς προβλήματα κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες.
- ↓ Είναι επεκτάσιμα ανάλογα με τις ανάγκες σε φορτίο.
- ↓ Έχουν πρακτικά απεριόριστη διάρκεια ζωής (τουλάχιστον 20 ή 30 χρόνια).
- ↓ Η αναλογία της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος των διατάξεων είναι αρκετά μεγάλη, περίπου 100 W/Kg, που είναι σημαντική ιδιότητα για τις διαστημικές εφαρμογές.

Τα μειονεκτήματα των Φ/Β συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- ↓ Υψηλό κόστος των Φ/Β Κυττάρων αλλά και των συσσωρευτών.
- ↓ Απαιτήση χρήσης σχετικά μεγάλων επιφανειών για την εγκατάστασή τους λόγω της μικρής απόδοσης.
- ↓ Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται η δαπανηρή αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Συνεπώς η εφαρμογή και η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική για όλες τις αναπτυσσόμενες χώρες, άρα και για την Ελλάδα που έχει πλούσια ηλιοφάνεια. Ακόμα, όμως και για τις βιομηχανικές χώρες, τα Φ/Β συστήματα αποτελούν το κλειδί για την παραγωγή αποκεντρωμένης ενέργειας.

2.6 Το παρόν και το μέλλον της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας

Για τα Ελληνικά νησιά η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών μονάδων είναι πολύ σημαντική και απαραίτητη γιατί, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, παρουσιάζεται σημαντικό πρόβλημα, λόγω της μεγάλης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης οι περισσότερες περιοχές είναι απομονωμένες και οι τυπικές ανάγκες είναι μικρές, αφού οι οικισμοί είναι μικροί και διάσπαρτοι, άρα η διασύνδεση με το δίκτυο είναι δύσκολη αλλά και συχνά μη συμφέρουσα, ενώ η ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής ακτινοβολίας δείχνει να είναι ακόμα πιο επιτακτική, αφού άλλωστε στα νησιά οι συνθήκες λειτουργίας είναι πολύ καλές εξαιτίας των υψηλών ποσοστών ηλιακής ακτινοβολίας.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών από τη ΔΕΗ πλησιάζει τα 230 kWp, ενώ στο σύνολο της χώρας η εγκατεστημένη ισχύς πλησιάζει τα 900 kWp. Οι κυριότερες εφαρμογές Φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα έχουν γίνει σε νησιά, όπου είτε υπήρχε έντονη ανάγκη για αυτόνομη τροφοδότηση ηλεκτρικού ρεύματος είτε συνδέθηκαν στα ήδη υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυά τους [09], [10], [11].

Οι τοποθεσίες στις οποίες έγιναν οι εφαρμογές των Φωτοβολταϊκών είναι:

1. Κύθνος (860 φωτοβολταϊκά πλαίσια, ισχύος αιχμής 100 kWp)
2. Αρκιοί (688 φωτοβολταϊκά πλαίσια, 37,5 kWp)
3. Γαύδος (160 φωτοβολταϊκά πλαίσια, 20 kWp)
4. Αντικύθηρα (720 φωτοβολταϊκά πλαίσια, 25 kWp)

5. Σίφνος συνολικής ισχύος 60 kWp
6. Μυτιλήνη συνολικής ισχύος 8 kWp
7. Θεσσαλονίκη, ΗΛΠΡΑ συνολικής ισχύος 6,5 kWp
8. Πάρος, ΧΑΡΜΗ Α.Ε HOTEL συνολικής ισχύος 10 kWp
9. Αγ. Όρος, Ιερά μονή Σίμωνος Πέτρας συνολικής ισχύος 45 kWp
10. Αγ. Ρούμελη (720 φωτοβολταϊκά πλαίσια, 50 kWp)
11. ΣΤΕΤ (22 φωτοβολταϊκά πλαίσια 12kWp)
12. Κτίριο Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ συνολικής ισχύος 50 kWp
13. ΣΤΗΛΜΕΤ (78 φωτοβολταϊκά πλαίσια 109kWp)
14. Νέες πολυκατοικίες στον Ταύρο με φωτοβολταϊκά στους εξωτερικούς τοίχους

Τα Φ/Β κύτταρα υπό μορφή Φ/Β συστημάτων βρίσκουν εφαρμογή όπου υπάρχει ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια με τάση από 1-240Volts. Είναι η ιδανική λύση για εφαρμογές μέχρι μερικά kW.

Τα περιθώρια παραπέρα διάδοσης των φωτοβολταϊκών εφαρμογών, έστω και με το σημερινό υψηλό κόστος, είναι μεγάλα [12]. Ειδικότερα στην Ελλάδα, θα μπορούσαν να ηλεκτροδοτηθούν πολλοί από τους 1000 μικρούς οικισμούς με συνολικό πληθυσμό 50.000 κατοίκων, που δεν έχουν ακόμα συνδεθεί με το δίκτυο της ΔΕΗ, καθώς και τις άλλες περίπου 50.000 κατοικίες, διάσπαρτες σε διάφορες περιοχές της χώρας, που είναι χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα φωτοβολταϊκής ηλεκτροδότησης πολλών από τα περίπου 6.000 επαγγελματικά σκάφη και αναψυχής, τους 800 φάρους, καθώς και τις 2.000 σιδηροδρομικές διαβάσεις που δεν έχουν ηλεκτρική σήμανση.

Η κατασκευή των περισσότερων από τους αρκετά μεγάλους φωτοβολταϊκούς σταθμούς έχει γίνει με οικονομική ενίσχυση από τις κυβερνήσεις των αντίστοιχων χωρών, από διεθνείς οργανισμούς, ερευνητικά ιδρύματα ή από βιομηχανίες για κοινωνικούς λόγους ή για απόκτηση εμπειρίας. Άλλωστε είναι φανερό ότι για να ανταγωνιστεί η φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, με οικονομικά κριτήρια, τις συμβατικές πηγές ηλεκτρισμού σε μεγάλη κλίμακα, θα πρέπει να προηγηθεί σημαντική παραπέρα μείωση του κόστους των ηλιακών στοιχείων, καθώς και των άλλων εξαρτημάτων των συστημάτων (συσσωρευτές αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, ρυθμιστές, μετατροπείς κτλ.).

Όπως είναι φυσικό, το διεθνές ενδιαφέρον για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν διατηρείται στην ίδια ένταση με την πάροδο του χρόνου, αλλά αυξάνει ή υποχωρεί ανάλογα με τις παράλληλες εξελίξεις στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, στο κόστος καυσίμων και στις προοπτικές ανάπτυξης των άλλων ανταγωνιστικών μεθόδων. Πάντως η γενική εκτίμηση είναι ότι στις επόμενες δεκαετίες τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα καλύπτουν σε πολλές χώρες ένα σημαντικό ποσοστό (περίπου 10-20%) των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ παράλληλα θα κυριαρχούν σε εξειδικευμένους τομείς, όπως οι διαστημικές εφαρμογές, η ηλεκτροδότηση νησιών και γεωγραφικά απομονωμένων εγκαταστάσεων. Την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της εξέλιξης αυτής μπορούν να επηρεάσουν απρόβλεπτοι παράγοντες, όπως οι απότομες μεταβολές στο κόστος των καυσίμων, τα πυρηνικά ατυχήματα, οι οικολογικές κινητοποιήσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και οι κυβερνητικές επιλογές.

3 Φωτισμός δρόμων

3.1 Γενικά

Ο φωτισμός συχνά θεωρείται ως ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες ανάπτυξης, ενώ βρίσκεται πως είναι ένας από τους κύριους παράγοντες μέσω του οποίου οι άνθρωποι κρίνουν την ποιότητα της ζωής. Ο φωτισμός μπορεί να προσφέρει πολλές παραγωγικές ώρες εργασίας την ημέρα, ενώ στο σπίτι ο επαρκής φωτισμός βοηθά σε ποικίλες λειτουργίες, όπως το διάβασμα, χειρονακτικές εργασίες και άλλες οικιακές δραστηριότητες. Κρίσιμος είναι και ο σωστός φωτισμός δρόμων κατά τη διάρκεια της νύχτας, ώστε να αποφεύγονται πιθανά δυστυχήματα.

Ο φωτισμός δρόμων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ασφαλής και άνετη η κυκλοφορία τόσο από οδηγούς, όσο και από πεζούς. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ο κατάλληλος φωτισμός, ώστε να γίνονται έγκαιρα αντιληπτά τυχόν εμπόδια, τα όρια ή επικίνδυνα σημεία του δρόμου για τους οδηγούς, αλλά επιπλέον για τα αυτοκίνητα και για τους πεζούς.

3.2 Επίπεδα φωτισμού για αστικές περιοχές

Η απαιτούμενη στάθμη φωτισμού στις αστικές περιοχές κατηγοριοποιείται σε επτά επίπεδα, από P1 μέχρι P7, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 3-1. Το επίπεδο φωτισμού P1 χρησιμοποιείται για περιοχές κύρους που απαιτείται η δημιουργία ελκυστικού περιβάλλοντος [13].

Οι υπόλοιπες έξι κατηγορίες κατατάσσονται ανάλογα με τη χρήση των πεζών και την ανάγκη της διαφύλαξης του χαρακτήρα του περιβάλλοντος. Τα επίπεδα P5, P6 και P7 πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε περιοχές που ο κίνδυνος εγκλήματος είναι αμελητέος. Όταν η πιθανότητα για εγκληματικές ενέργειες είναι μεγάλη, θα πρέπει να επιλέγεται επίπεδο φωτισμού ενός ή δύο βημάτων μεγαλύτερων από αυτό που θα επιλέγονταν αν δεν υπήρχε ο κίνδυνος εγκλήματος (για παράδειγμα P4 ή P3 αντί για P5). Αυτές οι συστάσεις βρίσκουν εφαρμογές και σε δρόμους που χρησιμοποιούνται από ποδηλάτες και γενικότερα σε δρόμους που δεν κυκλοφορούν οχήματα.

Πίνακας 3-1 Επίπεδα φωτισμού αστικών περιοχών κατά CIE

Περιγραφή δρόμου	Επίπεδο φωτισμού
Δρόμοι υψηλού κύρους	P1
Έντονη νυχτερινή χρήση από πεζούς ή ποδηλάτες	P2
Μέτρια νυχτερινή χρήση από πεζούς ή ποδηλάτες	P3
Μικρή νυχτερινή χρήση από πεζούς ή ποδηλάτες που αφορά αποκλειστικά παράπλευρες ιδιότητες	P4
Μικρή νυχτερινή χρήση από πεζούς ή ποδηλάτες που αφορά αποκλειστικά παράπλευρες ιδιότητες Απαραίτητο να διατηρείται ο τοπικός ή ο αρχιτεκτονικός χαρακτήρας του περιβάλλοντος.	P5
Ελάχιστη νυχτερινή χρήση από πεζούς ή ποδηλάτες που αφορά αποκλειστικά παράπλευρες ιδιότητες Απαραίτητο να διατηρείται ο τοπικός ή ο αρχιτεκτονικός χαρακτήρας του περιβάλλοντος.	P6
Δρόμοι όπου η απαιτούμενη ορατότητα για την οδήγηση παρέχεται μόνο από το άμεσο φως των φωτιστικών.	P7

Στον Πίνακα 3-2 δίνονται οι προϋποθέσεις, οι οποίες για τα επίπεδα P1 μέχρι P6 σχετίζονται με το σύνολο της χρησιμοποιούμενης επιφάνειας, όπως είναι το μονοπάτι, αν υπάρχει, όπως και η επιφάνεια του δρόμου. Για το επίπεδο P7 είναι βασικό τα φωτεινά τμήματα του φωτιστικού να είναι ορατά από το επόμενο κοντινότερο φωτιστικό, για να παρέχεται αποτελεσματική ορατότητα για οδήγηση.

Πίνακας 3-2 Προδιαγραφές για τα επίπεδα φωτισμού P1 έως P7

Επίπεδο φωτισμού	Οριζόντια ένταση φωτισμού (lux) Της ολικής χρησιμοποιούμενης επιφάνειας		Ημικυλινδρική ένταση φωτισμού (lux)
	Μέγιστη	Ελάχιστη	Ελάχιστη
P1	20	7.5	5
P2	10	3	2
P3	7.5	1.5	1.5
P4	5	1	1
P5	3	0.6	0.75
P6	1.5	0.2	0.5
P7	Μη εφαρμόσιμο		

Στον Πίνακα 3- 3 αναγράφονται οι προδιαγραφές για τα επίπεδα φωτισμού βασικών τύπων δρόμων όπως έχουν καθοριστεί από την CIE και αφορούν τις κλάσεις φωτισμού M1 έως και M5 [14].

Περιγραφή Δρόμου		Κλίση Φωτισμού
Δρόμου υψηλής ταχύτητας κυκλοφορίας με διαχωρισμένες λωρίδες κατεύθυνσης, χωρίς διασταυρώσεις και διαβάσεις (μεγάλοι αυτοκινητόδρομοι)		
Κυκλοφορία του δρόμου και πολυπλοκότητα	Μεγάλη	M1
	Μεσοία	M2
	Μικρή	M3
Δρόμου υψηλής ταχύτητας κυκλοφορίας, διπλής κατεύθυνσης		
Ποιότητα ελέγχου του δρόμου (Σήμανση, σηματοδότηση κ.λπ.) και διαχωρισμός των λωρίδων κατεύθυνσης της κυκλοφορίας	Ελλιπής	M1
	Καλό	M2
Κύριοι δρόμοι πόλεων (Λεωφόροι), κυκλικοί δρόμοι κ.λπ.		
Ποιότητα ελέγχου του δρόμου και διαχωρισμός λωρίδων κατεύθυνσης της κυκλοφορίας	Ελλιπής	M2
	Καλός	M3
Δευτερεύοντες αστικοί δρόμοι, δρόμοι διασύνδεσης λεωφόρων κ.λπ.		
Ποιότητα ελέγχου του δρόμου και διαχωρισμός των λωρίδων κατεύθυνσης της κυκλοφορίας	Ελλιπής	M4
	Καλή	M5

Είναι προφανές πως δεν υπάρχουν οι ίδιες απαιτήσεις στην απόδοση του συστήματος φωτισμού για όλους τους δρόμους. Έτσι ανάλογα με το μέγεθος του, με τη θέση του, αλλά και την χρηστικότητα του δρόμου έχουμε και διαφορετική μελέτη. Για διευκόλυνση, αλλά και τυποποίηση των μελετών αυτών, έχει γίνει διάκριση αυτών σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

- ✚ Αυτοκινητόδρομοι ή εθνικοί δρόμοι: Λόγω των μεγάλων ταχυτήτων είναι απαραίτητος ο καλός φωτισμός για την ασφαλή οδήγηση.
- ✚ Δρόμοι πόλεων: Πρέπει να διασφαλίζεται φωτισμός τέτοιος ώστε να γίνονται αντιληπτοί οι πεζοί, τα σταυροδρόμια και τα εμπόδια.
- ✚ Τοπικοί δρόμοι: Λόγω της περιορισμένης κίνησης αρκεί ο φωτισμός να εξασφαλίζει τον εύκολο εντοπισμό των ορίων του δρόμου, σταυροδρομιών, πεζών και εμποδίων.
- ✚ Φωτισμός ειδικών θέσεων: Ο φωτισμός στα σημεία αυτά θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι σημαντικές κινδύνου, πληρωμής διοδίων, διασταύρωσης και έργων να γίνονται αντιληπτές από αρκετά μεγάλη απόσταση.

3.3 Ικανότητα διάκρισης αντικειμένων – θάμβωση

Όταν ένας δρόμος αναφέρεται πως είναι «ομαλά φωτισμένος», εννοείται πως όταν διανύεται από ένα αυτοκίνητο η επιφάνειά του είναι επαρκώς φωτεινή. Στην περίπτωση που ο λαμπτήρας είναι σε ύψος περίπου 10m πάνω από την επιφάνεια, μια κηλίδα φωτός αντανakλά από το δρόμο. Το σχήμα αυτής της κηλίδας εξαρτάται από την επίστρωση του δρόμου. Σε επιστρώσεις πολύ καλής ιδιοσυστασίας όπου υπάρχει αξιοσημείωτη στιλπνότητα, όπως είναι η ασφαλτος, η κηλίδα είναι ιδιαίτερα μακριά, τόσο ώστε να εξαπλώνεται μέχρι και τα πόδια του παρατηρητή. Στους πιο συνηθισμένους τραχείς δρόμους η κηλίδα αυτή εκτείνεται κυρίως εγκάρσια, παρά κατά μήκος του δρόμου. Οι κηλίδες φωτός δεν είναι εύκολο να καθοριστούν, παρόλα αυτά όμως μπορούν να παρατηρηθούν με ευκρίνεια.

Στην περίπτωση που υπάρχει μια σειρά από πόλους που έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κηλίδες φωτός να συγχωνεύονται για να καλύψουν την περιοχή του δρόμου, τα αντικείμενα του δρόμου θα φαίνονται ως σκούρες φιγούρες, σε αντίθεση με την φωτισμένη επίστρωση. Αυτή αποτελεί και την βασική αρχή πάνω στην οποία βασίζεται ο φωτισμός δρόμων, μέχρι να αποδειχθεί πιο οικονομική η παραγωγή φιγούρας που να κάνει τα αντικείμενα να φωτίζονται, ενώ η επιφάνεια του δρόμου είναι σκοτεινή.

Μέχρι σήμερα ο φωτισμός της επιφάνειας δρόμου είναι κατά προσέγγιση συνεχής κατά μήκος του. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι ανακλάσεις είναι αρκετά διαφορετικές. Η μακριά φωτεινή κηλίδα συνήθως περιγράφεται ως σχήμα T, έχοντας μια «κεφαλή» και μια «ουρά». Η κεφαλή σχηματίζεται από το φως που εκπέμπεται από τον πόλο ανάλογα με το εύρος των γωνιών που κυμαίνονται από 90° και κατεβαίνουν μέχρι τις 60°.

Ο φωτισμός ενός κυρίου δρόμου με σειρές ισχυρών λαμπτήρων μπορεί να παρουσιάσει το πρόβλημα της θάμβωσης. Μελέτες έδειξαν πως το φαινόμενο αυτό απορρέει από το φως που εκπέμπεται ανάμεσα στις 70° και στον οριζόντιο άξονα. Από την IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) έχουν καθοριστεί 3 τύποι θάμβωσης ανάλογα με το επίπεδο δυσκολίας της διάκρισης αντικειμένων από τον παρατηρητή λόγω του φαινομένου αυτού. Στόχος του σωστού φωτισμού είναι να παρέχει μια επιφάνεια δρόμου με ίδιο φωτισμό όπως φαίνεται από το χρήστη του δρόμου, μέσα στα επιτρεπτά επίπεδα θάμβωσης από το σύστημα φωτισμού.

3.4 Προτάσεις σχεδιασμού εγκατάστασης φωτισμού

Μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία σχεδιασμού έχει ορισθεί για να εξασφαλιστεί τόσο ο σωστός και ευθύς υπολογισμός όσο και οι διαδικασίες σχεδιασμού. Οι αρχές αυτές καθορίστηκαν από στο British Standard BS 5489 Code of practice for road lighting 1992 [15] και παρατίθενται παρακάτω:

3.4.1 Γενικές αρχές φωτισμού δρόμου

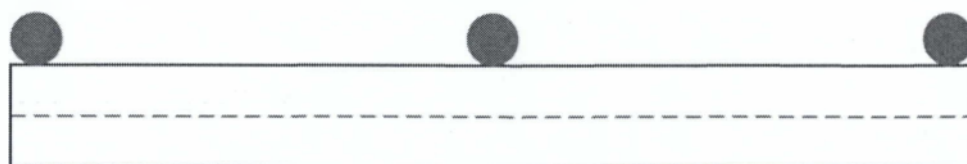
Σκοπός του οδηγού είναι ο καθορισμός των αρχών πάνω στις οποίες οι επιμέρους διαδικασίες για το σωστό φωτισμό δρόμου βασίζονται. Περιλαμβάνει καθορισμό εννοιών,

ταξινόμηση δρόμων, παρατήρηση συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, σκοπός του φωτισμού δρόμων, κίνδυνο από την θέση των ιστών φωτισμού, νομοθεσία και τη συντήρηση [16].

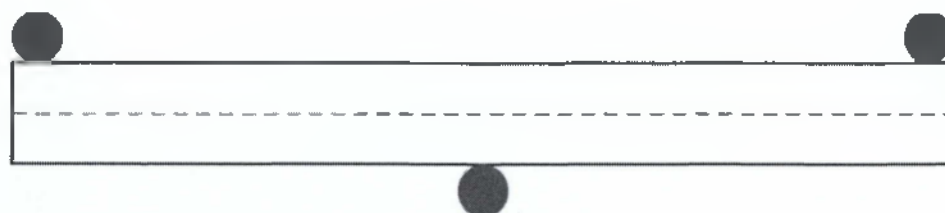
Οι βασικότερες έννοιες που είναι απαραίτητες για το φωτισμό δρόμων είναι οι εξής:

Καθορισμός θέσης: Ο τρόπος με τον οποίο έχει σχεδιαστεί να τοποθετηθούν οι ιστοί φωτισμού, δηλαδή μονόπλευρη, χιαστί, αμφίπλευρη, αξονική.

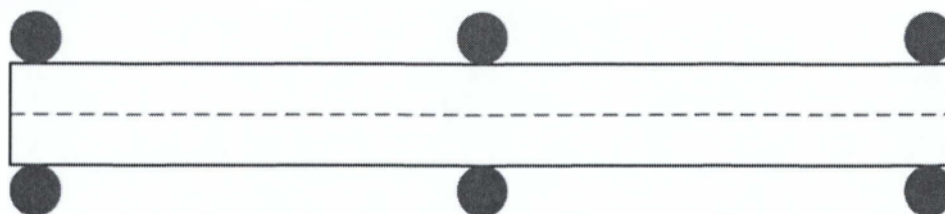
Μονόπλευρη

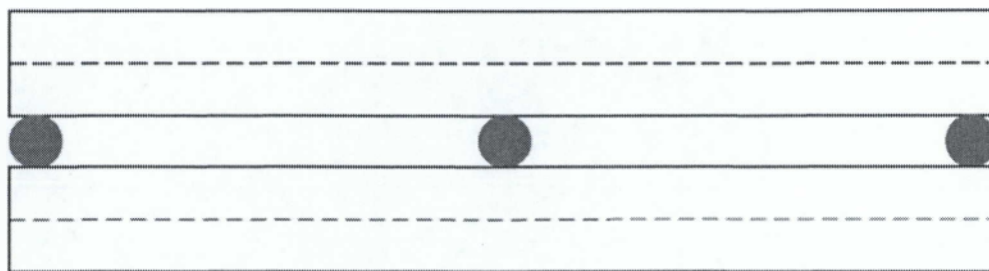


Χιαστί



Αμφίπλευρη





Μέση λαμπρότητα: Η λαμπρότητα σε μια καθορισμένη περιοχή της επιφάνειας του δρόμου όπως φαίνεται από συγκεκριμένη θέση παρατηρητή.

Σχεδιασμός: Ο καθορισμός του κατάλληλου ιστού φωτισμού είναι σημαντικός για την ορθή λειτουργία του συστήματος, αφού ανάλογα με το ύψος του έχουμε αύξηση ή μείωση της αποτελεσματικότητας του φωτιστικού. Όταν σχεδιάζεται ένα σύστημα θα πρέπει να συνυπολογίζονται η απόσταση και η πλευρική θέση των φωτιστικών όπως και ο τύπος και η απόδοση του φωτιστικού. Αυξάνοντας το ύψος του ιστού μπορεί, αλλά όχι απαραίτητα, να μειωθεί η ανεπιθύμητη θάμβωση και να καλυφθεί η φωτεινότητα.

Απόσταση φωτιστικών: Η απόσταση μεταξύ των φωτιστικών συχνά επηρεάζεται από την θέση των χρησιμοποιούμενων πόλων, την διαθέσιμη περιοχή και την γεωμετρία του δρόμου.

3.4.2 Αξιολόγηση δρόμου

Στο τμήμα αυτό παρατίθενται οι σπουδαιότερες οδηγίες για τον σχεδιασμό φωτισμού για δρόμους πλάτους μέχρι 15m εφόσον πρόκειται για μια λωρίδα σε κάθε κατεύθυνση ή μέχρι 2×11m για δρόμους με δύο λωρίδες για κάθε κατεύθυνση.

Ύψος στήριξης φωτιστικού(H): Γενικά με την αύξηση του H επιτρέπεται μεγαλύτερο διάστημα μεταξύ των ιστών φωτισμού. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό και βοηθά για ανοιχτούς και μεγάλους δρόμους, αλλά όχι τόσο για αστικές συνθήκες όπου υπάρχουν πολλές διασταυρώσεις και εμπόδια. Το ύψος των ιστών είναι συνήθως από 7m έως 12m. Το ύψος των 10m είναι αυτό που ενδείκνυται για την πλειοψηφία των δρόμων, ενώ αυτό των 12 m κυρίως για πλατύς και μεγάλης κυκλοφορίας δρόμους, όπως είναι οι κύριες οδοί μεταξύ δύο πόλεων.

3.4.3 Έλεγχος της θάμβωσης

Η θάμβωση είναι αποτέλεσμα της πηγής φωτισμού και της έντασης φωτισμού του περιβάλλοντος χώρου του δρόμου. Ένα αντικείμενο που είναι μόλις ορατό, όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της θάμβωσης συγχωνεύεται με τον χώρο και είναι δύσκολο να διακριθεί. Το ποσοστό κατά το οποίο η ένταση φωτισμού του περιβάλλοντα χώρου πρέπει να μειωθεί, για να κάνει το αντικείμενο οριακά ορατό ξανά είναι γνωστό ως

δείκτης θάμβωσης (TI) και παρέχει μια ιδεατή μέτρηση του επιπέδου της θάμβωσης [17].

Η τιμή του δείκτη θάμβωσης εξαρτάται από τη διάχυση του φωτός του φωτιστικού με ανύψωση από τις 70° μέχρι τις 90° στο κάθετο επίπεδο στο οποίο παρατηρείται. Εξαρτάται επίσης από την ένταση φωτισμού του δρόμου, από τη διάταξη του πόλου, το ύψος κρεμάσεως και τη θέση του παρατηρητή. Είναι, επίσης, θετικό να λαμβάνεται υπόψη σε αγροτικές περιοχές, όπου η απουσία ανακλώμενου φόντου, όπως είναι τα κτίρια, μπορεί να αυξήσει τη πιθανότητα εμφάνισης θάμβωσης. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις εγκατάστασης η τιμή του δείκτη θάμβωσης δεν πρέπει να ξεπερνά το 30%.

3.4.4 Λόγος φωτεινότητας περιβάλλοντος χώρου (S_R)

Είναι ο δείκτης που αναφέρεται στην ικανότητα των οδηγών και των πεζών να διακρίνουν αντικείμενα και ανθρώπους παραπλεύρως του δρόμου. Η τιμή του δείκτη S_R προτείνεται να έχει τιμή μεγαλύτερη από 0,5 για τις περισσότερες κλάσεις φωτισμού που έχει θεσπίσει η CIE, η οποία μπορεί να υπολογιστεί και από τα διαγράμματα κατανομής της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια του δρόμου.

3.4.5 Επιφάνεια δρόμου

Οι τιμές της έντασης φωτισμού και της λαμπρότητας στην επιφάνεια του δρόμου εξαρτώνται από το προσπίπτων φως και τις αντανάκλαστικές ιδιότητες της επιφάνειας του δρόμου. Η τελευταία εμπεριέχει την ολική αντανάκλαση, αλλά και την κατοπτρική ανάκλαση σε διάφορες γωνίες. Η ολική ανάκλαση είναι κυρίως καθορισμένη από το χρώμα της ανακλαστικής ιδιότητας του οδοστρώματος.

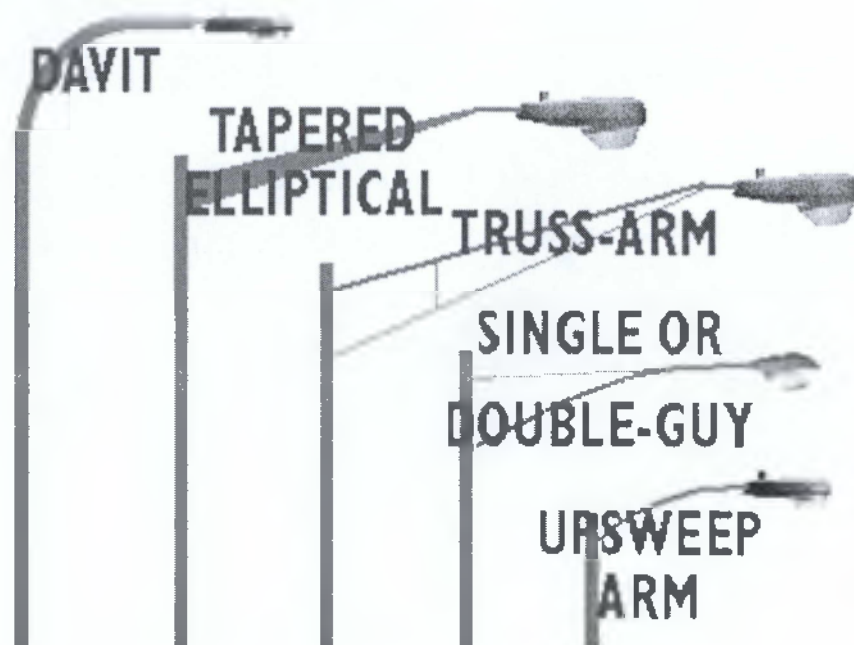
3.4.6 Διακλαδώσεις δρόμου

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τύπων διασταυρώσεων, οι οποίες αποτελούν και τα πιο πιθανά μέρη για ατυχήματα, για το λόγο αυτό ο φωτισμός θα πρέπει :

- ⬇ να προειδοποιεί τον οδηγό που πλησιάζει την διασταύρωση
- ⬇ να αποκαλύπτει κάθε έκτακτο πρόβλημα οδικής κίνησης δευτερευόντων δρόμων
- ⬇ να μην παρέχει επιπρόσθετο κίνδυνο με τους ιστούς φωτισμού που βρίσκονται στην διασταύρωση εμποδίζοντας την ορατότητα

3.4.7 Τύποι ιστών φωτισμού

Υπάρχουν πολλοί τύποι ιστών φωτισμού δρόμου και δεκάδες κατασκευαστές. Είναι προφανές, πως κάποιοι από αυτούς τους τύπους χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε σχέση με κάποιους άλλους. Ορισμένοι από αυτούς, που συναντούμε συχνότερα φαίνονται στην Εικόνα 3-1:



Εικόνα 3-1 Συνήθεις τύποι ιστών φωτισμού δρόμων

Ανάλογα, λοιπόν, με την επιθυμητή χρήση, με τον κατασκευαστή αλλά και με τις προδιαγραφές που έχει καθορίσει κάθε χώρα για τους πόλους που πρέπει να χρησιμοποιούνται για τις εφαρμογές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος από τους τύπους πόλων που παρουσιάζονται παραπάνω (ή ακόμα και άλλοι που δεν παρατίθενται στην Εικόνα 3-1).

3.5 Διάχυση φωτός φωτιστικών δρόμων

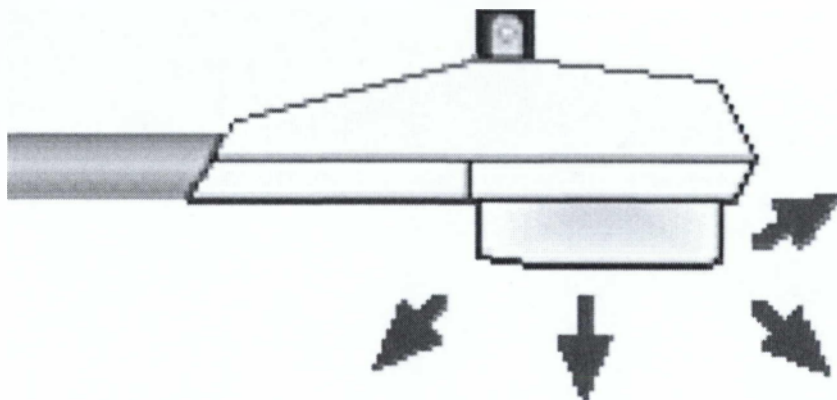
Τα περισσότερα φωτιστικά δρόμων είναι σχεδιασμένα για να ελέγχουν την διάχυση του φωτός. Υπάρχουν τέσσερα είδη φωτιστικών που παρέχουν διαφορετικές γωνίες ελέγχου. Αυτά είναι τα εξής: **Non-cutoff**, **cutoff**, **semi-cutoff** και **full-cutoff** [18].

Τα φωτιστικά **Non-cutoff**, (Εικόνα 3-2) επιτρέπουν την διάχυση του φωτός προς όλες τις κατευθύνσεις. Πολλά διακοσμητικά φωτιστικά χρησιμοποιούν φωτιστικά της κατηγορίας αυτής. Τα Non-cutoff φωτιστικά είναι ο λιγότερο αποδοτικός τρόπος για να φωτιστεί το έδαφος. Είναι γενικώς αποδοτικά στο να διοχετεύουν φως στα δέντρα, και δημιουργούν ένα μεγάλο ποσοστό φωτεινής ρύπανσης και έντονου φωτός. Αυτά τα φωτιστικά δεν χρησιμοποιούνται για τον φωτισμό των δρόμων γιατί έχουν την τάση να τυφλώνουν τους οδηγούς.



Εικόνα 3-2 Φωτιστικό τύπου Non-cutoff

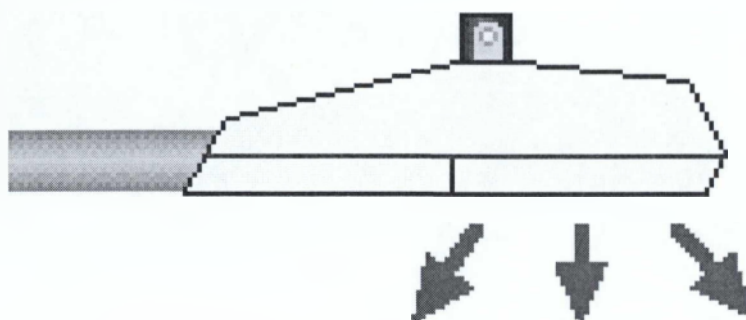
Τα φωτιστικά **Semi-cutoff**, (Εικόνα 3-3) επιτρέπουν το φως να διαχυθεί κάτω από το επίπεδο των 90°, ενώ ένα ποσοστό (έως 5%) διαχέεται πάνω από το επίπεδο των 90°. Αυτά τα φωτιστικά χρησιμοποιούνται συχνά σε φωτιστικά δρόμων του τύπου που φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Είναι αρκετά αποτελεσματικά στη διάχυση του φωτός πέρα από μια μεγάλη, κατευθυνόμενη περιοχή στο έδαφος. Υπάρχει ακόμα σημαντικό έντονο φως από αυτά τα φωτιστικά, αλλά συχνά, τοποθετούνται στους πιο ψηλούς ιστούς, οι οποίοι τα φέρουν ψηλότερα από το πεδίο όρασης του οδηγού.



Εικόνα 3-3 Φωτιστικό τύπου semi-cutoff

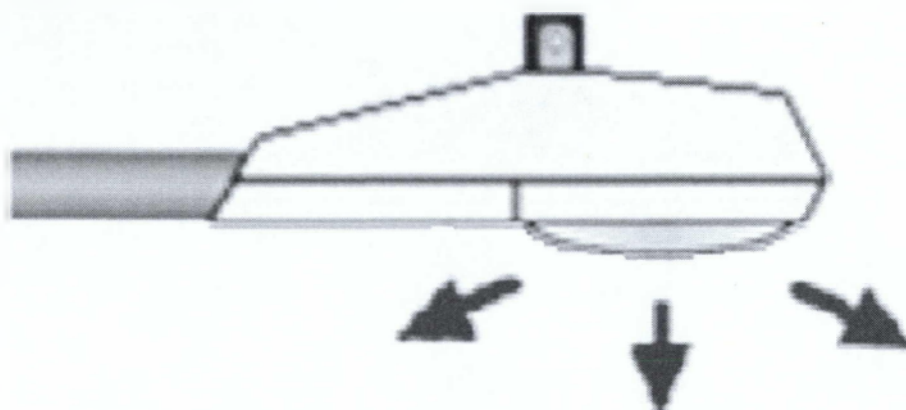
Τα φωτιστικά **Full-cutoff** (Εικόνα 3-4) κατευθύνουν το φως προς το έδαφος, κάτω από το φωτιστικό μόνο. Τα φωτιστικά αυτά δεν επιτρέπουν την διάχυση φωτός άνω του επιπέδου των 90°. Τα οπτικά αυτά κατευθύνουν το φως σε μια καθορισμένη

επιφάνεια στο έδαφος. Τυπικά για να επιτευχθεί ένας ενδιάμεσος φωτισμός αρκεί η χρησιμοποίηση φωτιστικών τύπου full-cutoff (σε μεγαλύτερο ποσοστό) ή να αυξηθεί το ύψος στήριξης των φωτιστικών ώστε να επιτευχθούν αποτελέσματα συγκρίσιμα με τα φωτιστικά τύπου cutoff ή semi-cutoff.



Εικόνα 3-4 Φωτιστικό τύπου full-cutoff

Τα φωτιστικά **Cutoff** (Εικόνα 3-5) επιτρέπουν μεγαλύτερο έλεγχο του διαχυμένου φωτός από ότι semi-cutoff. Με τα φωτιστικά αυτά λιγότερο από 2,5% του φωτός διαφεύγει πάνω από το επίπεδο των 90ο. Τα φωτιστικά τύπου Cutoff ενδείκνυνται για φωτισμό χώρων στάθμευσης όπου οι ιστοί στήριξης των φωτιστικών απαιτείται να έχουν μεγάλη απόσταση. Προσφέρουν μεγαλύτερη διάχυση φωτός σε σχέση με τα full-cutoff και επιπλέον, δεν μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγάλα ύψη όπως συμβαίνει με τα semi-cutoff. Τα φωτιστικά αυτά επιτρέπουν πολύ μικρό ποσοστό να διαφύγει πάνω από το φωτιστικό.



Εικόνα 3-5 Φωτιστικό τύπου cutoff

3.6 Προδιαγραφές φωτισμού δρόμων

Στην προσπάθεια εύρεσης κάποιων κανονισμών πάνω στους οποίους πρέπει να στηριχτεί κανείς για την διεξαγωγή μελέτης φωτισμού δρόμων, καταλήξαμε πως δεν

υπάρχουν προδιαγραφές για την Ελλάδα. Για να είναι όμως δυνατή η εκτίμηση των μεγεθών δίνονται παρακάτω οι προδιαγραφές που έχουν καθοριστεί για τη Μ. Βρετανία.

Συγκεκριμένα:

1. Απόσταση πόλων

- οι πόλοι θα πρέπει να χωριστούν σε διαστήματα που δεν θα υπερβαίνουν τα 50m μεταξύ τους όταν αυτοί εγκαθίστανται στην ίδια πλευρά της οδού.
- Οι πόλοι θα πρέπει να χωριστούν σε διαστήματα που να μην υπερβαίνουν τα 100 m μεταξύ τους, όταν αυτοί βρίσκονται σε μια πλευρά της οδού και να μην υπερβαίνουν τα 50m μεταξύ εναλλασσόμενων πόλων όταν αυτοί βρίσκονται σε αντίθετη πλευρά της οδού όταν χρησιμοποιείται η διάταξη χιαστί.
- Εξαιρέσεις: Αν ο μηχανικός διαπιστώνει ότι παρουσιάζονται ιδιαίτερες περιστάσεις, μπορεί να απαιτήσει ένα διαφορετικό διάστημα μεταξύ των πόλων απ' ότι θα ίσχυε στις παραγράφους 1 ή 2 του παρόντος.

2. Απόσταση πόλου- συγκράτησης: Οι πόλοι θα πρέπει να τοποθετηθούν έτσι ώστε η κεντρική γραμμή του καθενός να μην απέχει περισσότερο από 0,66m από την πρόσοψη της συγκράτησης.

3. Ύψος στήριξης φωτιστικού σώματος:

- Μέγιστο: 10 m
- Ελάχιστο: 5,3 m

4. Μέγεθος λαμπτήρων:

- Γενικά: 70 W ατμών νατρίου υψηλής πίεσης
- Εξαιρέσεις:
 - Κύριοι δρόμοι: 70, 100, 150 ή 200W ατμών νατρίου υψηλής πίεσης.
 - Διασταυρώσεις: 70 W ατμών νατρίου υψηλής πίεσης.
 - Περιοχές με ομίχλη: 100, 150 ή 200 W ατμών νατρίου υψηλής πίεσης.
 - Εξαιρετικές ή ασυνήθιστες καταστάσεις: Όπου ο μηχανικός πόλεων διαπιστώνει ότι παρουσιάζονται εξαιρετικές ή ασυνήθιστες καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης να παρασχεθεί ο εντατικότερος φωτισμός για να προωθηθεί η ασφαλής είσοδος και έξοδος, μπορεί να απαιτήσει 100, 200 ή 250 W ατμών νατρίου υψηλής πίεσης.
 - Ανάλυση κόστους-κέρδους: Θα πρέπει να εγκριθεί ή να απαιτηθεί μια εξαίρεση στη γενική απαίτηση μεγέθους λαμπτήρων, μετά από ανάλυση κόστους-κέρδους.

3.7 Φωτορύπανση και κατάχρηση φωτός

Με την αύξηση των δραστηριοτήτων των ανθρώπων κατά τις νυχτερινές ώρες το θέμα της φωτορύπανσης και της κατάχρησης του φωτός έγινε ιδιαίτερα σημαντικό. Αυτά τα ζητήματα θα πρέπει να εκτιμώνται κάθε φορά που φωτιστικό εξωτερικού χώρου, συμπεριλαμβανομένου και του φωτιστικού δρόμου, τοποθετείται [19].

Η φωτορύπανση μπορεί να είναι είτε αστρονομική είτε ατμοσφαιρική, ή και τα δύο. Προκαλείται από το αδέσποτο ή ανακλώμενο φως. Η σκόνη, η υγρασία και άλλες ρυπαντικές ουσίες ανακλούν αυτό το φως, προκαλώντας λάμψη του ουρανού πάνω από πολλές αστικές περιοχές. Παρόλο που η λάμψη αυτή δεν είναι επιβλαβής για τους ανθρώπους, μπορεί να προκαλέσει περισπασμό σε αστρονομικές παρατηρήσεις αλλά και στην συμπεριφορά των ζώων.

Η αστρονομική φωτορύπανση αφορά περιοχές όπου εδρεύουν αστεροσκοπεία. Εκτός από τα μεγάλα αστεροσκοπεία, υπάρχουν πολλά μικρότερα κοντά ή σε πανεπιστήμια που ασχολούνται με τη διδασκαλία ή την έρευνα. Η χρήση μονοχρωματικής φωτεινής πηγής, όπως είναι ο λαμπτήρας ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης, που μπορούν να εξαιρεθούν με ειδικά φίλτρα, προτιμάται από τους αστρονόμους. Παρόλα αυτά το εγχείρημα αυτό δεν μπορεί να μειώσει την ατμοσφαιρική φωτορύπανση. Για τον έλεγχο της καλό είναι τα συστήματα φωτισμού δρόμου, αλλά και γενικότερα τα συστήματα φωτισμού εξωτερικού χώρου, να σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση ή ακόμα και η εξάλειψη της εκπομπής φωτός πάνω από τον οριζόντιο άξονα. Πρέπει, όμως, να γίνει αντιληπτό πως δεν είναι δυνατό να εξαλειφθεί πλήρως το ανοδικό φως, αφού το ανακλώμενο φως από το έδαφος ή το οδόστρωμα είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ανοδική εκπομπή.

Η κατάχρηση του φωτός είναι ένα υποκειμενικό ζήτημα, αφού σχετίζεται με μια αμέτρητη ή απροσδιόριστη ποσότητα σε πολλές περιπτώσεις, που συχνά δεν μπορεί να ελεγχθεί. Η κατάχρηση φωτός μπορεί να ταξινομηθεί σε ανεπιθύμητο φως που φωτίζει μια περιοχή και σε υπερβολική λαμπρότητα στο κανονικό πεδίο όρασης. Για την αποφυγή του ανεπιθύμητου αυτού φαινομένου προτείνεται η επιθεώρηση των παρακείμενων περιοχών του συστήματος, για την εξακρίβωση πιθανών προβλημάτων, τα οποία θα μελετηθούν για το σχεδιασμό του συστήματος. Επίσης, θα πρέπει να επιλεγεί εξοπλισμός ο οποίος δεν θα έχει υψηλή απόδοση φωτισμού, ενώ θα πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή της θέσης του συστήματος, του ύψους του ιστού φωτισμού και της απόδοσης του φωτιστικού, ώστε να επιτευχθεί ο περιορισμός του φωτός στην περιοχή που είναι επιθυμητό με βάση τον σχεδιασμό του συστήματος.

4 Λαμπτήρες

4.1 Γενικά

Η επιλογή ενός λαμπτήρα εξαρτάται από ορισμένα μεγέθη με τα οποία είναι απαραίτητο να υπάρχει εξοικείωση, ώστε να ληφθεί η καταλληλότερη απόφαση για τον ζητούμενο λαμπτήρα. Τα θεμελιώδη αυτά μεγέθη δίνονται παρακάτω και εξηγούνται περιληπτικά [20]:

- ↓ Φωτεινή ένταση (cd) : ορίζεται ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής $d\Phi$ που εκπέμπει μια σημειακή πηγή μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία $d\omega$, προς τη γωνία αυτή $=\left(\frac{d\Phi}{d\omega}\right)$
- ↓ Βαθμός απόδοσης φωτεινής πηγής η (lm/ W) : είναι μέγεθος αντίστοιχο του βαθμού απόδοσης των κινητήρων για τις φωτεινές πηγές, όπου η αποδιδόμενη ενέργεια είναι η φωτεινή και δίνεται από τη σχέση: $\eta = \frac{\Phi}{P_{\eta}}$, όπου Φ η φωτεινή ροή του λαμπτήρα και P_{η} η καταναλισκόμενη από τον λαμπτήρα Ηλεκτρική ισχύς.

Σε μερικά είδη λαμπτήρων δεν καταναλώνεται όλη η ηλεκτρική ισχύς για την παραγωγή φωτός και αυτό γιατί ο λαμπτήρας συνοδεύεται από διάφορα εξαρτήματα όπως είναι το στραγγαλιστικό πηνίο και ο πυκνωτής διόρθωσης συνημίτονου, τα οποία κυρίως ευθύνονται για τις απώλειες του συστήματος. Είναι καλό αυτές οι απώλειες να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη για την εκτίμηση της ποιότητας των φωτιστικών σωμάτων.

Στον Πίνακα 4-1 που ακολουθεί δίνεται η φωτεινή απόδοση ορισμένων τύπων λαμπτήρων, έτσι όπως προσφέρονται από τους κατασκευαστές.

Πίνακας 4-1 Φωτεινή απόδοση κοινών τύπων λαμπτήρων

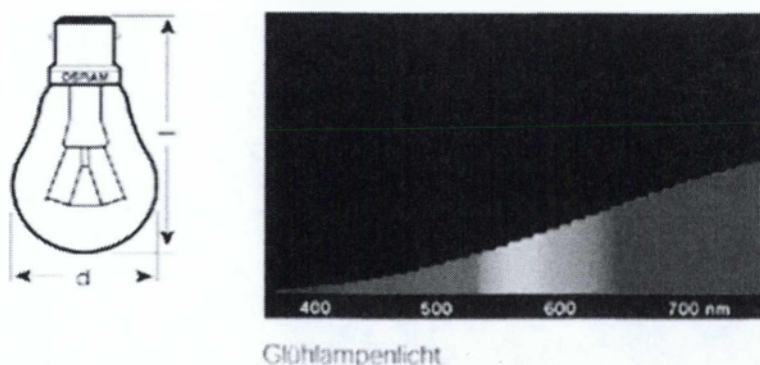
ΕΙΔΟΣ ΛΑΜΠΤΗΡΑ	ΑΠΟΔΟ ΣΗ [lm/W]	ΟΝΟΜ ΙΣΧΥΣ [W]	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣ H [lm/W]	ΛΑΜΠΤΗΡΑ ΦΩΤ.ΙΣΧΥΣ [lm]
ΠΥΡΑΚΤΩΣΕΩΣ	9-20	40	10	430
		100	13.8	1380
ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ	40-80	40	80	3200
		65	77	5000
ΝΑΤΡΙΟΥ	100-200	180	183	33000
ΑΛΟΓΟΝΟΥ	10-30	1000	22	22000

4.2 Λαμπτήρες για φωτισμό δρόμων

Γενικά οι τύποι λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φωτισμού δρόμων δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4-2 [21]:

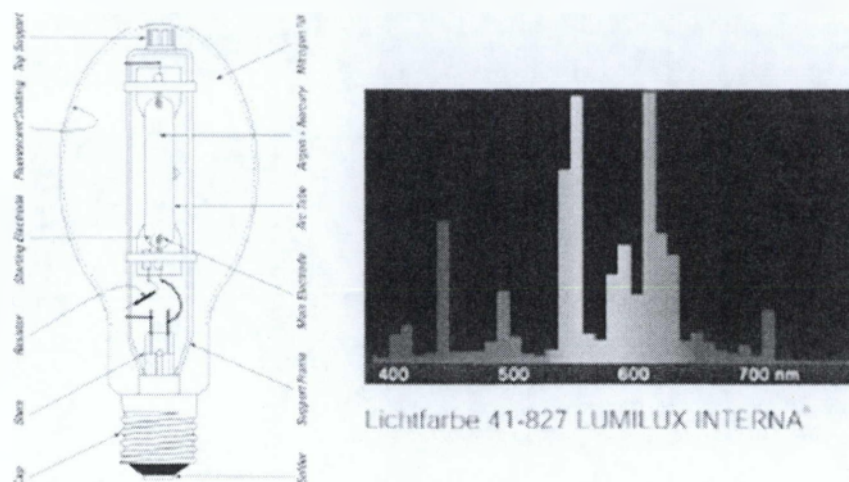
ΕΙΔΟΣ ΛΑΜΠΤΗΡΑ	ΦΩΤ.ΙΣΧΥΣ [lm*10 ³]	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ [lm W]	ΖΩΗ ΛΑΜΠ. [hour*10 ³]
ΠΥΡΑΚΤΩΣΕΩΣ	0.6-15	9.7-17.4	1-2
ΑΤΜΩΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ	3.7-57	37-57	18-28
ΑΤΜΩΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΦΩΣΦΟΡΟΥΧΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ	4.0-63	40-63	18-28
ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΛΟΓΟΝΙΔΙΩΝ	34-100	85-100	10-15
ΝΑΤΡΙΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	9.5-140	95-140	15-28
ΝΑΤΡΙΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	1.8-33	100-183	10-18

Πίνακας 4-2 Χαρακτηριστικά λαμπτήρων φωτισμού δρόμων



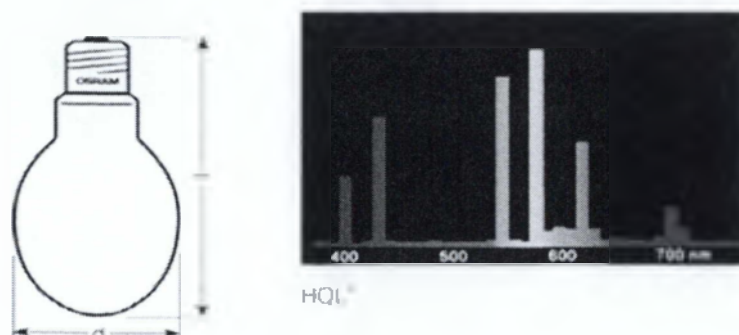
Εικόνα 4-1 Λαμπτήρας Πυράκτωσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του

1. Οι λαμπτήρες πυράκτωσης (Εικόνα 4-1) χρησιμοποιούνταν ευρύτατα στο παρελθόν. Παρόλα αυτά η χαμηλή τους απόδοση και η μικρή χρονική διάρκεια ζωής τους, έκαναν τους λαμπτήρες πυράκτωσης ανεπιθύμητους για νέες εγκαταστάσεις



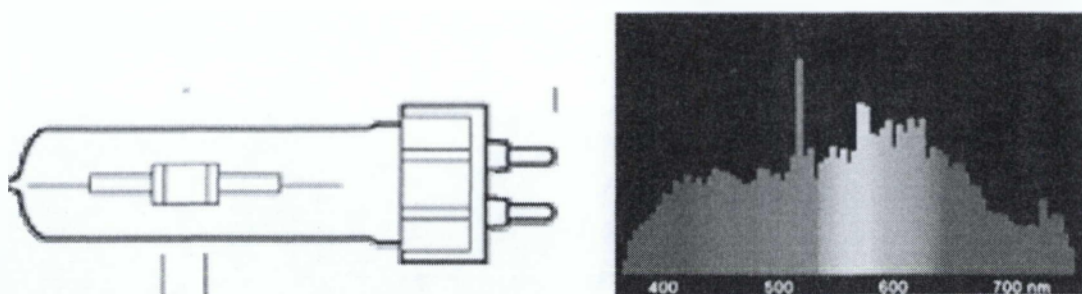
Εικόνα 4-2 Λαμπτήρας ατμών υδραργύρου και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του

2. Οι λαμπτήρες **ατμών υδραργύρου** (Εικόνα 4-2) αντικατέστησαν στην πλειοψηφία τους, τους λαμπτήρες πυράκτωσης. Το αρχικό τους κόστος είναι υψηλό και απαιτείται και η χρήση ballast, όμως η υψηλή τους απόδοση και η μεγάλη χρονική διάρκεια ζωής τους, τους κάνουν περισσότερο επιθυμητούς από τους λαμπτήρες πυράκτωσης. Το μπλε- λευκό χρώμα του καθαρού λαμπτήρα είναι γενικά αποδεκτό. Ένας λαμπτήρας φωσφορούχου επίστρωσης (Εικόνα 4-3) χαρακτηρίζεται από υψηλότερη έξοδο και περισσότερο ευχάριστη απόδοση χρώματος. Παρόλα αυτά η πηγή φωτός είναι το μέγεθος του περιβλήματος του λαμπτήρα, που παρουσιάζει το πρόβλημα στον έλεγχο του φωτός.



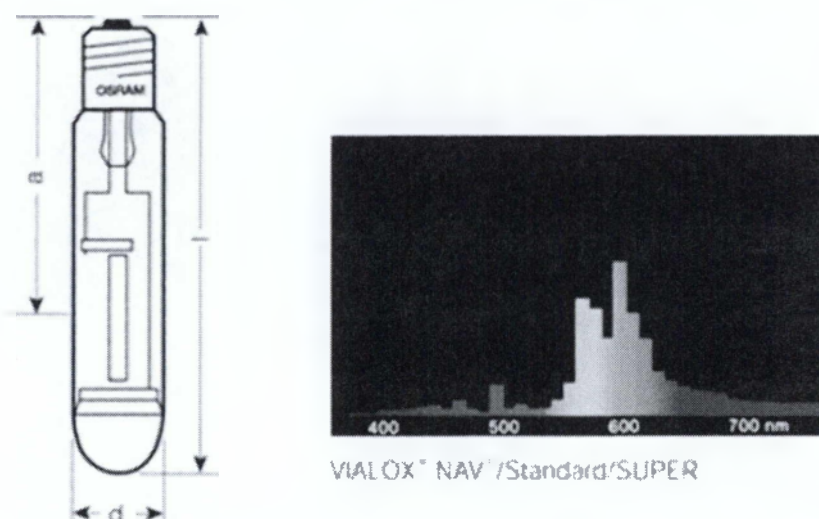
Εικόνα 4-3 Λαμπτήρας ατμών υδραργύρου φωσφορούχου επίστρωσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του

3. Ο λαμπτήρας **μεταλλικών αλογονιδίων** (Εικόνα 4-4) είναι ένας τύπος λαμπτήρα υδραργύρου του οποίου ο σωλήνας τόξων περιέχει συγκεκριμένα μεταλλικά αλογονίδια που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και την απόδοση του χρώματος, χωρίς τη χρήση λαμπτήρα φωσφορούχου επίστρωσης. Το μέγεθος της πηγής φωτός είναι αυτό ενός σωλήνα τόξων, επιτρέποντας τον καλό έλεγχο του φωτός με το ίδιο προσάρτημα που χρησιμοποιείται για τους λαμπτήρες καθαρού υδραργύρου.



Εικόνα 4-4 Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων και το διάγραμμα φασματικής κατανομής του

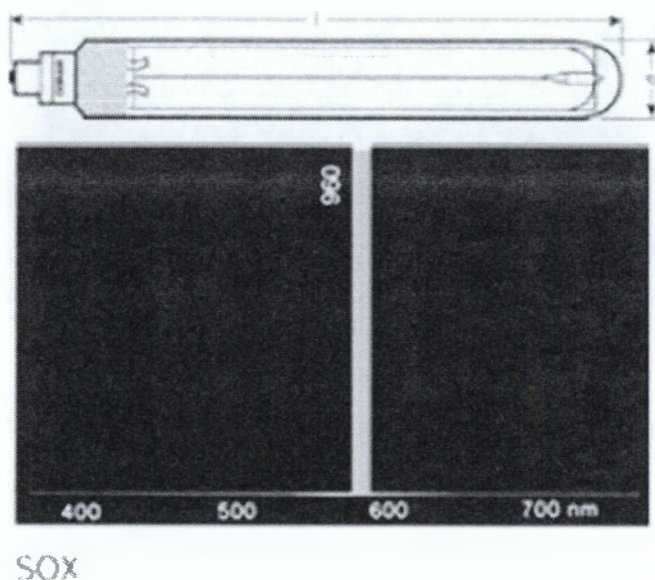
4. Ο λαμπτήρας **νατρίου υψηλής πίεσης** (Εικόνα 4-5) έχει προς το παρόν αντικαταστήσει τον λαμπτήρα υδραργύρου. Χαρακτηρίζεται από την παραγωγή χρυσού- λευκού χρώματος φωτός. Οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης είναι συνήθως χρησιμοποιούμενοι με ειδικά ballast που παρέχουν την απαιτούμενη υψηλή τάση για την έναυση του λαμπτήρα. Παρόλα αυτά, οι λαμπτήρες είναι διαθέσιμοι να χρησιμοποιούν ballast από ορισμένους τύπους λαμπτήρων ατμών υδραργύρου, αλλά με φτωχότερη απόδοση και πιο σύντομη ζωή. Υπάρχουν ακόμα λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης που παρέχουν βελτιωμένη απόδοση χρώματος ή σχεδόν στιγμιαίο καινούριο ξεκίνημα μετά από μια διακοπή ισχύος καθένα από τα χαρακτηριστικά έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εκτιμημένης ζωής.



Εικόνα 4-5 Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής

5. Ο λαμπτήρας **νατρίου χαμηλής πίεσης** (Εικόνα 4-6) χαρακτηρίζεται από την παραγωγή ενός μονοχρωματικού κίτρινου χρώματος φωτός. Αυτοί οι λαμπτήρες απαιτούν ειδικά ballast και αυξάνουν σε μέγεθος ως προς το υλικό τους με την αύξηση των Watt, για παράδειγμα ένας λαμπτήρας 185W έχει μήκος 1,118m. Εξαιτίας του μεγάλου αυτού μεγέθους είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί ένας καλός έλεγχος φωτός για ένα εύλογο μέγεθος προσαρτήματος. Για αρκετό καιρό η φτωχή χρωματική απόδοση των λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης την οδήγησε να μην είναι δημοφιλής για χρήση σε άλλες εφαρμογές, εκτός των βιομηχανικών και ασφάλειας. Παρόλα αυτά η σύγχρονη τάση απέναντι στην συντήρηση της ενέργειας σε συνδυασμό με την υψηλή αποτελεσματικότητα των λαμπτήρων έχουν οδηγήσει στην αύξηση της δεκτικότητας των λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης για φωτισμό

εμπορικών και κατοικημένων περιοχών. Προς το παρόν οι διαθέσιμοι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης έχουν σημαντική διατήρηση των lumen, χωρίς να έχει πτώση στην παραγωγή του φωτός, αν και η καταναλισκόμενη ενέργεια αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου.



Εικόνα 4-6 Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης και το διάγραμμα φασματικής κατανομής

Όλοι οι λαμπτήρες φωτισμού δρόμων, με εξαίρεση τους λαμπτήρες πυράκτωσης κυκλώματος σειράς και ορισμένους λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης, πάσχουν από το κοινό πρόβλημα της υποτίμησης των lumen, δηλαδή τη μείωση της παραγωγής φωτός κατά τη διάρκεια της ζωής του λαμπτήρα. Η μείωση της παραγωγής φωτός ποικίλει ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση του λαμπτήρα.

4.3 Σύγκριση φωτεινών πηγών

Η επιλογή της κατάλληλης πηγής φωτισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική για το σχεδιασμό φωτισμού αστικών περιοχών. Στον Πίνακα 4-3 δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των λαμπτήρων αυτών. Τα μεγέθη περιορίζονται σε αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αστικές περιοχές.

Πίνακας 4-3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας διαφόρων λαμπτήρων

Κατηγορία λαμπτήρα		Wattage:	Ονομαστικές τιμές Φωτεινότητας	Αποδοση (lm/watt)	Αποδοση χρώματος	Θερμότητα χρώματος	Διάρκεια ζωής
Πυρακτώσης:	Βολφραμίου	40-200	400-2730	10-14	A	X	συντομή
	Αλογονιδίου βολφραμίου	150-1500	2100-33000	14-22	A	X	συντομή
	Καθαρού και χρωματιστού αναλυστήρα	100-500	820-5600	8-11	A (καθαρό)	X	συντομή
Φθορισμού	Βασικός τύπος	8-65	420-4750	30-61	Ποικίλει ανάλογα με τον φωσφόρο	Πλήρες φάσμα	Μεγάλη
	Συμπαγής τύπος	9-37	600-2757	44-66	Ποικίλει ανάλογα με τον φωσφόρο	Πλήρες φάσμα	Μεσαία
Υδραργυρού υψηλής πίεσης:	Καθαρό μπλε	80-400	3650-18000	39-42	E	Z	Μεγάλη
	Επιστροφή φθορίου	50-400	1900-21500	30-42	D	X-Y	Μεγάλη
	Μίγμα βολφραμίου	100-500	1100-11500	11-23	D	Y	Μεγάλη
	υδραργυρού αναλυστήρας	50-400	1800-20000	28-46	D	X-Y	Μεγάλη
Metal halide	Καθαρό	250-400	16000-24000	57-55	B-C	Y	Μεγάλη
	Με επιστροφή γραμμικό	250-400	17500-25000	63-57	C	Y	Μεγάλη
	750-1600	58500-115000	71-72	B	Y-Z	Μεσαία	
	Συμπαγής πηγή και αναλυστήρας	400-1000	27000-81000	61-74	B	Y	Μεγάλη
Νατρίου υψηλής πίεσης:	Βασικός	50-400	3100-47000	56-107	E	X	Μεγάλη
	Βελτιωμένο φάσμα χρώματος	150-400	12500-44000	74-100	C-D	X	Μεγάλη
	Υψηλό φάσμα χρώματος	110-400	10440-40000	60-88	B	X	Μεγάλη
Νατρίου χαμηλής πίεσης:	Βασικός	18-180	1800-33000	68-155	-	-	Μεγάλη

<i>Επεξήγηση στοιχείων του πίνακα 4-3</i>	
Πίνακας φάσματος χρώματος:	A= μεγαλύτερο από 90 B=80-90 C=60-80 D=40-60 E=μικρότερο από 40
Θερμοκρασία χρώματος:	X= χαμηλότερο από 3300 K Y= 3300-5500 K Z= μεγαλύτερη από 5500 K
Διάρκεια ζωής:	Σύντομη= λιγότερο από 2000 h Μεσαία= 2000- 7000h Μεγάλη= περισσότερες από 7000

5 Καταγραφή και επεξεργασία μετρήσεων Ηλιακής

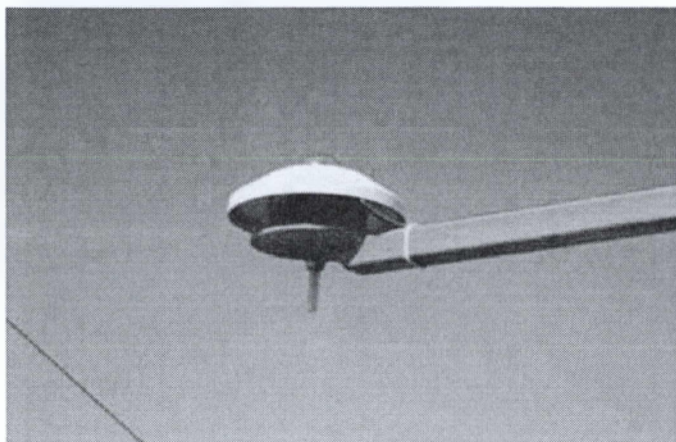
Ακτινοβολίας

5.1 Αναζήτηση μετρήσεων

Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ο υπολογισμός της προσφερόμενης από τον ήλιο ενέργειας. Δεδομένα της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκονται στην διεθνή βιβλιογραφία καθώς και στις βάσεις δεδομένων των μετεωρολογικών υπηρεσιών [22]. Οι εμπειρικοί τύποι για τον υπολογισμό της απολαβής από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες βασίζονται στην ονομαστική ισχύ που δίνεται από τον κατασκευαστή και την στατιστικά μέση ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας της εξεταζόμενης περιοχής που εξάγονται από τους χάρτες ηλιακού δυναμικού. Οι χάρτες του ηλιακού δυναμικού παρουσιάζουν τις διάφορες γεωγραφικές ζώνες όπου η ηλιακή ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο είναι ίση. Όπως αναφέρθηκε οι χάρτες αναφέρουν μόνο το μέσο όρο για ολόκληρο το έτος κάτι που δεν είναι επαρκές για μελέτη της ηλιακής ενέργειας ανά μήνα ή και πιο λεπτομερειακά. Ένα χρήσιμο συμπέρασμα που εξάγεται όμως από τους χάρτες ηλιακού δυναμικού είναι ότι δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί πόσο μεγαλύτερη ή μικρότερη είναι η ηλιακή ακτινοβολία από περιοχή σε περιοχή. Για παράδειγμα η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Κρήτης είναι κατά 10% μεγαλύτερη από ότι στην περιοχή της Αττικής και 5% από την περιοχή της Σπάρτης. Στην συγκεκριμένη μελέτη επιλέγεται να μελετηθεί και να διαστασιολογηθεί το σύστημα στην περίπτωση που εγκαθίσταται στην περιοχή της Σπάρτης και της ευρύτερης περιοχής της κεντρικής Ελλάδας. Τα δεδομένα από την βιβλιογραφία και τους χάρτες ηλιακού δυναμικού περιορίζονται σε μια μέση ετήσια ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί στατιστικό μέγεθος που δεν επαρκεί για την συγκεκριμένη μελέτη όπου χρειάζονται πιο αναλυτικά δεδομένα. Η αναζήτηση έγινε σε μετεωρολογικές υπηρεσίες και αστεροσκοπεία. Αναλυτικές καταγραφές βρέθηκαν στην Μετεωρολογική Υπηρεσία του Μετσοβίου Πολυτεχνείου (N.T.U.A. METEO) [23].

5.2 Επιλογή Χρονοσειράς

Η επιλεγμένη μετεωρολογική υπηρεσία είναι μια ολοκληρωμένη υπηρεσία του



Μετσοβίου Πολυτεχνείου που με κατάλληλους αισθητήρες καταγράφει όλα τα μετεωρολογικά δεδομένα όλο το 24ωρο για όλη την διάρκεια του έτους. Στον τομέα της ηλιακής ακτινοβολίας η υπηρεσία διαθέτει ένα πυρανόμετρο ακριβείας. Το όργανο αυτό είναι τοποθετημένο στην περιοχή της πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου στην Αθήνα. Το EP08 Πυρανόμετρο έχει σχεδιαστεί ως ένα αξιόπιστο

και εύχρηστο όργανο. Δίδει αξιόπιστες μετρήσεις της ακτινοβολίας του ήλιου και ικανοποιεί τις προδιαγραφές ενός ISO9060 A τάξης πυρανομέτρου. Επίσης ικανοποιεί τα κριτήρια του WMO A τάξης πυρανομέτρου. Το σώμα του EP08 είναι κατασκευασμένο από ειδικό βαθμονομημένο αλουμίνιο το οποίο έχει επιμελώς ανοδιοθεί με σκοπό την απόκτηση ενός ανθεκτικού στη διάβρωση υλικού. Το ομοιόμορφα κατανεμημένο πλαστικό βάθρο του απομονώνει θερμικά τη μονάδα από τη βάση στήριξής της και είναι εύκολα προσβάσιμο για εύκολη οριζοντίωση. Το αλουμινένιο σκέπαστρο που είναι επικαλυμμένο με πολυουρεθάνη ενώνεται με το σώμα με συνδετήρες. Το ξηραντικό υλικό είναι ορατό μέσω ενός διαφανούς καλύμματος και μετά την απομάκρυνση του δίσκου μπορούμε να έχουμε άμεση πρόσβαση σε αυτό. Το ξηραντικό υλικό εμποδίζει την εσωτερική συμπύκνωση εντός των θόλων. Το επίπεδο της φυσαλίδας που χρησιμεύει για την οριζοντίωση του οργάνου είναι επίσης ορατό διαρκώς για να εξασφαλίζεται η απόλυτη οριζοντίωση του αισθητήρα. Οι θόλοι, εσωτερικός και εξωτερικός, είναι πολύ λεπτοί για να σταθεροποιούνται από άποψη θερμοκρασίας πολύ γρήγορα. Ο εσωτερικός γυάλινος θόλος περιέχει αέρα που δεν κινείται, γύρω από τον αισθητήρα για την ελαχιστοποίηση της απόκλισης κατά την απώλεια ενέργειας λόγω μεταγωγής από τον αισθητήρα. Ο εξωτερικός θόλος απομονώνει τον εσωτερικό από τον άνεμο, τη βροχή και από θερμικά ρεύματα. Ο αισθητήρας αποτελείται από μια κυλινδρική με πολλές ενώσεις (κόμβοι) θερμοπύλη. Οι ζεστές ενώσεις της θερμοπύλης είναι συγκολλημένες σταθερά σε μια μαύρη αισθητήρια πλάκα ενώ οι κρύες ενώσεις είναι στέρεα συνδεδεμένες σε μια αλουμινένια βάση που έρχεται άμεσα σε επαφή με το σώμα του οργάνου. Η βάση του αισθητήρα έχει στην περίμετρό της ένα αγκιστρωμένο κάλυμμα. Η έκθεση του καλύμματος αυτού σε χαμηλές ηλιακές ακτινοβολίες ελέγχεται από το ύψος της ρυθμιζόμενης αλουμινένιας βάσης έτσι ώστε το συνημίτονο απόκρισης κάθε οργάνου να μπορεί να τεθεί ξεχωριστά κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Σε δέκα βαθμούς ανύψωσης το σφάλμα του συνημίτονου αλλάζει κατά 5% του ιδεατού για κάθε 0.1mm αλλαγής του ύψους του αισθητήρα. Η έξοδος από τον αισθητήρα εξισορροπείται θερμικά με τη χρήση ενός καμπύλου θερμίστορ εμπεδωμένου στη βάση του αισθητήρα. Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το μαυρισμένο δίσκο του αισθητήρα προκαλεί ανύψωση της θερμοκρασίας του. Αυτό στη συνέχεια προκαλεί μια βαθμωτή μεταβολή θερμοκρασίας μεταξύ των ζεστών και των κρύων ενώσεων της θερμοπύλης που τελικά δημιουργεί μια γραμμική έξοδο ανάλογη προς το μέγεθος της ακτινοβολίας. Ο επισκιασμένος δίσκος βοηθά το σώμα του οργάνου να διατηρεί θερμική ισορροπία μονώνοντας το από την άμεση ακτινοβολία ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει το φυσικό αερισμό διαμέσου μικρών διακένων στο λαιμό του

δίσκου. Ταχεία μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μπορεί επίσης να προκαλέσει αρνητικά ή θετικά σήματα σφάλματος κατά τη διάρκεια που το όργανο δεν ευρίσκεται σε θερμική ισορροπία.

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της χρονοσειράς του μετρητή. Για τον σκοπό αυτό γίνεται η επιλογή ενός συγκεκριμένου έτους το οποίο και θεωρείται κανονικό μετεωρολογικά έτος. Το έτος αυτό είναι το 2001 και θεωρείται ως βάση για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας και την διαστασιολόγησης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο συγκεκριμένος μετρητής παίρνει μετρήσεις κάθε 10 λεπτά και καταγράφονται σε βάση δεδομένων της υπηρεσίας. Για μεγαλύτερη ακρίβεια ζητήθηκε η χρονοσειρά καταγραφών από 1η Ιανουαρίου έως 31 Δεκεμβρίου του 2001. Ως βήμα επιλέχθηκε το μικρότερο δυνατό, δηλαδή ανά 10 λεπτά της ώρας. Το σύνολο της χρονοσειράς αποτελείται από περίπου 53.000 μετρήσεις για ολόκληρο το έτος.

5.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

Οι μετρήσεις εισάγονται σε λογιστικό φύλλο εργασίας και με κατάλληλη εφαρμογή της Visual Basic επεξεργάζονται. Στο σύνολο των μετρήσεων περιέχονται μηδενικές καθώς και αρκετά μικρές μετρήσεις που αντιπροσωπεύουν τις νυχτερινές ώρες. Οι μετρήσεις αυτές διαγράφονται καθώς δεν συνεισφέρουν στην αποδιδόμενη από την φωτοβολταϊκή κυψέλη ενέργεια. Οι μετρήσεις του πυρανομέτρου που είναι μεγαλύτερος από 0.002kW/m^2 αποτελούν τις τιμές από τις οποίες εξάγονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Η διάρκεια της ηλιοφάνειας για κάθε ημέρα υπολογίζεται από τον αριθμό των μετρήσεων για την συγκεκριμένη ημέρα (που είναι μεγαλύτερες από 0.002kW/m^2) πολλαπλασιαζόμενες με τα 10 λεπτά που μεσολαβεί μεταξύ δύο μετρήσεων. Υπολογίζοντας την ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας συγχρόνως υπολογίζεται και η διάρκεια του σκότους, δηλαδή η διάρκεια της νύχτας.

Το βασικότερο αποτέλεσμα από της επεξεργασία των μετρήσεων είναι η εξαγωγή της μέσης ημερήσιας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που γίνεται από τον μέσο όρο των μετρήσεων για κάθε ημέρα του έτους. Σε σχέση με τους χάρτες ηλιακού δυναμικού και την βιβλιογραφία στην συγκεκριμένη μελέτη έγινε ακριβής υπολογισμός της ημερήσιας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας για ένα έτος που αποτελεί ένα κανονικό μετεωρολογικό έτος. Στο Διάγραμμα 5.1 φαίνεται η ετήσια ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι τιμές των μετρήσεων όπως αναφέρθηκε είναι σε kW/m^2 . Έχοντας υπολογίσει την μέση ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας και την διάρκεια που ο ήλιος δίνει την ισχύ αυτή μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε και την μέση ημερήσια ενέργεια που προσπίπτει σε 1 m^2 . Το μέγεθος αυτό είναι ανεξάρτητο από το τι είδους φωτοβολταϊκή κυψέλη θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα και δίνει μια τάξη μεγέθους για την μέγιστη ηλιακή ενέργεια που διατίθεται ανά τετραγωνικό μέτρο και ανά ημέρα στην πόλη της Σπάρτης. Στο Διάγραμμα 5.2 φαίνεται η ετήσια κατανομή της ηλιακής ενέργειας.

5.4 Μετασχηματισμός τιμών για κεκλιμένο επίπεδο

Το πυρανόμετρο, από το οποίο προήλθαν οι μετρήσεις, μετρά την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια, σε σχέση με το έδαφος επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή η

περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων θα αναφέρεται σε φωτοβολταϊκό πάνελ το οποίο είναι τοποθετημένο σε οριζόντιο επίπεδο.

Στις εφαρμογές που γίνεται χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας το φωτοβολταϊκό πάνελ έχει μια ορισμένη κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο καθώς και έναν προσανατολισμό, τα οποία εξαρτώνται από την γεωγραφική θέση της εγκατάστασης. Η ρύθμιση της κλίσης και του προσανατολισμού γίνονται με σκοπό την μεγαλύτερη δυνατή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην διάρκεια του έτους ή σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Υπάρχουν διάφορες τυποποιημένες κλίσεις για κάθε περιοχή ώστε να γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του ηλιακού δυναμικού [24], [25]. Στην περίπτωση της έρευνας αυτής τα δεδομένα που έχουν επεξεργαστεί αναφέρονται στο οριζόντιο επίπεδο. Για αυτόν τον λόγο δεν είναι δυνατόν να βγει κάποιο άμεσο συμπέρασμα για την συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πάνελ σε διάφορες κλίσεις σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Η μοναδική λύση είναι να μετασχηματιστούν οι μετρήσεις από το πυρανόμετρο (οριζόντιο επίπεδο) σε κεκλιμένο επίπεδο υπό συγκεκριμένη γωνία. Για τον μετασχηματισμό των μετρήσεων υπάρχουν ορισμένες μαθηματικές μεθοδολογίες από τις οποίες με δεδομένα μετρήσεις της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο μετασχηματίζονται σε τιμές τις προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη στηρίζεται στους παρακάτω μαθηματικούς τύπους:

$$H_t = (H - H_d)R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H^* \rho_s \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Όπου

H_t = η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο

H : οι τιμές των μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας (από το πυρανόμετρο)

β : η κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (0° έως 90°)

ρ_s : συντελεστής ανάκλασης (=0.2)

$R_b = (\cos(\varphi - \beta)\cos(\delta)\sin(\omega_{ss}) + (\omega_{ss})\sin(\varphi - \beta)\sin(\delta)) /$
 $(\cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s) + \omega_{ss}\sin(\varphi)\sin(\delta))$

φ : το γεωγραφικό πλάτος (= 38° για την κεντρική Ελλάδα)

δ : η ηλιακή απόκλιση ($= 23.45 \sin(2\pi((284 + n)/365))$)

$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\varphi)\tan(\delta))$

$\omega_{ss} = \min(\omega_s, \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta)\tan(\delta)))$

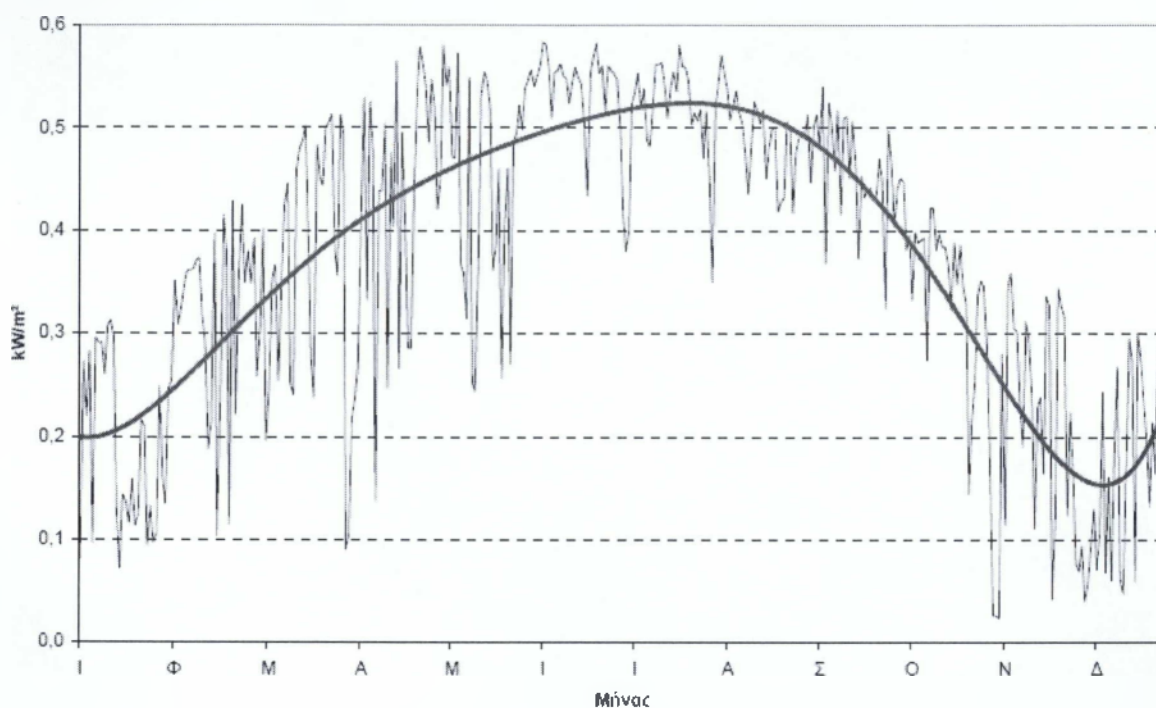
$H_d = H(1.391 - 3.569K + 4.189K^2 - 2.137K^3)$, $\omega_s < 81,4^\circ$

$H_d = H(1.311 - 3.022K + 3.427 K^2 - 1.82K^3)$, $\omega_s > 81,4^\circ$

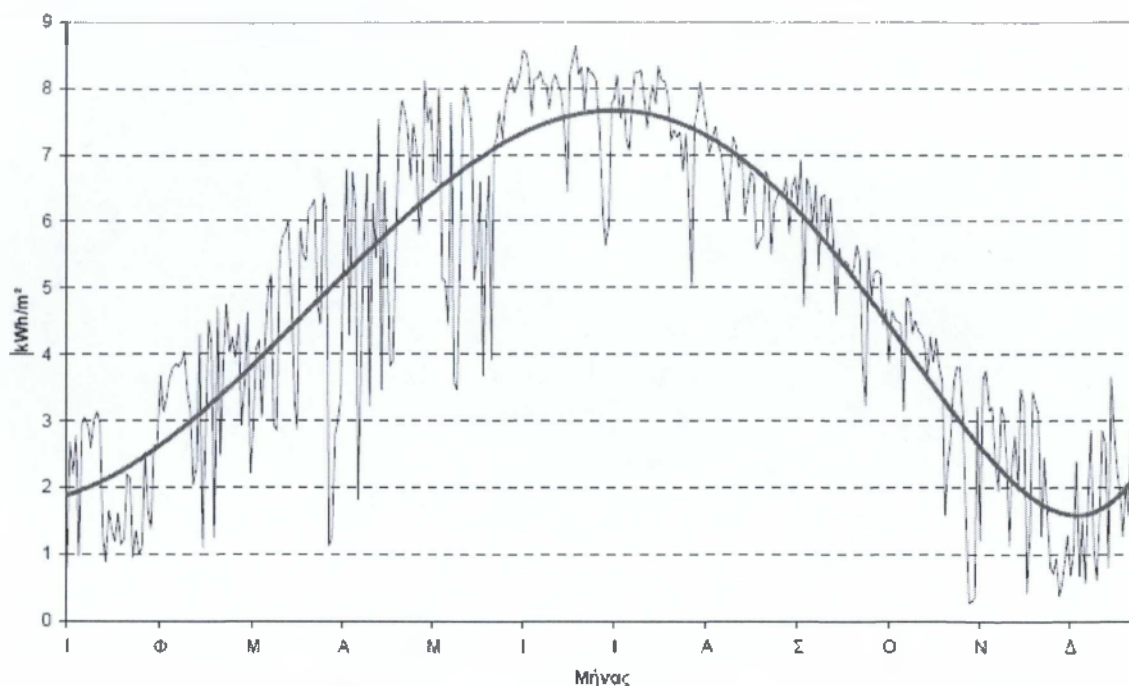
K = ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας που περνά από την ατμόσφαιρα προς την ηλιακή ακτινοβολία πριν από την ατμόσφαιρα

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους υπολογίζεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσκύπτει σε κεκλιμένο επίπεδο για διάφορες γωνίες του φωτοβολταϊκού πάνελ. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στο Διάγραμμα 5.3.

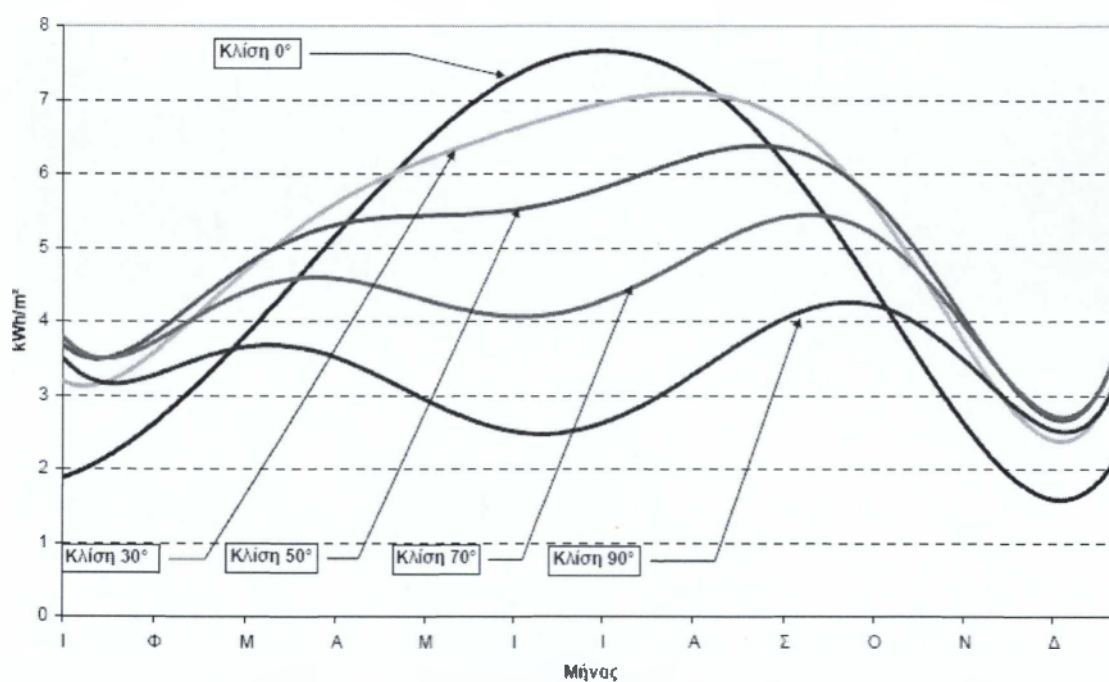
Από το διάγραμμα είναι φανερό ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο αυξανόμενης της κλίσης μειώνεται κατά τους θερινούς μήνες και αυξάνεται κατά τους χειμερινούς με αποτέλεσμα την ομαλοποίηση της καμπύλης του Διαγράμματος 5.2. Η αυξομείωση αυτή όμως έχει ένα όριο κλίσης περίπου στις 80° πάνω από το οποίο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία κατά τους θερινούς μήνες γίνεται μικρότερη ακόμα και από ότι κατά τους χειμερινούς μήνες στους οποίους η ηλιακή ακτινοβολία είναι περίπου σταθερή σε αυτές τις κλίσεις.



Διάγραμμα 5-1 Ετήσια ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο (μετρήσεις από πυρανόμετρο)



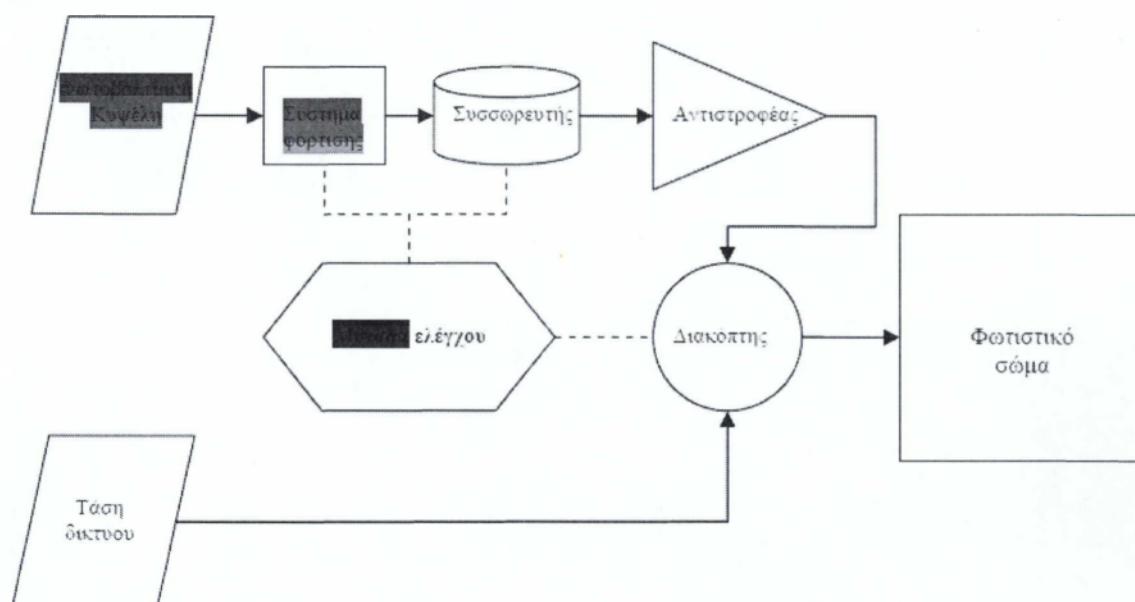
Διάγραμμα 5-2 Ετήσια μετρούμενη ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο



Διάγραμμα 5-3 Υπολογιζόμενη ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσκύπτει σε κεκλιμένο επίπεδο (υπολογισμοί για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ, από 0 έως 90 μοίρες)

6 Το Φωτοβολταϊκό Σύστημα Φωτισμού

Βασικός στόχος της μελέτης, όπως αναφέρθηκε είναι η δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος φωτισμού για τον φωτισμό δρόμου χαμηλής κυκλοφορίας. Για να είναι το σύστημα ολοκληρωμένο πρέπει κάθε μονάδα του να είναι τοποθετημένη σε κάθε ιστό φωτισμού. Για τον λόγο αυτό πρέπει να σχεδιασθεί με τέτοιο τρόπο και να διαστασιολογηθεί κατάλληλα ώστε να μπορεί με ασφάλεια να τοποθετηθεί στον κάθε ιστό. Η βασική διασύνδεση και τα μέρη του συστήματος φαίνονται στην Εικόνα 6-1.



Εικόνα 6-1 Ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα φωτισμού

6.2 Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Το βασικότερο μέρος του ολοκληρωμένου συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό σύστημα. Είναι η πηγή ενέργειας και αυτονομίας για το σύστημα [26], [27].

Αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- Την φωτοβολταϊκό πάνελ
- Τον συσσωρευτή
- Το σύστημα φόρτισης
- Τον αντιστροφέα (DC/AC Inverter)

Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

6.2.1 Φωτοβολταϊκό Πάνελ

Στις συνηθισμένες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων ο τρόπος εργασίας είναι συγκεκριμένος. Αρχικά υπολογίζεται η συνολική απαίτηση ισχύος της εγκατάστασης που χρειάζεται να τροφοδοτηθεί με ηλιακή ενέργεια. Στη συνέχεια με εμπειρικούς τύπους προσδιορίζεται ο αριθμός των φωτοβολταϊκών κυψελών που χρειάζονται. Κατόπιν προσδιορίζονται τα μεγέθη για τα μέσα αποθήκευσης της ενέργειας και του αντιστροφέα.

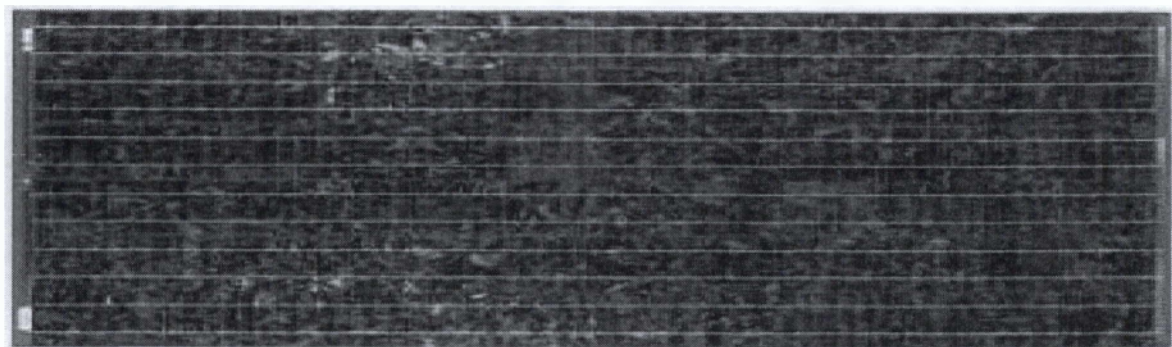
Στην περίπτωση όμως της ανάπτυξης ενός συστήματος φωτισμού δρόμου υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί. Όπως έχει αναφερθεί το σύστημα πρέπει να βρίσκεται ολοκληρωμένο σε κάθε ιστό φωτισμού ώστε να αποτελεί μια αυτόνομη μονάδα φωτισμού. Αυτό επιβάλλει την χρήση όσο το δυνατόν μικρότερου αριθμού φωτοβολταϊκών πάνελ ώστε η στήριξη να γίνεται με ασφάλεια έναντι σε ανέμους και άλλες μηχανικές και φυσικές καταπονήσεις. Επίσης για τον ίδιο λόγο το συνολικό βάρος της όλης κατασκευής πρέπει να βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια ασφαλείας.

Για τον λόγο αυτό η μελέτη του φωτοβολταϊκού μέρους του συστήματος δεν ακολουθεί την συνηθισμένη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως αλλά την αντίστροφη. Η βασική υπόθεση είναι πως σε κάθε ιστό φωτισμού θα προσαρμοσθεί ένα πάνελ φωτοβολταϊκών κυψελών και πάνω σε αυτό θα γίνει η περαιτέρω μελέτη. Η μελέτη δηλαδή βασίζεται στην υπόθεση της ύπαρξης μόνο ενός φωτοβολταϊκού πάνελ ανά ιστό φωτισμού, ενώ σε αυτό βασίζεται και ο υπολογισμός των επιμέρους στοιχείων του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στην αγορά των φωτοβολταϊκών υπάρχουν πολλές επιλογές όσο αναφορά τις διαστάσεις, το υλικό κατασκευής κλπ. Η επιλογή του φωτοβολταϊκού πάνελ μπορεί να γίνει αυθαίρετα για οποιοδήποτε μέγεθος και συνολική ισχύ που δίνεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Το πλέον λογικό είναι να επιλεγεί ένα πάνελ που οι διαστάσεις του θα του επιτρέπουν να στηριχθεί στον ιστό φωτισμού και η απόδοσή του να είναι η μεγαλύτερη δυνατή για τις συγκεκριμένες διαστάσεις. Συνήθως τα πάνελ είναι σε μεγέθη των 0.5, 1, 1.5, 2 τετραγωνικών μέτρων περίπου. Η διάσταση του ενός τετραγωνικού μέτρου είναι ιδανική για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Το πάνελ των φωτοβολταϊκών κυψελών που επιλέχθηκε είναι από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και έχει επιφάνεια 1.2m² περίπου που φαίνεται στην Εικόνα 6-2. Τα χαρακτηριστικά του αναγράφονται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1 Χαρακτηριστικά επιλεγμένου φωτοβολταϊκού πάνελ

Κωδικός Πάνελ	BP SX 150
Μέγιστη Ισχύς (P _{max})	150W
Τάση για P _{max}	34.5V
Ρεύμα για P _{max}	4.35A
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I _{sc})	4.75A
Ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης (V _{oc})	43.5V
Temperature coefficient of I _{sc}	$(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ C$
Temperature coefficient of Voltage	$-(160 \pm 20)mV / ^\circ C$
Temperature coefficient of Power	$-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ C$
NOCT	47 $\pm$ 2 $^\circ C$
Μήκος	1.593m
Πλάτος	0.790m
Βάρος	15.4Kgr



Εικόνα 6-2 Επιλεγμένο φωτοβολταϊκό πάνελ

6.2.2 Συσσωρευτής

Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν τους συσσωρευτές για να αποθηκεύσουν ενέργεια για τη χρήση κατά τη διάρκεια των περιόδων που παρατηρείται χαμηλό φως ή ακόμα και πλήρης απουσία του ήλιου. Αν και μερικές εξειδικευμένες εφαρμογές (π.χ., άντληση και συστήματα εξαερισμού, υπολογιστές) δεν απαιτούν αποθήκευση ενέργειας, τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα χρειάζονται συσσωρευτές. Η επιλογή του μεγέθους και του τύπου του συσσωρευτή είναι, επομένως, ένα σημαντικό στοιχείο προς εκτίμηση-ιδιαίτερα για τα συστήματα χωρίς back- up πηγή ενέργειας. Οι συσσωρευτές μπορούν να αποτελέσουν μόνο το 25% έως 50% των συνολικών δαπανών των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Οι διαφορετικοί τύποι επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών (επίσης γνωστών ως δευτεροβάθμιοι συσσωρευτές) μπορούν να επιλεγθούν και να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Οι συσσωρευτές που είναι αποδοτικοί

απαιτούν την ελάχιστη συντήρηση και έχουν μια μακρά αναμενόμενη ζωή. Το υψηλό αρχικό κόστος τους, εντούτοις, θα πρέπει να αποσβεσθεί μακροπρόθεσμα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι στην αγορά που σχεδιάζονται για τη χρήση στα συστήματα ανανεώσιμων μορφών ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά και αιολικά.

Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν συσσωρευτές lead-acid, όπως μόλυβδου-ασβεστίου ή μόλυβδου-αντιμονίου κι όχι τύπου αυτοκινήτων, που δεν σχεδιάζονται για την επαναλαμβανόμενη βαθιά φόρτιση.

Για ορισμένες χρήσεις, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (Ni-Cad) είναι περισσότερο κατάλληλες. Αυτοί μπορούν να φορτίζονται πολλές φορές χωρίς ζημιές και επηρεάζονται λιγότερο από τις αλλαγές θερμοκρασίας σε σχέση με τους συσσωρευτές lead-acid. Εντούτοις, οι Ni-Cad είναι αρκετά ακριβότεροι, έτσι το προστιθέμενο κόστος πρέπει να σταθμιστεί ενάντια στην αυξανόμενη αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος συντήρησής τους.

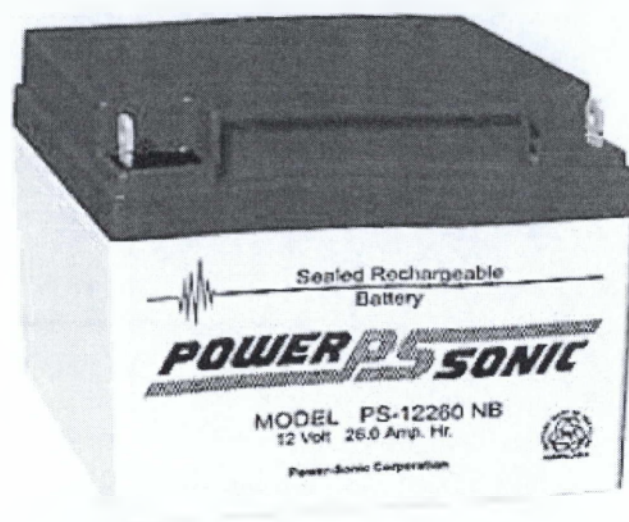
Η χωρητικότητα των συσσωρευτών εκτιμάται γενικά σε (Ah), που αποτελεί το ποσό ρεύματος που ένας συσσωρευτής θα παραδώσει κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου αριθμού ωρών υπό κανονική τάση και σε μια θερμοκρασία 25 °C. Η εκτιμώμενη χωρητικότητα οποιουδήποτε συσσωρευτή μειώνεται με τη θερμοκρασία. Το απαιτούμενο μέγεθος του καθορίζεται από το συνολικό φορτίο, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο θα λειτουργεί και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου. Αν ο συσσωρευτής πρέπει να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 0 °C, θα απαιτηθεί συσσωρευτής μεγαλύτερης χωρητικότητας για το ίδιο φορτίο.

Οι συσσωρευτές φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορούν να παρέχουν υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας αρκετές ημέρες της αποθήκευσης χωρίς φως του ήλιου. Σε περιπτώσεις όπου εμφανίζονται μεγάλες περίοδοι χωρίς ήλιο, όπως στο μακρινό Βορρά, είναι πιθανώς πιο οικονομικό να χρησιμοποιηθεί μια συνοδευτική πηγή ενέργειας παρά να υπάρξουν προσπάθειες ώστε να παρασχεθεί περισσότερο ικανοποιητική αποθήκευση. Σε αυτή και σε πολλές άλλες περιπτώσεις, η πρακτικότερη προσέγγιση είναι η χρησιμοποίηση ενός συνδυασμού back- up ενέργειας και συσσωρευτών.

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών καθορίζεται από το ποσό της ενέργειας το οποίο μπορεί να συλλέξει το φωτοβολταϊκό πάνελ και επιλέγεται ώστε να μπορεί να αποθηκεύσει την μέγιστη ενέργεια που μπορεί να συλλεχθεί κατά την διάρκεια μιας ή περισσότερων ημερών, ανάλογα με την αυτονομία που απαιτείται. Στην συγκεκριμένη μελέτη απαιτείται ο συσσωρευτής να αποθηκεύει ενέργεια αρκετή για την μεγαλύτερη περίοδο λειτουργίας της, που είναι τον χειμώνα και σε φορτίο 44W. Σύμφωνα με τα γραφόμενα στην παράγραφο 6.3 το μεγαλύτερο ωράριο λειτουργίας είναι περίπου 14 ώρες. Οπότε με απλούς υπολογισμούς ο συσσωρευτής που θα χρειαστεί το σύστημα έχει χωρητικότητα 60Ah και τύπου lead-acid. Τα χαρακτηριστικά του και ο επιλεγμένος συσσωρευτής φαίνονται στον Πίνακα 6-2 και στην Εικόνα 6-3

Πίνακας 6-2 Χαρακτηριστικά επιλεγμένου συσσωρευτή

Τάση Λειτουργίας	12V-AC
Χωρητικότητα	60Ah
Βάρος	20kgr
Διαστάσεις	25 εκ. X 17 εκ. X 20 εκ.



Εικόνα 6-3 Ο επιλεγμένος συσσωρευτής

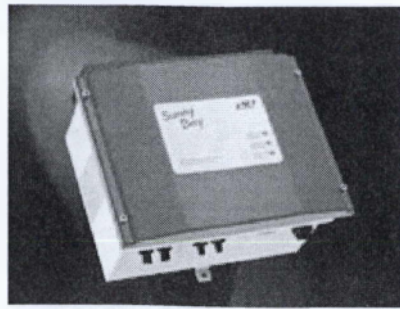
6.2.3 Αντιστροφέας (inverter)

Το τελικό στάδιο για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι η αντιστροφή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο για την τροφοδοσία του συστήματος φωτισμού της εγκατάστασης, που γίνεται με τον αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας (inverter) DC/ AC αποτελεί μια ηλεκτρονική διάταξη μετατροπής της συνεχούς τάσης των συσσωρευτών σε εναλλασσόμενη τάση με κατάλληλα χαρακτηριστικά (συνήθως 220V/ 50 Hz τριφασικό). Η επιλογή του αντιστροφέα γίνεται με βάση την ισχύ.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα παράγουν συνεχές ρεύμα (DC), και οι συσσωρευτές αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια ως συνεχές ρεύμα, αλλά η λειτουργία του φωτιστικού σώματος απαιτεί εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Ένα ποσοστό της ισχύος χάνεται στη μετατροπή, δεδομένου ότι οι αναστροφείς έχουν, κατά μέσον όρο, περίπου 90% απόδοση. Παρόλα αυτά, προκειμένου να αποφευχθούν οι απώλειες αποδοτικότητας μέσω των πτώσεων τάσης γραμμών, τα DC συστήματα απαιτούν μεγαλύτερη διάμετρο καλωδίου από τα συγκρίσιμα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Το καλώδιο, τα επιμέρους τμήματα και οι συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ευκολότερα διαθέσιμα και γενικά λιγότερο ακριβά από τα αντίστοιχα για συστήματα συνεχούς ρεύματος. Συνεπώς, οι αναστροφείς είναι απαραίτητοι για πολλά συστήματα.

Το υπό μελέτη σύστημα χρησιμοποιεί έναν inverter χαμηλής ισχύος 60W που

φαίνεται στην Εικόνα 6-4



Εικόνα 6-4 Ο επιλεγμένος inverter

6.3 Απόδοση Φωτοβολταϊκού συστήματος

6.3.1 Συντελεστής απόδοσης στοιχείων

Ο υπολογισμός της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών γίνεται συνήθως εμπειρικά με την χρήση ενός κατάλληλου τύπου, ο οποίος βασίζεται στα χαρακτηριστικά του. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού πάνελ που δίνεται από τον κατασκευαστή και οι διάφοροι συντελεστές απόδοσης, που αφορούν το υλικό και τις απώλειες από ρύπανση γήρανση κλπ. Στον τύπο αυτό χρησιμοποιείται συνήθως η μέση ετήσια ή μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία της υπό μελέτη χώρας ή περιοχής. Το αποτέλεσμα περιέχει ένα σφάλμα το οποίο είναι αποδεκτό σε περιπτώσεις που γίνεται διαστασιολόγηση συστήματος μεγάλης ισχύος όπου συνήθως υπολογίζονται τα μεγέθη με κάποια ανοχή. Στην περίπτωση του συστήματος φωτισμού λόγω των πολλών ανεξάρτητων μικρής ισχύος ιστών απαιτείται μια πιο ακριβής προσέγγιση της ισχύος που αποδίδει το σύστημα. Ο εμπειρικός τύπος χρησιμοποιείται μόνο για μια σύγκριση με την αναλυτική διαδικασία.

Για τον υπολογισμό της απολαβής του πάνελ χρησιμοποιείται ο συντελεστής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ σήμερα. Σύμφωνα με τις μελέτες που έχουν γίνει, καθώς και με αναφορές από τις κατασκευάστριες εταιρίες τα φωτοβολταϊκά φτάνουν σε απόδοση το 13%. Αυτό αναφέρεται στα φωτοβολταϊκά του εμπορίου εφόσον σε πλαίσια ερευνών και εξέλιξης έχουν κατασκευασθεί και λειτουργούν φωτοβολταϊκά με απόδοση κοντά στο 25%. Για το χρησιμοποιούμενο φωτοβολταϊκό θεωρείται μια μέση απόδοση του 12% ώστε να ομαλοποιούνται οι διακυμάνσεις σε απόδοση σε περιπτώσεις αλλαγής θερμοκρασίας, εποχής κλπ. Η τιμή αυτή της απόδοσης αντιπροσωπεύει ένα κοινό φωτοβολταϊκό με κανονική απόδοση.

Το επόμενο μέρος του συστήματος είναι τα μέσα αποθήκευσης της ενέργειας. Οι συσσωρευτές δεν έχουν σταθερή απόδοση και εξαρτάται από τον τύπο του συσσωρευτή και από τον τρόπο χρήσης. Παίζει σημαντικό ρόλο το υλικό κατασκευής των συσσωρευτών καθώς και το αν είναι βαθιάς εκφόρτισης ή όχι. Οι συσσωρευτές των φωτοβολταϊκών συστημάτων και παράλληλα ο τύπος που χρησιμοποιείται στο σύστημα της συγκεκριμένης μελέτης έχουν συντελεστή απόδοσης 85%. Ο συντελεστής αναφέρεται στις απώλειες ενέργειας κατά την φόρτιση καθώς και κατά την εκφόρτιση.

Τέλος απώλειες υπάρχουν και κατά το στάδιο της μετατροπής του συνεχούς ρεύματος των συσσωρευτών σε εναλλασσόμενο για την τροφοδοσία του φωτιστικού σώματος της εγκατάστασης. Ο inverter που χρησιμοποιείται έχει απώλειες που φτάνουν το πολύ στο 10% της εισερχόμενης σε αυτόν ενέργειας. Έτσι η απόδοση του inverter ορίζεται στο ελάχιστο δυνατό δηλαδή 90%

Οι συντελεστές απόδοσης για όλα τα στοιχεία του συστήματος επιλέγονται κάτω από το γενικό μέσο όρο ώστε τα αποτελέσματα να αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες καθώς και για να περιέχονται και οι λοιπές απώλειες του συστήματος, από τα συστήματα ελέγχου, τα συστήματα εποπτείας, τις καλωδιώσεις κλπ.

6.3.2 Απόδοση φωτοβολταϊκού πάνελ

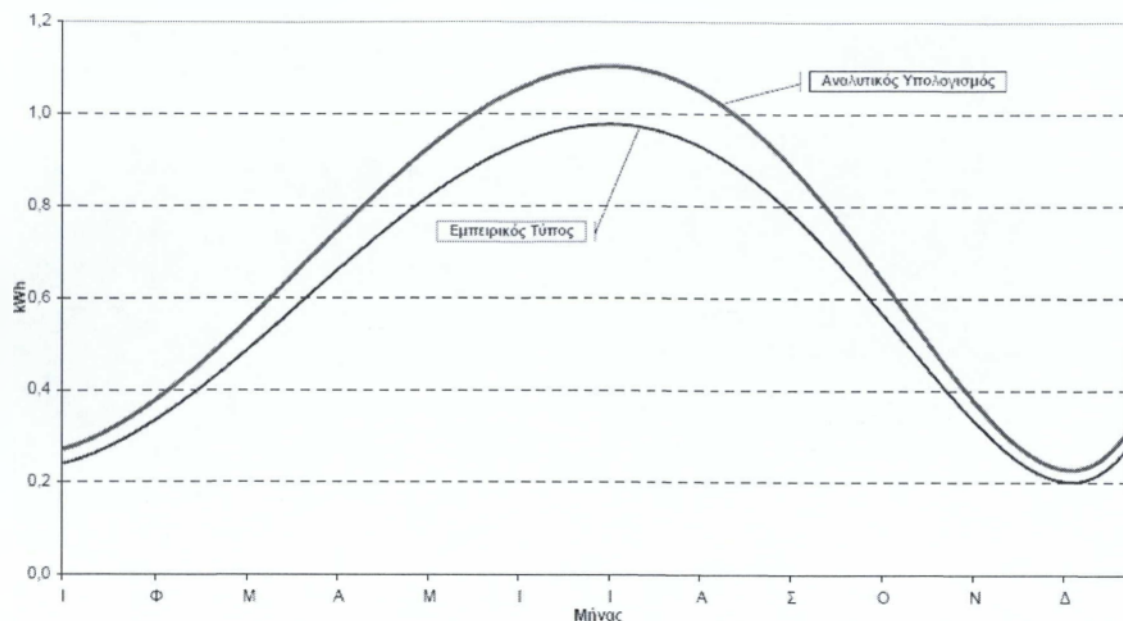
Ο υπολογισμός της απόδοσης του συστήματος συνίσταται στον υπολογισμό των συνολικών απωλειών καθώς και στον προσδιορισμό της δυνατότητας του φωτοβολταϊκού συστήματος να τροφοδοτήσει διάφορα φορτία. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη συνέχεια υπολογίζει την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ όταν αυτό βρίσκεται τοποθετημένο σε οριζόντιο επίπεδο.

Αρχικά υπολογίζεται η απολαβή του φωτοβολταϊκού πάνελ, η απόδοση του οποίου ορίστηκε στο 12%. Τα δεδομένα που έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρονται στην ημερήσια ηλιακή ενέργεια που αντιστοιχεί σε επιφάνεια εμβαδού ενός τετραγωνικού μέτρου. Η ενεργή επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πάνελ, δηλαδή η επιφάνεια που πραγματικά συμβάλει στην απορρόφηση της ηλιακής υπολογίζεται στα 1.2 m^2 .

Με την χρήση ενός πολλαπλασιασμού για κάθε ημέρα προκύπτει η ημερήσια απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ. Ο τρόπος αυτός όπως αναφέρθηκε υπολογίζει την απόδοση του πάνελ χρησιμοποιώντας τον συντελεστή απόδοσης και το εμβαδόν του (ενεργό εμβαδόν) και τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αυτά που λαμβάνονται υπόψη για τους επόμενους υπολογισμούς.

Ως μέτρο σύγκρισης για τον προηγούμενο υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη ο εμπειρικός τύπος υπολογισμού της απόδοσης των φωτοβολταϊκών. Ο υπολογισμός των τιμών με τον εμπειρικό τύπο γίνεται χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα από την επεξεργασία των μετεωρολογικών μετρήσεων και όχι τις στατιστικές τιμές των χαρτών ηλιακού δυναμικού.

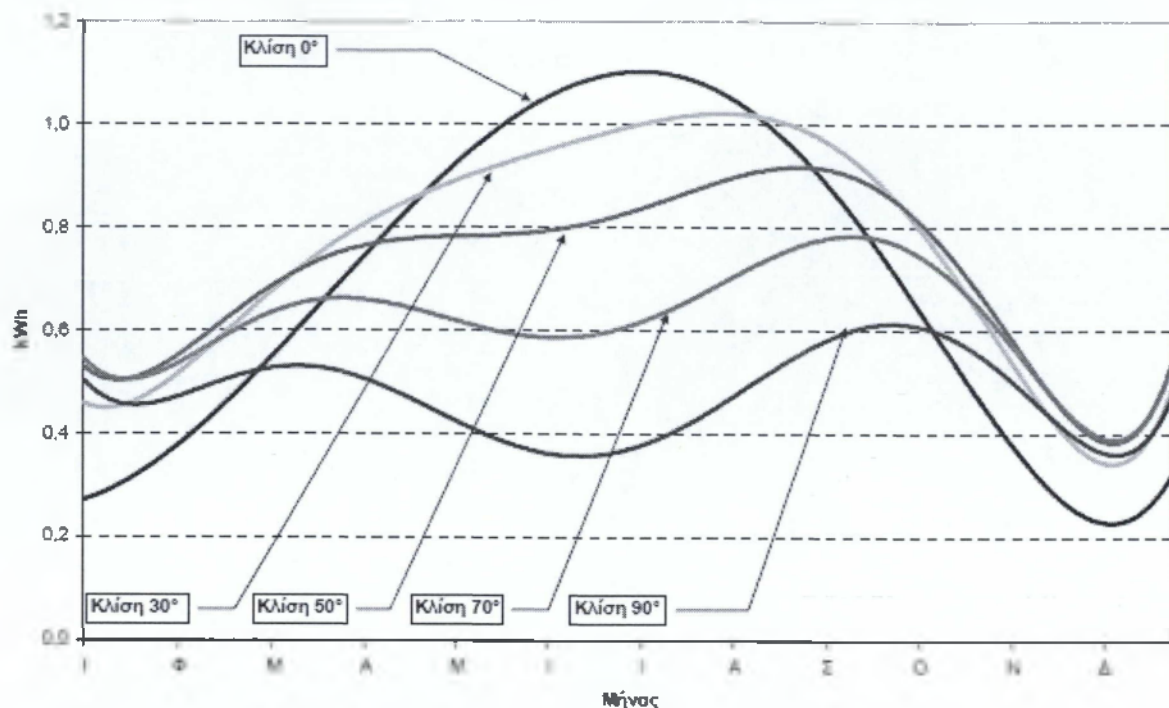
Τα τιμές των αποτελεσμάτων των δύο υπολογισμών συγκεντρώνονται στο κοινό Διάγραμμα 6-1.



Διάγραμμα 6-1 Ετήσια απολαβή φωτοβολταϊκού πάνελ τοποθετημένο σε οριζόντιο επίπεδο

Οι καμπύλες που εμφανίζονται στο παραπάνω διάγραμμα αποτελούν τις ομαλοποιημένες καμπύλες των αποτελεσμάτων των υπολογισμών. Αυτό βοηθά στο να γίνεται σαφέστερη η μορφή των καμπύλων και να ερμηνεύονται καλύτερα. Η ανώτερη καμπύλη από τις δύο, αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα του αναλυτικού τρόπου υπολογισμού της απόδοσης, ενώ η κατώτερη τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό με τον εμπειρικό τύπο. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των δύο τρόπων υπολογισμού είναι παραπλήσια για τους μήνες του χειμώνα και του φθινοπώρου και έχουν μια μικρή απόκλιση κατά του μήνες του καλοκαιριού και της άνοιξης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τον συντελεστή απόδοσης των φωτοβολταϊκών και την επιφάνεια του πάνελ προκύπτουν μεγαλύτερες γενικά τιμές από ότι με τον εμπειρικό τύπο. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επιλογή του συγκεκριμένου έτους για την συγκέντρωση των μετεωρολογικών δεδομένων και την διαφοροποίηση της μεθόδου από τον στατιστικό χαρακτήρα του εμπειρικού τύπου. Η υπολογιζόμενη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων είναι περίπου στο 10%

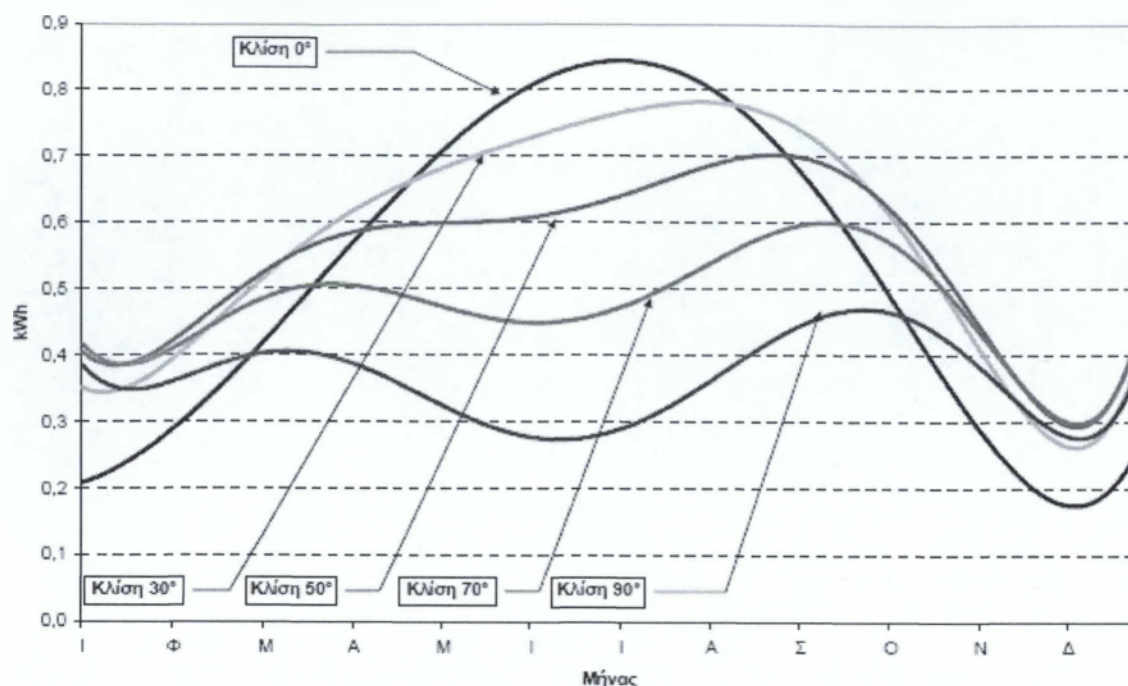
Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία υπολογίζεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ όταν αυτό τοποθετείται σε διάφορες γωνίες ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Οι γωνίες στις οποίες γίνονται οι υπολογισμοί είναι αυτές για τις οποίες προέκυψαν και τα αποτελέσματα του Διαγράμματος 5-3. Οι υπολογιζόμενη ετήσια απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ για τις διάφορες κλίσεις φαίνεται στο Διάγραμμα 6-2.



Διάγραμμα 6-2 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ για διάφορες γωνίες στήριξής του

6.3.3 Απόδοση ισχύος συστήματος

Η τελική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας και τους συντελεστές απόδοσης και των υπολοίπων μερών του συστήματος [28], [29], [30]. Με τους συντελεστές 0.85 για την απόδοση των συσσωρευτών και 0.9 για την απόδοση του inverter προκύπτουν οι τιμές της ημερήσιας απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν την μέγιστη δυνατή ενέργεια που είναι δυνατόν το σύστημα να συλλέξει κατά την διάρκεια της ημέρας, να την αποθηκεύσει στους συσσωρευτές και να την αποδώσει κατά την διάρκεια της νύχτας. Από τις τιμές έχουν προφανώς αφαιρεθεί όλες οι απώλειες. Το Διάγραμμα 6-3 παρουσιάζει την ετήσια απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος για το έτος 2001 όταν το φωτοβολταϊκό πάνελ στηρίζεται σε διάφορες γωνίες σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και με προσανατολισμό πάντα προς τον Νότο.

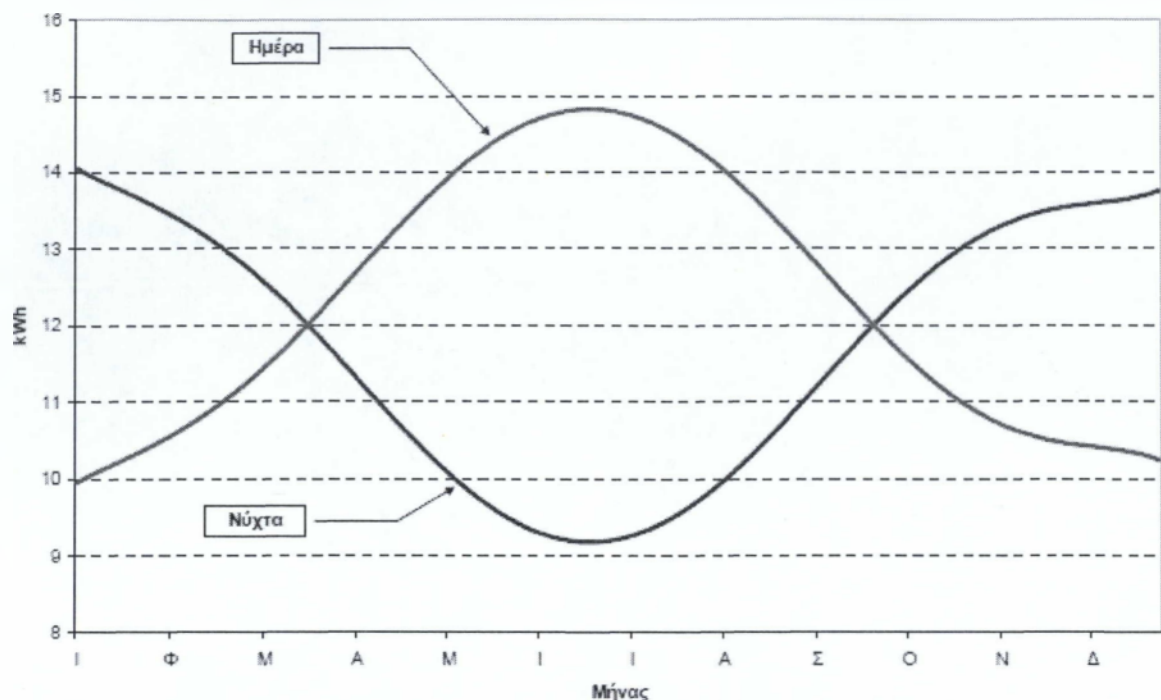


Διάγραμμα 6-3 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος για διάφορες γωνίες στήριξης του φωτοβολταϊκού πάνελ

Η ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το φωτοβολταϊκό σύστημα στο φωτιστικό, όπως φαίνεται από το διάγραμμα ποικίλει ανάλογα με την εποχή του έτους και τη γωνία στήριξης του φωτοβολταϊκού πάνελ. Παρατηρείται ότι για κλίσεις του πάνελ μεγαλύτερης των 0° η ενέργεια που απορροφά το σύστημα ελαττώνεται κατά τους θερινούς μήνες, όπου η ηλιακή ενέργεια είναι περισσότερη. Παράλληλα κατά τους χειμερινούς μήνες όπου η ηλιακή ενέργεια είναι μικρότερη με την μεταβολή της κλίσης του πάνελ αυξάνεται η απορροφούμενη ενέργεια με αποτέλεσμα να ομαλοποιείται η καμπύλη απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η συνολική απαίτηση ισχύος του συστήματος φωτισμού εξαρτάται από την επιλογή του λαμπτήρα που θα χρησιμοποιηθεί για τον φωτισμό του δρόμου. Για να γίνει αποδοτικότερη η αναζήτηση του κατάλληλου συστήματος φωτισμού αναλύεται περισσότερο το διάγραμμα της ενεργειακής απόδοσης. Στόχος είναι να μετατραπεί το διάγραμμα ενέργειας σε διάγραμμα ισχύος.

Για την μετατροπή του διαγράμματος χρειάζεται ο χρόνος. Ο χρόνος στον οποίο το φωτοβολταϊκό σύστημα θα αποδίδει την ενέργεια στο σύστημα φωτισμού. Το φωτοβολταϊκό σύστημα συλλέγει την ηλιακή ενέργεια καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας και την αποθηκεύει. Το σύστημα φωτισμού λειτουργεί κατά την διάρκεια της νύχτας οπότε ο χρόνος λειτουργίας του δεν είναι σταθερός, μιας και η διάρκεια της νύχτας μεταβάλλεται με την εποχή.

Στην αρχική επεξεργασία των μετρήσεων της έντασης φωτισμού υπολογίστηκε η χρονική διάρκεια της ημέρας για κάθε ημέρα του έτους. Από τον υπολογισμό αυτόν εύκολα προκύπτει η διάρκεια της νύχτας. Στο Διάγραμμα 6-4 έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας για όλο το έτος.



Διάγραμμα 6-4 Ετήσια χρονική διάρκεια ημέρας και νύχτας

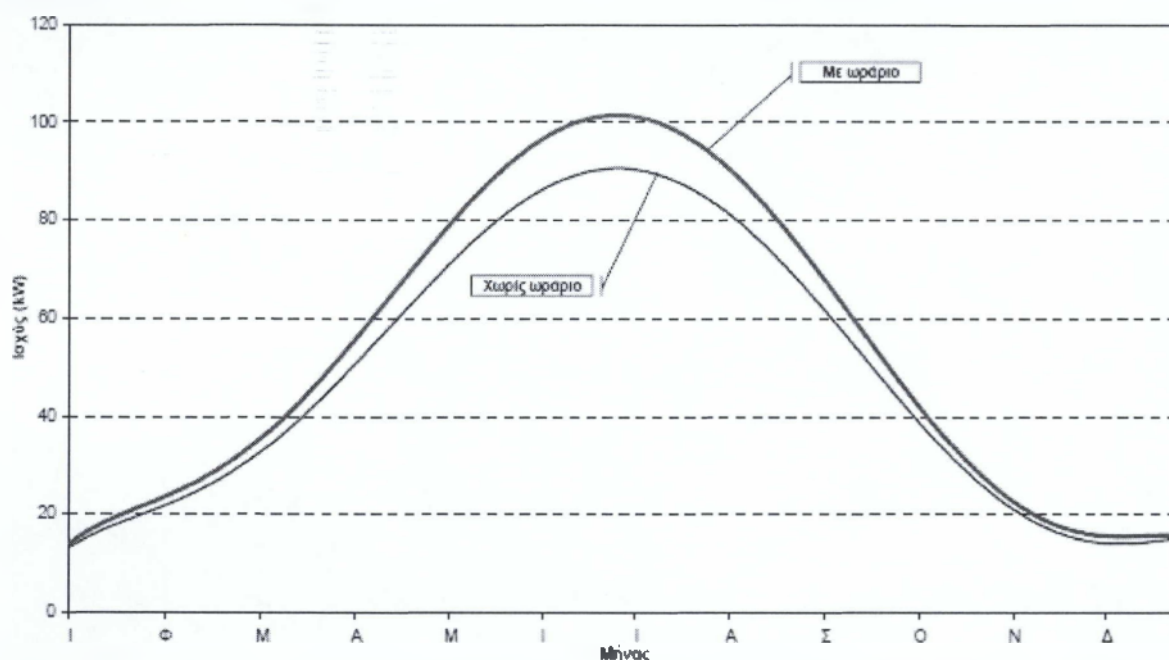
Διαιρώντας την διάρκεια της νύχτας με το ποσό της διαθέσιμης ενέργειας προκύπτει η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απαιτεί μια συσκευή για να λειτουργήσει αδιάλειπτα καθ' όλη την διάρκεια της νύχτας. Για παράδειγμα αν από τους υπολογισμούς εξαχθεί το αποτέλεσμα των 50W για μία συγκεκριμένη ημέρα σημαίνει ότι το βράδυ που ακολουθεί μετά από αυτή την ημέρα το σύστημα μπορεί να τροφοδοτήσει αδιάλειπτα και καθ' όλη την διάρκεια της νύχτας μια συσκευή συνολικής ισχύος 50W. Έχοντας τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς της ετήσιας απολαβής ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος μπορούμε να κάνουμε τον παραπάνω υπολογισμό ισχύος για κάθε μέρα του έτους και για κάθε διαφορετική κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Για ένα σύστημα φωτισμού οδικών αρτηριών υπάρχει η απαίτηση να λειτουργεί αδιάλειπτα κάθε νύχτα για ολόκληρο το έτος. Ο φωτισμός ενός δρόμου είναι μια προγραμματισμένη εργασία από τον κατά τόπο και κάθε φορά αρμόδιο φορέα. Το ωράριο λειτουργίας των φωτιστικών των δρόμων μεταβάλλεται σε κάθε εποχή καθώς αλλάζει και η διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Στις περισσότερες περιοχές το ωράριο αλλάζει κάθε ορισμένο αριθμό μηνών. Στη Σπάρτη, όπως και στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας, γίνεται καθημερινή ρύθμιση της λειτουργίας των φωτιστικών με την χρήση αστρονομικών αισθητήρων. Συγκεκριμένα το σύστημα φωτισμού των δρόμων τίθεται σε λειτουργία 30 λεπτά μετά την ημερολογιακά οριζόμενη δύση του ηλίου ενώ τίθενται εκτός λειτουργίας 30 λεπτά πριν την ημερολογιακή ανατολή.

Για να εισαχθεί το ωράριο στην λειτουργία του συστήματος πρέπει να μεταβληθεί ο απαιτούμενος χρόνος λειτουργίας του φωτιστικού κατά την διάρκεια της νύχτας. Αρχικά υπάρχει η παραδοχή ότι η διάρκεια της νύχτας, για κάθε μέρα του έτους, που έχει υπολογισθεί είναι περίπου ίση με την ημερολογιακά οριζόμενη διάρκεια. Ο χρόνος που χρειάζεται να λειτουργεί η διάταξη φωτισμού σύμφωνα με το ωράριο είναι κατά 60 λεπτά μικρότερος από ότι υπολογίσθηκε. Με μικρότερο τον νέο χρόνο

λειτουργίας και την ίδια αποδιδόμενη ενέργεια το διάγραμμα απόδοσης ισχύος μεταβάλλεται. Πιο συγκεκριμένα με μικρότερο χρόνο απαιτούμενης λειτουργίας το σύστημα θα μπορεί να τροφοδοτήσει αδιάλειπτα μεγαλύτερα φορτία.

Ένα παράδειγμα του επηρεασμού του ωραρίου στην ικανότητα τροφοδοσίας του συστήματος δίνεται στο Διάγραμμα 6-5 όπου έχει γίνει ο υπολογισμός της ικανότητας τροφοδοσίας του φωτοβολταϊκού συστήματος (με κλίση του πάνελ στις 0°). Στο ίδιο διάγραμμα επίσης διατηρείται και η καμπύλη της ισχύος που υπολογίσθηκε χωρίς την χρήση του ωραρίου για να μπορεί να γίνει μια γρήγορη σύγκριση της διαφοράς. Με την χρήση του συγκεκριμένου ωραρίου το σύστημα μπορεί να τροφοδοτήσει αδιάλειπτα συσκευές μεγαλύτερης ισχύος από ότι χωρίς να γίνει υπολογισμός του ωραρίου.



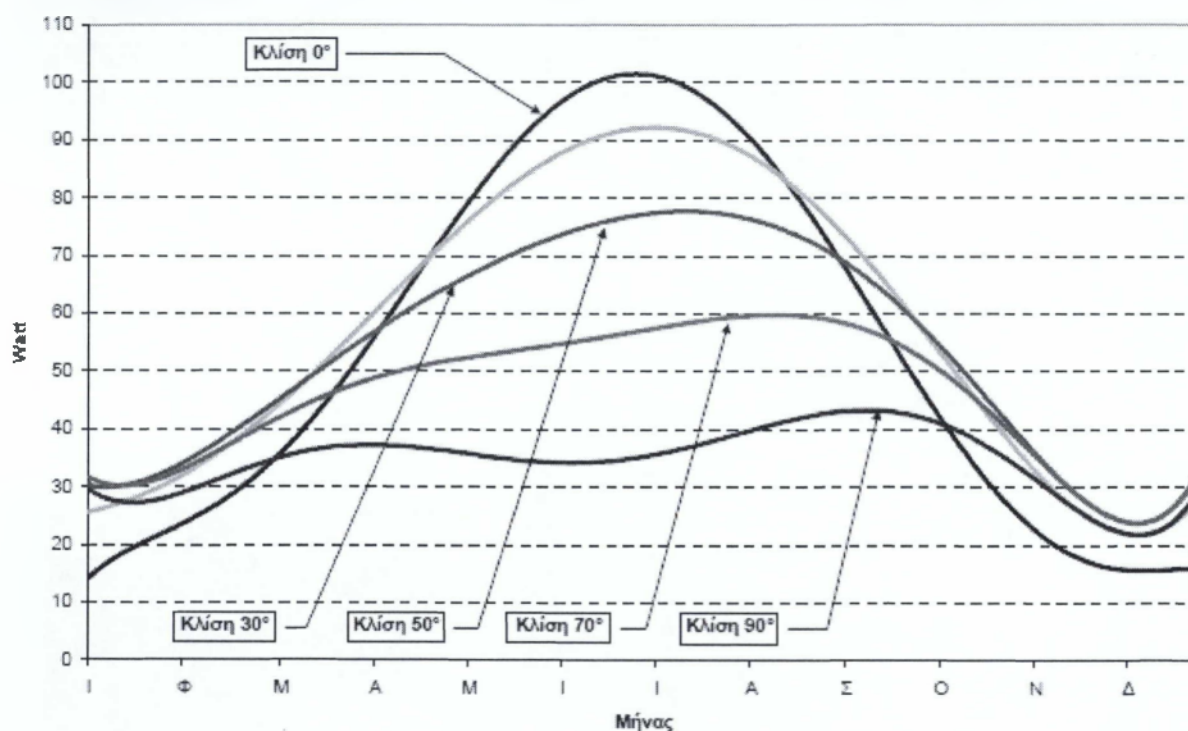
Διάγραμμα 6-5 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος για κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ 0°

Το επόμενο βήμα της μελέτης είναι ο υπολογισμός της ετήσιας ικανότητας τροφοδοσίας του συστήματος για τις διάφορες γωνίες κλίσης του φωτοβολταϊκού πάνελ, συνυπολογιζομένου και του ωραρίου λειτουργίας του οδικού φωτισμού. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται είναι εκείνες που υπολογίσθηκαν στα Διαγράμματα 6-3 και 6-4. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 6-6.

6.3.4 Παρατηρήσεις

- ❖ Οι μορφή των διαγραμμάτων είναι η ομαλοποιημένη γραμμή των υπολογιζόμενων τιμών. Η μορφή αυτή επιλέγεται για να γίνεται ευκολότερη ερμηνεία των διαγραμμάτων, καθώς η διαφοροποίηση μερικών αρχικών μετεωρολογικών μετρήσεων, λόγω ακραίων καιρικών συνθηκών σε σχέση με την εποχή, κάνουν τα διαγράμματα δύσκολα στην κατανόηση και στην εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων.
- ❖ Στο Διάγραμμα 6-6 παρατηρείται ότι για την μεταβαλλόμενη κλίση το πάνελ η ικανότητα τροφοδοσίας από το φωτοβολταϊκό σύστημα μεταβάλλεται σημαντικά τόσο στους θερινούς όσο και στους χειμερινούς μήνες. Αυτό

συμβαίνει διότι κατά τους χειμερινούς μήνες η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος αυξάνεται για γωνίες του πάνελ από 30-70° περίπου και παράλληλα το ωράριο λειτουργίας του οδικού φωτισμού τον χειμώνα είναι μικρότερο. Κατά τους θερινούς μήνες το ωράριο λειτουργίας είναι μεν μεγαλύτερο αλλά η περίσσεια της ηλιακής ενέργειας επιτρέπει στο σύστημα να τροφοδοτεί συσκευές μεγαλύτερης ισχύος από ότι τον χειμώνα παρά την μειωμένη απόδοση. Έτσι ανάλογα με τις ανάγκες της τροφοδοσίας γίνεται και η κατάλληλη ρύθμιση του φωτοβολταϊκού πάνελ ώστε να συλλέγεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενέργεια τον χειμώνα, ενώ παράλληλα η απορροφημένη ενέργεια το καλοκαίρι να βρίσκεται σε ικανοποιητικά για την εκάστοτε εφαρμογή επίπεδα.



Διάγραμμα 6-6 Ετήσια υπολογιζόμενη απόδοση ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ

6.4 Σύστημα Φωτισμού

6.4.1 Εισαγωγή

Το σύστημα φωτισμού δρόμου που αναπτύσσεται καλείται να φωτίσει επαρκώς έναν επιλεγμένο δρόμο χωρίς διακοπή κατά την διάρκεια της νύχτας. Η αυτονομία του συστήματος έγκειται στο πόσες ημέρες μπορεί να λειτουργήσει με την αποθηκευμένη από τον ήλιο ενέργεια κατά την διάρκεια του έτους. Η σχετικά χαμηλή απόδοση ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος ειδικότερα κατά τους χειμερινούς μήνες καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη ενός συστήματος φωτισμού με όσο το δυνατόν μικρότερη απαίτηση ισχύος. Από την άλλη το σύστημα αυτό πρέπει να είναι ικανό να φωτίσει τον επιλεγμένο τύπο δρόμου επαρκώς και να ακολουθεί τις διεθνείς προδιαγραφές για τον φωτισμό δρόμων.

Συνήθως για τον φωτισμό ενός δρόμου μέσης κυκλοφορίας απαιτούνται λαμπτήρες με μεγάλη απαίτηση σε ισχύ της τάξης των 150 - 400W. Συνυπολογίζοντας και τις καταναλώσεις των υπόλοιπων μερών του φωτιστικού συστήματος η απαίτηση ισχύος γίνεται ακόμα μεγαλύτερη. Παρατηρώντας το διάγραμμα απόδοσης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος προκύπτει πως το σύστημα φωτισμού που πρέπει να αναπτυχθεί πρέπει να έχει συνολική απαίτηση ισχύος από 20 έως 100W περίπου. Στην περίπτωση χαμηλής απαίτησης ισχύος, της τάξης των 20 με 30 W το σύστημα αποκτά μεγάλη αυτονομία μιας και τις περισσότερες ημέρες του έτους η απόδοση του συστήματος είναι ίση ή μεγαλύτερη τις απαιτούμενης. Ένα σύστημα φωτισμού όμως της τάξης των 20 με 30W είναι δύσκολο να φωτίσει επαρκώς τυπικό δρόμο, εκτός και αν πρόκειται για εφαρμογές φωτισμού πάρκων και μονοπατιών ή διακοσμητικού φωτισμού. Από την άλλη ένα σύστημα με απαίτηση ισχύος της τάξης των 80 με 100W έχει καλύτερη απόδοση για τον φωτισμό δρόμου, παράλληλα όμως η αυτονομία του για τα δεδομένα του φωτοβολταϊκού συστήματος θα ήταν μικρή μιας και υψηλή απόδοση υπάρχει για ελάχιστες ημέρες κυρίως κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Τα συστήματα με απαίτηση μεγαλύτερη των 100W έχουν την δυνατότητα να φωτίσουν με καλύτερη απόδοση κοινούς δρόμους μόνο που η αυτονομία τους θα είναι μικρή διότι χρειάζονται περισσότερες από 1 ή 2 ημέρες ώστε να φορτιστούν πλήρως οι συσσωρευτές και να λειτουργήσει το σύστημα φωτισμού καθ' όλη την διάρκεια της νύχτας. Το σύστημα φωτισμού λοιπόν πρέπει να έχει απαίτηση ισχύος που να είναι μέσα στα όρια της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος και παράλληλα να έχει μια ικανοποιητική αυτονομία.

6.4.2 Επιλογή λαμπτήρα και φωτιστικού σώματος

Η επιλογή του κατάλληλου για την εφαρμογή λαμπτήρα είναι μια περίπλοκη διαδικασία καθώς υπάρχει μεγάλη ποικιλία τύπων και απαίτησης ισχύος. Παράλληλα το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης σε ένα σύστημα φωτισμού έχει ο λαμπτήρας. Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον φωτισμό δρόμων είναι νατρίου χαμηλής ή υψηλής πίεσης οι οποίοι απαιτούν ισχύ της τάξης των μερικών εκατοντάδων Watt. Όπως αναφέρθηκε η συνολική ισχύς το συστήματος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 20 και 100W. Επόμενο είναι οι λαμπτήρες αυτοί να απορρίπτονται κατά την αναζήτηση του κατάλληλου λαμπτήρα.

Ιδανική λύση είναι η χρήση ενός λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων οι οποίοι σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες είναι ιδανικοί για τον φωτισμό δρόμων στο πεδίο της μεσοπικής όρασης [31], [32]. Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν λαμπτήρες οι οποίοι

καταναλώνουν από 35 έως και μερικές εκατοντάδες Watt. Ικανοί να τροφοδοτηθούν επαρκώς είναι λαμπτήρες των 35 και 70W. Ο λαμπτήρας των 70W έχει σχετικά υψηλή απαίτηση ισχύος για τα δεδομένα του συστήματος και προβλέπεται να έχει μικρή αυτονομία.

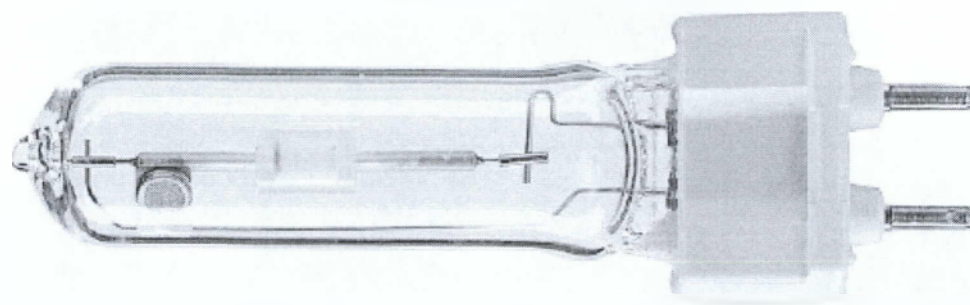
Ο επιλεγμένος για την εφαρμογή λαμπτήρας είναι κατανάλωσης 35W την μικρότερη δυνατή κατανάλωση για λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων που χρησιμοποιείται για τον φωτισμό δρόμων. Από συγκριτική μελέτη λαμπτήρων 35W επιλέγεται ο λαμπτήρας της Εικόνας 6-5 τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 6-3. Το φωτιστικό σώμα που χρησιμοποιεί τον επιλεγμένο λαμπτήρα αναζητείται στον ίδιο κατασκευαστή. Υπάρχει μια οικογένεια φωτιστικών που μπορούν να δεχτούν το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων. Τα φωτιστικά που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον συγκεκριμένο λαμπτήρα είναι 8 και αφορούν τους συνδυασμούς του ανακλαστήρα, του οπτικού και άλλων παραμέτρων. Στον Πίνακα 6-4 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά των φωτιστικών δωματίων που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν. Οι συνδυασμοί των φωτιστικών που προκύπτουν δοκιμάζονται σε πρόγραμμα φωτισμού δρόμων για την επιλογή του καταλληλότερου.

Πίνακας 6-3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου λαμπτήρα

Κατασκευαστής	Philips
Τύπος	Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων
Κωδικός	CDM-T35W
Κατανάλωση (Λαμπτήρα)	35W
Χρώμα	830
Φωτεινή ροή	3300 lumen
Τύπος μπάλαστ	Ηλεκτρονικό

Πίνακας 6-4 Χαρακτηριστικά του επιλεγμένου φωτιστικού σώματος

Κατασκευαστής	Philips
Οικογένεια	IRIDIUM (SGS252)
Τύποι ανακλαστήρα	↓ GB ↓ FG ↓ PC
Τύποι οπτικών	↓ CR ↓ OR



Εικόνα 6-5 Ο επιλεγμένος λαμπτήρας για το σύστημα φωτισμού

6.4.3 Ικανότητα φωτισμού

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο «Φωτισμός δρόμων» υπάρχουν 5 κλάσεις όσο αφορά τον φωτισμό ενός δρόμου. Οι κατηγορίες αυτές έχουν τεθεί από την CIE και αφορούν στο επίπεδο φωτισμού του δρόμου. Οι απαιτήσεις για κάθε κλάση (M1 έως και M5) καθώς και η περιγραφή των δρόμων που αντιπροσωπεύουν οι κλάσεις αυτές αναγράφονται στον Πίνακα 6-5.

Πίνακας 6-5 Προδιαγραφές φωτισμού δρόμου κατά την CIE

Κλάση φωτισμού	Λαμπρότητα (Μέση) ($\text{Cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	Λαμπρότητα (Ελάχιστη Μέση) ($\text{Cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	Δεικτης θάμβωσης (%)	SR left	SR right
M1	≥ 2.00	≥ 0.40	< 10	≥ 0.5	≥ 0.5
M2	≥ 1.50	≥ 0.40	< 10	≥ 0.5	≥ 0.5
M3	≥ 1.00	≥ 0.40	< 10	≥ 0.5	≥ 0.5
M4	≥ 0.75	≥ 0.40	< 15	≥ 0.5	≥ 0.5
M5	≥ 0.50	≥ 0.40	< 15	≥ 0.5	≥ 0.5
SR left-right		Δεικτης που αναφέρεται στο αν ο φωτισμός στον δεξιά και αριστερά περιβάλλοντα χώρο του δρόμου είναι επαρκής για την αναγνώριση αντικείμενων			

Το επόμενο βήμα είναι να εξεταστεί το αν και κατά πόσο οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται στον φωτισμό ενός κοινού δρόμου. Λόγω της μικρής ισχύος του λαμπτήρα η μελέτη γίνεται σε δρόμο πλάτους 6 μέτρων με δύο λωρίδες και τύπο οδοστρώματος σύμφωνα με το πρότυπο CIE R3. Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων κάθε κλάσεως φωτισμού απαιτείται διαφορετικός τρόπος εγκατάστασης και διάταξης και διαφορετικός αριθμός φωτιστικών σωμάτων ανά περίπτωση. Στη συνέχεια εξετάζεται χωριστά η δυνατότητα φωτισμού του δρόμου με κάθε διαφορετική απαίτηση φωτισμού ξεκινώντας από την κλάση M5. Η μελέτη του φωτισμού γίνεται με την χρήση ενός κατάλληλου λογισμικού για τον φωτισμό δρόμων της εταιρίας Philips (Philips Calculux Road 5.0)

6.4.3.1 Κλάση φωτισμού M5

Τα χαρακτηριστικά του δρόμου (ο οποίος είναι υπό κατασκευή και είναι η Ν.Ε.Ο Τρίπολης-Σπάρτης) στον οποίο γίνεται η μελέτη φαίνονται στον Πίνακα 6-6.

Πίνακας 6-6 Χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δρόμου

Πλάτος	6 μέτρα
Λωρίδες κυκλοφορίας	2
Τύπος οδοστρώματος	Ασφαλτός CIE R3
Συντελεστής ανάκλασης οδοστρώματος	0.070

Στο λογισμικό φωτισμού εξετάζονται όλοι οι συνδυασμοί φωτιστικών σωμάτων που αναφέρονται στον Πίνακα 6-7. Για το κάθε συνδυασμό γίνεται βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών εγκατάστασης ώστε να τηρούν τα κριτήρια της κλάσης αυτής. Τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης αφορούν το ύψος στήριξης των φωτιστικών σωμάτων πάνω στους ιστούς φωτισμού, την απόσταση μεταξύ των ιστών, τον τρόπο διάταξης στις δύο πλευρές του δρόμου, το μήκος της επικάλυψης του δρόμου από την κάθετη προβολή του φωτιστικού (Overhang) και την κατακόρυφη γωνία του φωτιστικού (Tilt90).

Πίνακας 6-7 Συνδυασμοί φωτιστικών σωμάτων

Φωτιστικό 1	SGS252 GB CR CT-POT P.5 X	1xCDM-T35W
Φωτιστικό 2	SGS252 FG CR CT-POT P.3	1xCDM-T35W
Φωτιστικό 3	SGS252 FG CR CT-POT P.5 X	1xCDM-T35W
Φωτιστικό 4	SGS252 GB CR CT-POT P.3	1xCDM-T35W
Φωτιστικό 5	SGS252 GB OR CT-POT P.3	1xCDM-T35W
Φωτιστικό 6	SGS252 PC CR CT-POT P.3	1xCDM-T35W
Φωτιστικό 7	SGS252 PC CR CT-POT P.5 X	1xCDM-T35W
Φωτιστικό 8	SGS252 PC OR CT-POT P.3	1xCDM-T35W

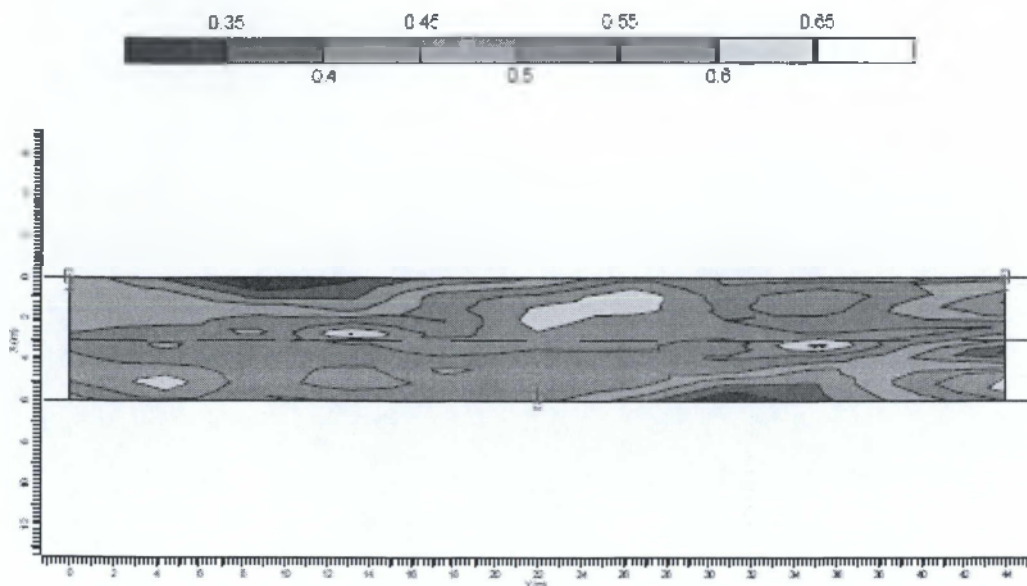
Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης δείχνουν πως όλα τα φωτιστικά με την κατάλληλη εγκατάσταση τηρούν τα κριτήρια της κλάσης M5. Ο Πίνακας 6-8 αναφέρεται στα αποτελέσματα αυτά για κάθε φωτιστικό.

Πίνακας 6-8 Αποτελέσματα εξομοίωσης φωτισμού για τις απαιτήσεις της κλάσης CIE-M5

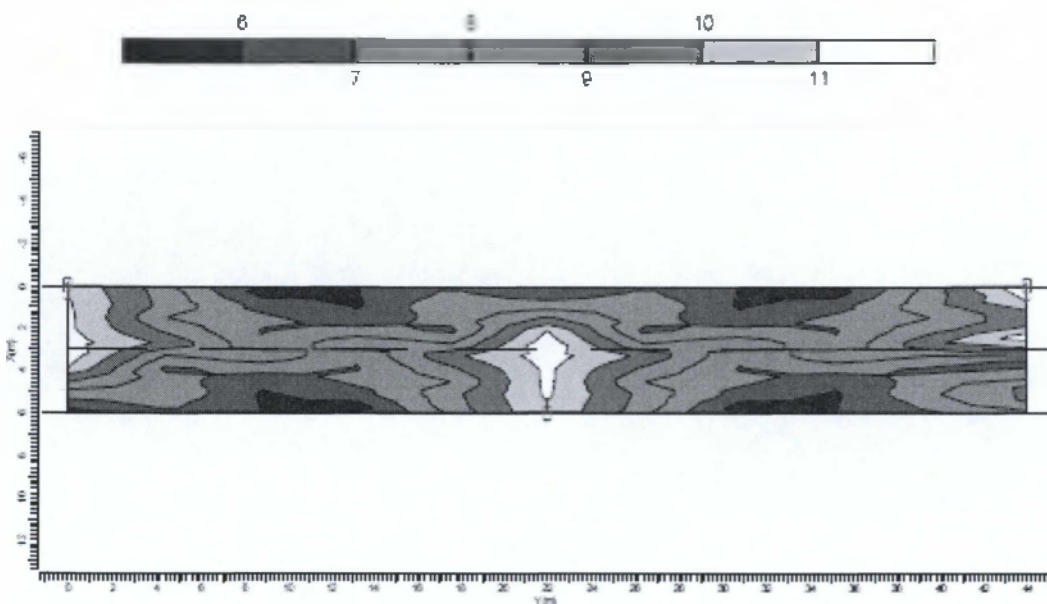
	Φωτιστικό 1	Φωτιστικό 2	Φωτιστικό 3	Φωτιστικό 4
Διάταξη	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί
Ύψος	8.00	7.00	7.00	7.00
Απόσταση Ιστών	22.00	21.00	22.00	21.00
Επικάλυψη (m)	0.50	0.00	0.50	0.50
Tilt90 (°)	5.0	0.0	5.0	0.0
Λαμπρότητα (Μέση)	0.52	0.50	0.52	0.53
Λαμπρότητα (Ελάχ. Μέση)	0.54	0.52	0.56	0.60
Θάμβωση (TP%)	9.5	6.9	11.3	7.4
SR-left	0.51	0.51	0.50	0.55
SR-right	0.51	0.51	0.50	0.55
	Φωτιστικό 5	Φωτιστικό 6	Φωτιστικό 7	Φωτιστικό 8
Διάταξη	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί
Ύψος	7.00	7.00	7.00	6.00
Απόσταση Ιστών	21.00	21.00	22.00	20.00
Επικάλυψη (m)	0.00	0.00	0.00	0.00
Tilt90 (°)	0.0	0.0	5.0	0.0
Λαμπρότητα (Μέση)	0.51	0.51	0.54	0.53
Λαμπρότητα (Ελάχ. Μέση)	0.53	0.53	0.52	0.55
Θάμβωση (TP%)	10.1	9.2	13.1	10.5
SR-left	0.56	0.53	0.52	0.56
SR-right	0.56	0.53	0.52	0.50

Από τα παραπάνω φωτιστικά σώματα το ιδανικότερο για την περίπτωση είναι το φωτιστικό Νο1 το οποίο εμφανίζει και τα καλύτερα αποτελέσματα στο επίπεδο φωτισμού με τον καλύτερο δείκτη λαμπρότητας (ελάχιστη/μέση), χαμηλό ποσοστό θάμβωσης και τους καλύτερους δείκτες SR. Παράλληλα στηρίζεται σε μέγιστο ύψος 8 μέτρα και με απόσταση ιστών τα 22 μέτρα.

Στα Διαγράμματα 6-7 και 6-8 φαίνεται η κατανομή του φωτισμού για το φωτιστικό αυτό πάνω στον υπό εξέταση δρόμο.



Διάγραμμα 6-7 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m^2)



Διάγραμμα 6-8 Κατανομή της έντασης φωτισμού στο επίπεδο του δρόμου (lux)

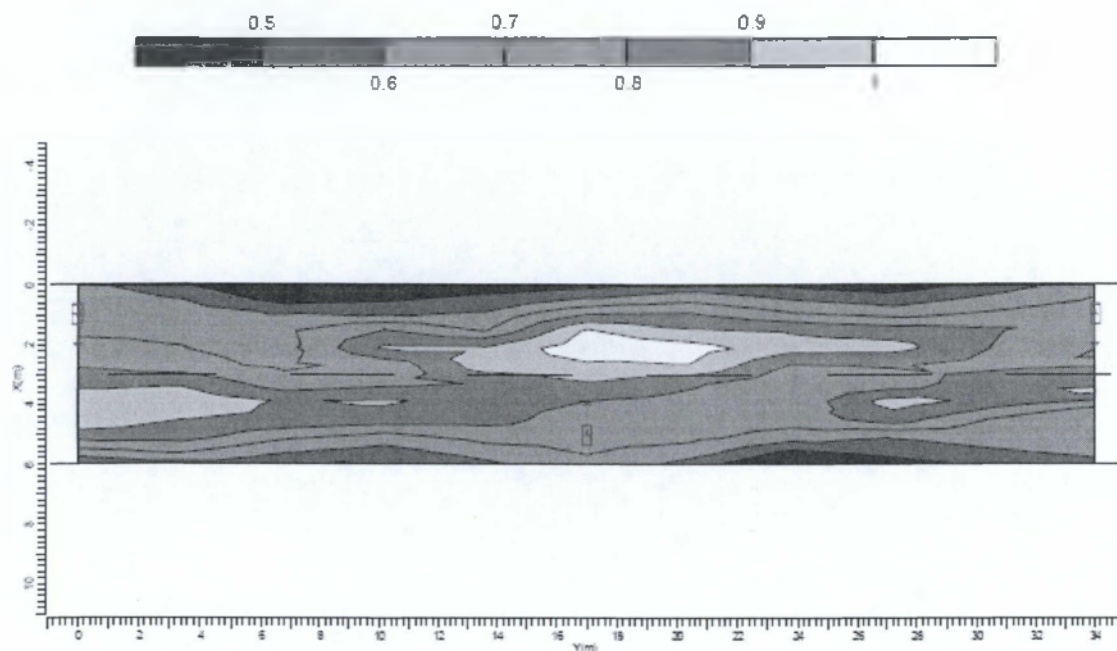
6.4.3.2 Κλάση φωτισμού M4

Για την κλάση φωτισμού M4 γίνονται παρόμοια βήματα όπως και για την M5. Τα φωτιστικά του Πίνακα 6-7 δοκιμάζονται και βελτιστοποιούνται τα χαρακτηριστικά εγκατάστασης για τον δρόμο που περιγράφεται στον Πίνακα 6-6. Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης δείχνουν πως όλα τα φωτιστικά με την κατάλληλη εγκατάσταση τηρούν τα κριτήρια και της κλάσης M4. Στον Πίνακα 6-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά για κάθε φωτιστικό.

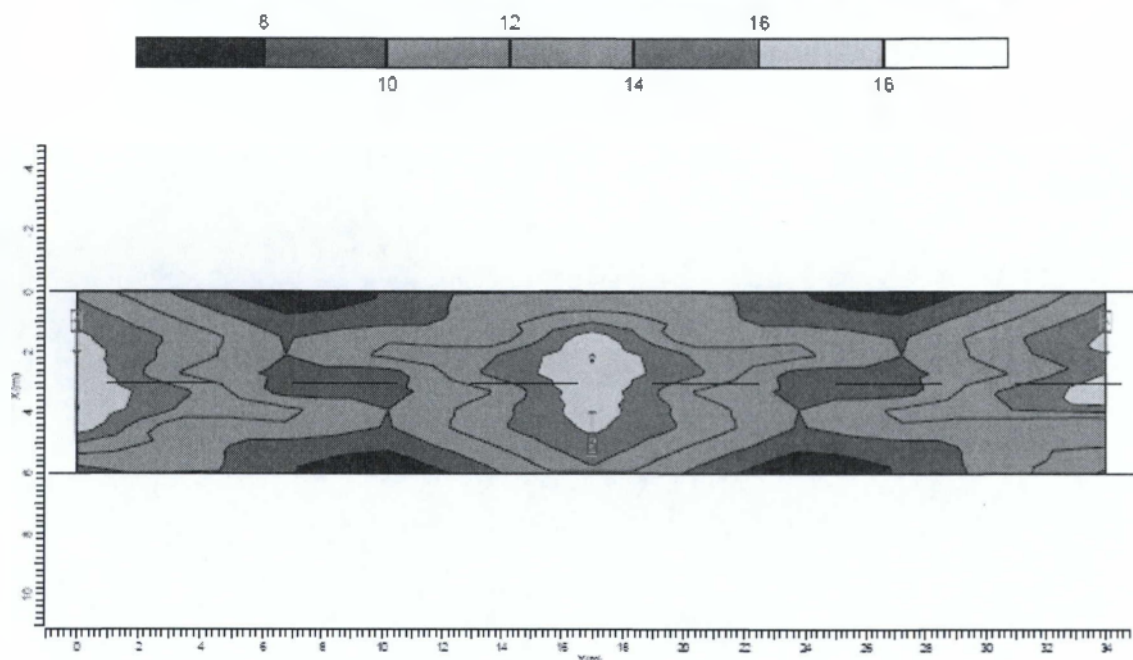
Πίνακας 6-9 Αποτελέσματα εξομοίωσης φωτισμού για τις απαιτήσεις της κλάσης CIE-M4

	Φωτιστικό 1	Φωτιστικό 2	Φωτιστικό 3	Φωτιστικό 4
Διάταξη	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί
Ύψος	6.00	6.00	6.00	6.00
Απόσταση Ιστών	17.00	15.00	16.00	15.00
Επικάλυψη (m)	1.00	0.50	1.00	0.50
Tilt90 (°)	10.0	5.0	10.0	5.0
Λαμπρότητα (Μέση)	0.75	0.72	0.75	0.76
Λαμπρότητα (Ελάχ Μέση)	0.54	0.62	0.57	0.60
Θάμβωση (Π%)	13.5	7.8	11.8	8.4
SR-left	0.53	0.53	0.52	0.53
SR-right	0.53	0.53	0.52	0.53
	Φωτιστικό 5	Φωτιστικό 6	Φωτιστικό 7	Φωτιστικό 8
Διάταξη	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί	Χιαστί
Ύψος	6.00	6.00	6.00	6.00
Απόσταση Ιστών	15.00	15.00	16.00	15.00
Επικάλυψη (m)	0.00	1.00	1.00	1.00
Tilt90 (°)	5.0	0.0	10.0	0.0
Λαμπρότητα (Μέση)	0.76	0.80	0.79	0.75
Λαμπρότητα (Ελάχ Μέση)	0.58	0.57	0.54	0.56
Θάμβωση (Π%)	10.3	9.3	13.7	11.0
SR-left	0.51	0.50	0.54	0.51
SR-right	0.51	0.50	0.54	0.51

Από τα παραπάνω φωτιστικά σώματα το ιδανικότερο για την περίπτωση είναι το φωτιστικό Νο1 το οποίο εμφανίζει και τα καλύτερα αποτελέσματα στο επίπεδο φωτισμού με τον καλύτερο δείκτη λαμπρότητας (ελάχιστη/μέση), χαμηλό ποσοστό θάμβωσης και τους καλούς δείκτες SR. Παράλληλα στηρίζεται σε μέγιστο ύψος 6 μέτρα και με απόσταση ιστών τα 17 μέτρα. Στα Διαγράμματα 6-9 και 6-10 φαίνεται η κατανομή του φωτισμού για το φωτιστικό αυτό πάνω στον υπό εξέταση δρόμο.



Διάγραμμα 6-9 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m²)



Διάγραμμα 6-10 Κατανομή της έντασης φωτισμού στο επίπεδο του δρόμου (lux)

6.4.3.3 Κλάσεις φωτισμού M3 έως και M1

Οι προδιαγραφές τις CIE για τις κλάσεις φωτισμού M1 έως και M3 αναφέρονται κατά βάση σε δρόμους υψηλής κυκλοφορίας. Οι δρόμοι αυτοί είναι συνήθως διπλής κυκλοφορίας, έχουν πλάτος από 10 μέτρα και περισσότερο και διαθέτουν 4 ή και περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας συνολικά.

Στο πρόγραμμα μελέτης φωτισμού εξετάζεται αν τα επιλεγμένα φωτιστικά είναι σε θέση να φωτίσουν τους συγκεκριμένους δρόμους μέσα στο προδιαγεγραμμένα όρια

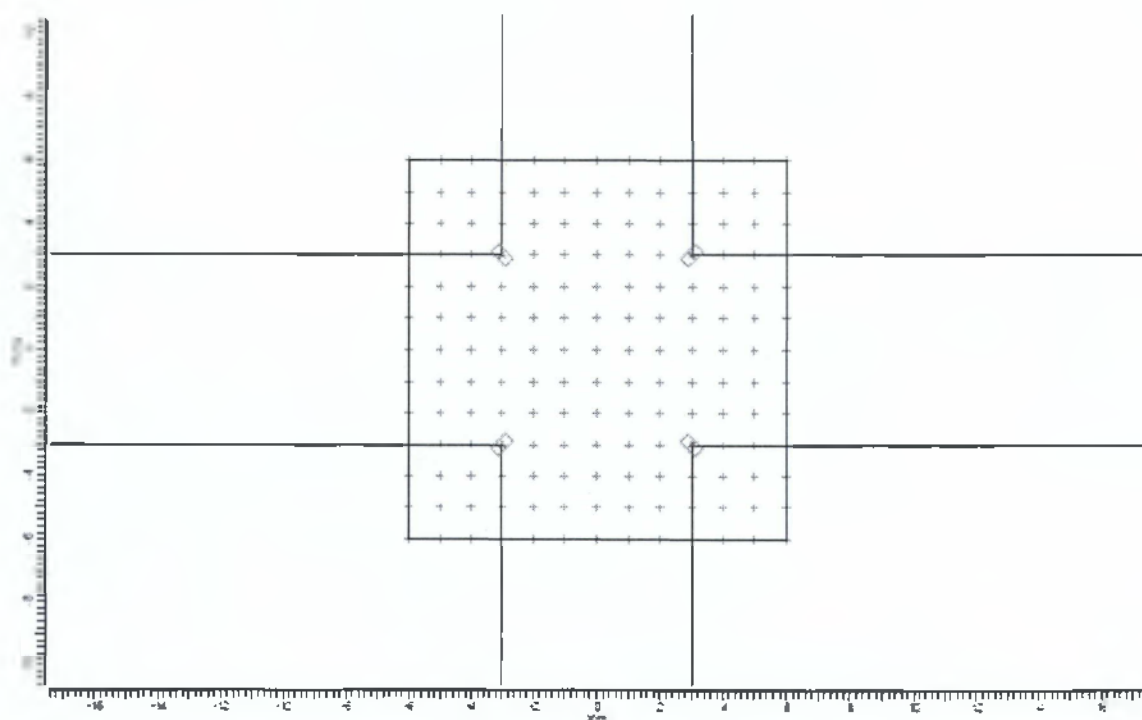
από την CIE. Τα αποτελέσματα είναι αρνητικά και αυτό οφείλεται προφανώς στην περιορισμένη ισχύ, κατά συνέπεια και απόδοση, του επιλεγμένου λαμπτήρα.

Παράλληλα ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι ο φωτισμός δρόμων χαμηλής κυκλοφορίας καθώς και παρόμοιες εφαρμογές με μικρότερες απαιτήσεις από αυτές που έχουν οι δρόμοι υψηλής κυκλοφορίας.

Για τους παραπάνω λόγους η εκτενέστερη αναφορά στην μελέτη των δρόμων που έχουν τις παραπάνω προδιαγραφές καθώς και τα αποτελέσματα της μελέτης φωτισμού παραλείπονται σκοπίμως.

6.4.3.4 Φωτισμός Διασταύρωσης

Μια επιπλέον εξέταση είναι αυτή του φωτισμού μια διασταύρωσης δύο δρόμων πλάτους 6 μέτρων. Η μελέτη αυτή προστίθεται στις προηγούμενες με την ιδέα ότι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φωτίζει αυτόνομα ή μη απομακρυσμένα σημεία του οδικού δικτύου και κυρίως σταυροδρόμια, ώστε να παρέχεται η μέγιστη δυνατή ασφάλεια για οδηγούς και πεζούς. Η υπό εξέταση διασταύρωση φαίνεται στο Διάγραμμα 6-11

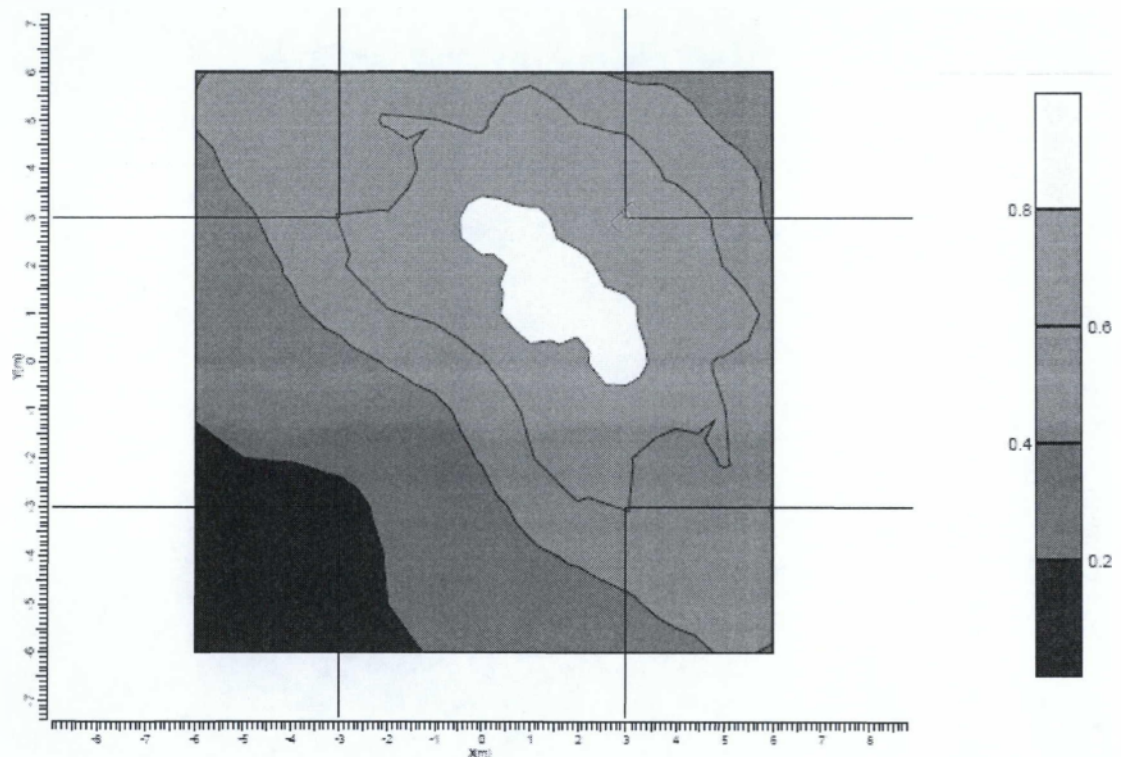


Διάγραμμα 6-11 Κάτοψη της υπό μελέτη διασταύρωσης

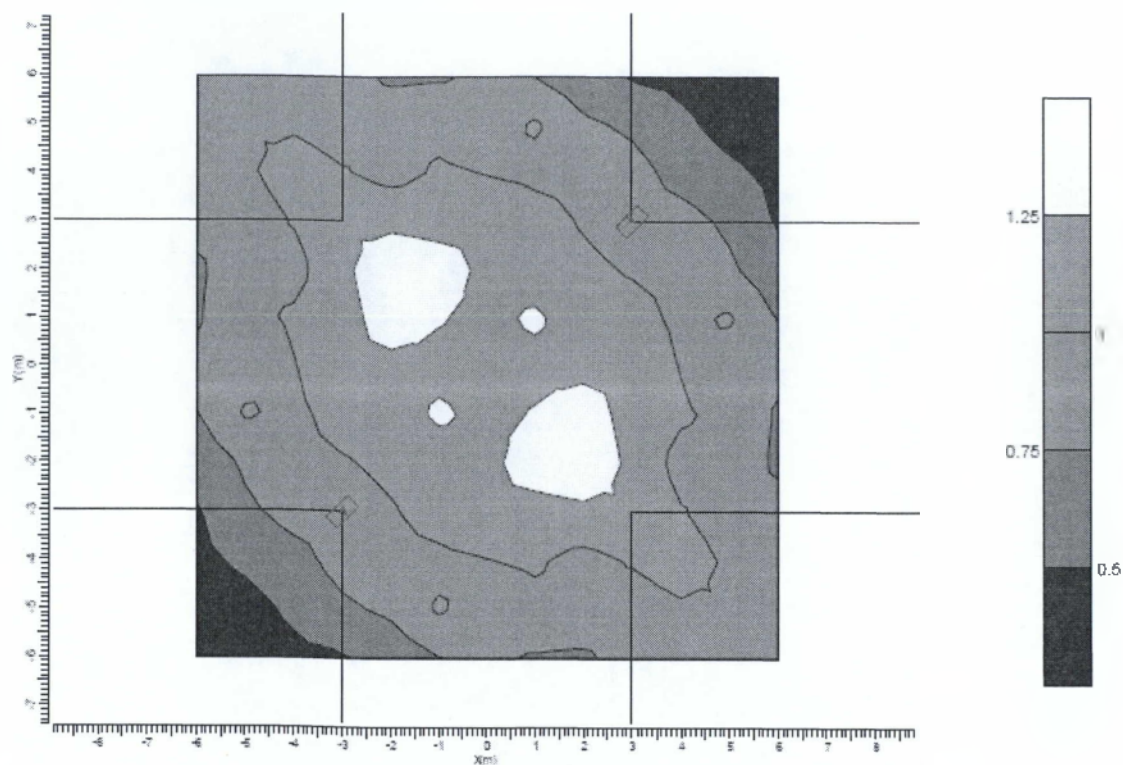
Για τον φωτισμό της διασταύρωσης επιλέγεται το φωτιστικό Νο1 του Πίνακα 6-6. Χρησιμοποιούνται έως και 4 φωτιστικά, ένα σε κάθε γωνία με προσανατολισμό στο κέντρο της διασταύρωσης και κατακόρυφη προβολή φωτιστικού στις 0°. Στη συνέχεια γίνεται μελέτη φωτισμού ώστε να διαπιστωθεί η επάρκεια της χρήσης από 1 έως 4 φωτιστικά για τον φωτισμό της διασταύρωσης. Οι δοκιμές είναι 3 και αφορούν την

Λειτουργία 1,2 και 4 φωτιστικών ταυτόχρονα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Διαγράμματα 6-12 έως και 6-14.

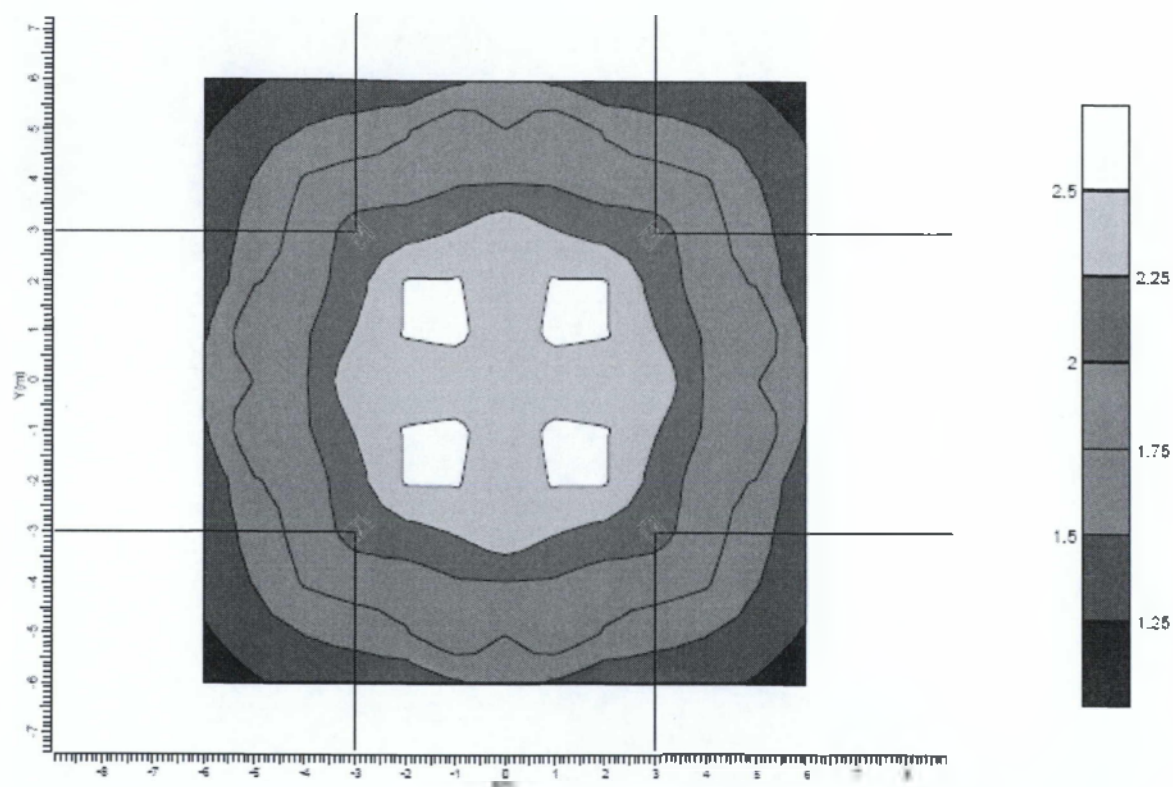
Ανάλογα με το επίπεδο που χρειάζεται να δοθεί στον φωτισμό της διασταύρωσης επιλέγεται ένας από τους παραπάνω συνδυασμούς λειτουργίας των φωτιστικών. Οι περιπτώσεις μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με συχνότητα χρήσης της διασταύρωσης, την τοποθεσία που βρίσκεται, την χρήση του από πεζούς κλπ. Όλα αυτά ακολουθούν τους κανονισμούς τοπικού φωτισμού σύμφωνα με την CIE, οι οποίοι χωρίζονται σε 7 κατηγορίες (P1 – P7).



Διάγραμμα 6-12 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου (cd/m^2) με τη χρήση ενός φωτιστικού



Διάγραμμα 6-13 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) με τη χρήση δύο φωτιστικών



Διάγραμμα 6-14 Κατανομή της λαμπρότητας στο επίπεδο του δρόμου ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) με τη χρήση τεσσάρων φωτιστικών

6.4.3.5 Παρατηρήσεις

- ✚ Σε κάθε περίπτωση φωτισμού οι διαστάσεις του δρόμου μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις και να γίνει πάλι μελέτη για το αν ικανοποιούνται και πόσο οι διάφορες κλάσεις φωτισμού
- ✚ Τα αποτελέσματα της μελέτης φωτισμού γίνονται με σκοπό την χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων φωτιστικών ενώ παράλληλα τηρούνται οι εκάστοτε προδιαγραφές. Είναι φανερό πως για να επιτευχθούν μεγαλύτερα επίπεδα φωτισμού πρέπει να γίνει διαφοροποίηση στην εγκατάσταση των φωτιστικών (Μικρότερο ύψος και απόσταση μεταξύ ιστών κτλ.)

6.5.2 Λειτουργίες της μονάδας ελέγχου

Η λειτουργία της μονάδας ελέγχου βασίζεται σε ηλεκτρονικές διατάξεις που σκοπό έχουν τον έλεγχο και την εποπτεία του συστήματος. Τα μέρη του συστήματος που ελέγχονται είναι το σύστημα φόρτισης του συσσωρευτή, ο συσσωρευτής και ο διακόπτης επιλογής της πηγής τροφοδοσίας για το σύστημα φωτισμού. Οι αρχές της λειτουργίας της μονάδας ελέγχου είναι οι εξής:

- ✚ Η τροφοδοσία του συστήματος φωτισμού πρέπει να είναι επαρκής για ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας. Σε αντίθετη περίπτωση ο χρόνος που μεσολαβεί για την απανένανση του λαμπτήρα με την τάση του ηλεκτρικού δικτύου είναι αρκετός για τα προκαλεί προβλήματα ασφάλειας (απροειδοποίητη διακοπή φωτισμού) και προβλήματα λειτουργικότητας της εγκατάστασης. Συνεπώς ο έλεγχος και η επιλογή της πηγής τροφοδοσίας οφείλει να γίνεται πριν από την αρχή του κύκλου λειτουργίας.
- ✚ Στην περίπτωση που η αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές επαρκεί για την λειτουργία του συστήματος φωτισμού καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου λειτουργίας τότε η πηγή τροφοδοσίας επιλέγεται να είναι ο συσσωρευτής.
- ✚ Στην περίπτωση που η αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή δεν επαρκεί για την πλήρη λειτουργία του συστήματος φωτισμού τότε γίνεται μεταγωγή στο ηλεκτρικό δίκτυο και το σύστημα λειτουργεί με την τάση του δικτύου για όλο τον κύκλο λειτουργίας.

Ακολουθώντας τις παραπάνω αρχές λειτουργίας η μονάδα ελέγχου διαχειρίζεται το σύστημα με τον ευνοϊκότερο τρόπο κάθε φορά. Η επιλογή της πηγής τροφοδοσίας γίνεται πριν από την έναρξη του κάθε κύκλου λειτουργίας του συστήματος φωτισμού. Ο κύκλος λειτουργίας έχει μεταβαλλόμενη διάρκεια ανά εποχή οπότε η χρήση χρονοδιακόπτη είναι δύσκολη στην εφαρμογή. Στη Σπάρτη, όπως και σε πολλές άλλες περιοχές την Ελλάδος, η έναυση των λαμπτήρων γίνεται με την χρήση ηλεκτρικών παλμών που αποστέλλονται μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Η μονάδα ελέγχου διαθέτει την κατάλληλη συσκευή για την υποδοχή του παλμού και αναγνωρίζει την αρχή του κύκλου λειτουργίας.

Η πρώτη λειτουργία είναι ο έλεγχος της αποθηκευμένης ενέργειας του συσσωρευτή. Γίνεται έλεγχος για το αν η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή είναι τουλάχιστον ίση με την στάθμη ασφαλείας που έχει προκαθοριστεί. Η στάθμη ασφαλείας αντιπροσωπεύει το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας που είναι αναγκαία για την αδιάλειπτη τροφοδοσία του συστήματος φωτισμού για έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας. Όπως αναφέρθηκε ο κύκλος λειτουργίας δεν είναι σταθερός οπότε η στάθμη

ασφαλείας μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή ώστε να αντιπροσωπεύει τις πραγματικές ανάγκες για ενέργεια σε κάθε περίπτωση.

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της κατάλληλης πηγής τροφοδοσίας για το σύστημα φωτισμού. Αυτό γίνεται μέσω ενός διακόπτη που ελέγχεται από την μονάδα ελέγχου και επιλέγει μεταξύ της εξόδου του inverter και της τάσης του δικτύου. Παράλληλα γίνεται και ο έλεγχος της λειτουργίας του φορτιστή του συσσωρευτή. Σε περιπτώσεις μεγάλης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχει μεγάλη περίσσεια σε ηλιακή ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή ο συσσωρευτής φορτίζεται σε μικρότερο σχετικά χρόνο. Η μονάδα ελέγχου σταματά την διαδικασία της φόρτισης σε ένα επίπεδο ασφαλείας τέτοιο ώστε αφενός να εξασφαλίζεται η αυτονομία του συστήματος, αφετέρου να προστατεύεται ο συσσωρευτής από συνεχή φόρτιση που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσής της και του χρόνου ζωής της.

6.5.3 Παρατηρήσεις

- ↓ Η μονάδα ελέγχου είναι αναγκαία μόνο στην περίπτωση που θα γίνει σύνδεση της εγκατάστασης φωτισμού με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Σε περίπτωση που το σύστημα θα εγκατασταθεί σε περιοχές που δεν υπάρχει δίκτυο ή σε περιπτώσεις γενικά που δεν μπορεί να γίνει η σύνδεση με το δίκτυο, η μονάδα ελέγχου δεν χρειάζεται και την θέση της παίρνει ένας χρονοδιακόπτης κατάλληλος για την έναυση του συστήματος φωτισμού. Σε αυτή την περίπτωση είναι λογικό ότι το σύστημα δεν θα έχει την δυνατότητα να λειτουργεί καθ' όλη την διάρκεια του έτους.
- ↓ Σε περιπτώσεις εγκατάστασης φωτισμού με μεγάλο αριθμό ιστών φωτισμού είναι δυνατή η προσθήκη μίας κεντρική μονάδας ελέγχου σε έναν «πιλοτικό» ιστό. Οι επιλογές της μονάδας ελέγχου που γίνονται στον ιστό αυτό μεταφέρονται και στους υπόλοιπους ιστούς με αποτέλεσμα να υπάρχει κεντρικός έλεγχος και κοινός τρόπος λειτουργίας ολόκληρης της εγκατάστασης.

7 Η αυτονομία του συστήματος

7.1 Έλεγχος αυτονομίας

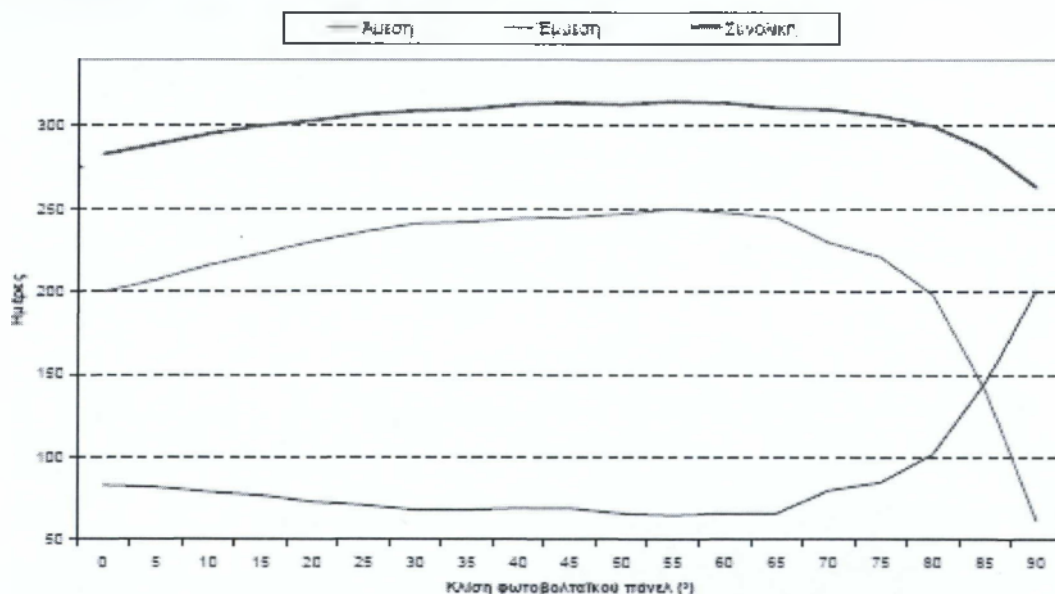
Η αυτονομία του συστήματος αντιπροσωπεύει την δυνατότητα που έχει να λειτουργεί μόνο με την χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγει σε μία ή και περισσότερες ημέρες του έτους. Η αυτονομία του συστήματος υπολογίζεται με βάση την δυνατότητα ισχύος του συστήματος, την συνολική κατανάλωση του φωτιστικού σώματος καθώς και την βοήθεια της μονάδας ελέγχου. Υπολογισμός της αυτονομίας σε ημέρες ανά έτος μπορεί να γίνει με την βοήθεια στατιστικών υπολογισμών για το έτος 2001 στο οποίο έχουν γίνει και οι προηγούμενοι υπολογισμοί του συστήματος. Η αντιπροσωπευτικότητα του συγκεκριμένου έτους δίνει την δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα ικανά να προσομοιώσουν την συμπεριφορά του συστήματος για να οποιοδήποτε έτος λειτουργίας υπό φυσιολογικές συνθήκες (κλιματολογικές, λειτουργικές κλπ).

Η συνολική κατανάλωση του συστήματος φωτισμού είναι αυτή που καθορίζει το ποσοστό της αυτονομίας. Το επιλεγμένο σύστημα φωτισμού έχει συνολική κατανάλωση 44W η οποία περιλαμβάνει την κατανάλωση ισχύος από τον λαμπτήρα, το φωτιστικό σώμα, το ηλεκτρονικό μπάλαστ κλπ. Το κριτήριο για το ποσοστό της

αυτονομίας αποτελεί η ετήσια απόδοση ισχύος του συστήματος που έχει αναλυθεί στην παράγραφο 6.3.3. Από το Διάγραμμα 6-3 φαίνεται ότι υπάρχει διαφορετική απόδοση ισχύος ανάλογα με την κλίση που έχει το φωτοβολταϊκό πάνελ, κάτι που σημαίνει ότι και η ετήσια αυτονομία του συστήματος θα ποικίλει ανάλογα με την κλίση του πάνελ.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αυτονομίας συνίσταται στον έλεγχο της ημερήσιας ικανότητας απόδοσης ισχύος του συστήματος σύμφωνα με τα δεδομένα του διαγράμματος 6-3. Ο έλεγχος γίνεται για κάθε κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ. Για τον σκοπό αυτό είναι αναγκαία η χρήση ενός προγράμματος που να υπολογίζει τις συνολικές ημέρες αυτονομίας του συστήματος για κάθε κλίση του πάνελ για το σύνολο του έτους. Οι συνολικές ημέρες αυτονομίας που προκύπτουν από κάθε διαφορετική κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ αποτελούν το άθροισμα 2 ομάδων. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι ημέρες άμεσης αυτονομίας, δηλαδή οι ημέρες κατά τις οποίες η ενέργεια που το σύστημα μπορεί να συλλέξει την ημέρα αυτή και μόνο είναι ικανή για να τροφοδοτήσει το φωτιστικό κατά την διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας. Με άλλα λόγια οι άμεσες ημέρες είναι εκείνες που στο Διάγραμμα 6-3 το σύστημα έχει απόδοση ισχύος μεγαλύτερη ή ίση των 44W. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τις ημέρες έμμεσης αυτονομίας, δηλαδή τις ημέρες κατά τις οποίες η απόδοση ισχύος είναι μικρότερη των 44W. Όσο αφορά τις ημέρες αυτές υπολογίζεται το πόσες γειτονικές ημέρες απαιτούνται για την φόρτιση των συσσωρευτών σε επίπεδο που να επαρκεί για την λειτουργία του συστήματος φωτισμού για έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτούνται δύο το πολύ τρεις ημέρες φόρτισης ώστε να φορτιστούν οι συσσωρευτές στο επιθυμητό επίπεδο.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω μεθοδολογία υπολογίζονται οι ημέρες αυτονομίας για κάθε διαφορετική κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ στο σύστημα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 7-1.



Διάγραμμα 7-1 Ημέρες αυτονομίας του συστήματος για διάφορες κλίσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ.

7.2 Επιλογή βέλτιστης κλίσης φωτοβολταϊκού πάνελ

Στο Διάγραμμα 7-1 φαίνεται ότι η άμεσες ημέρες αυτονομίας αυξάνονται μέχρι τις 60° περίπου ενώ έχουν πτώση μετά από την κλίση αυτή και έως τις 90°. Με αντίστροφο τρόπο μεταβάλλονται οι έμμεσες ημέρες αυτονομίας του συστήματος. Αυτό που ενδιαφέρει είναι το άθροισμα, δηλαδή οι συνολικές ημέρες αυτονομίας. Παρατηρείται ότι για κλίσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ από 45° έως 60° περίπου το σύστημα παρουσιάζει την μεγαλύτερη δυνατή αυτονομία. Αυτό οφείλεται στις περισσότερες ομαλοποιημένες καμπύλες των Διαγραμμάτων και που αντιστοιχούν στις γωνίες από 30° έως 70° σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Αριθμητικά μετά τους υπολογισμούς η μεγαλύτερη αυτονομία παρουσιάζεται για κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ στις 55° που είναι 315 ημέρες στο σύνολο του έτος. Από αυτές στις 250 ημέρες η ηλιακή ενέργεια που συλλέγει το σύστημα την ίδια ημέρα είναι επαρκής για την φόρτιση των συσσωρευτών, ενώ οι υπόλοιπες 65 ημέρες αυτόνομης λειτουργίας προκύπτουν από φόρτιση των συσσωρευτών σε δύο ή τρεις συνεχόμενες ημέρες.

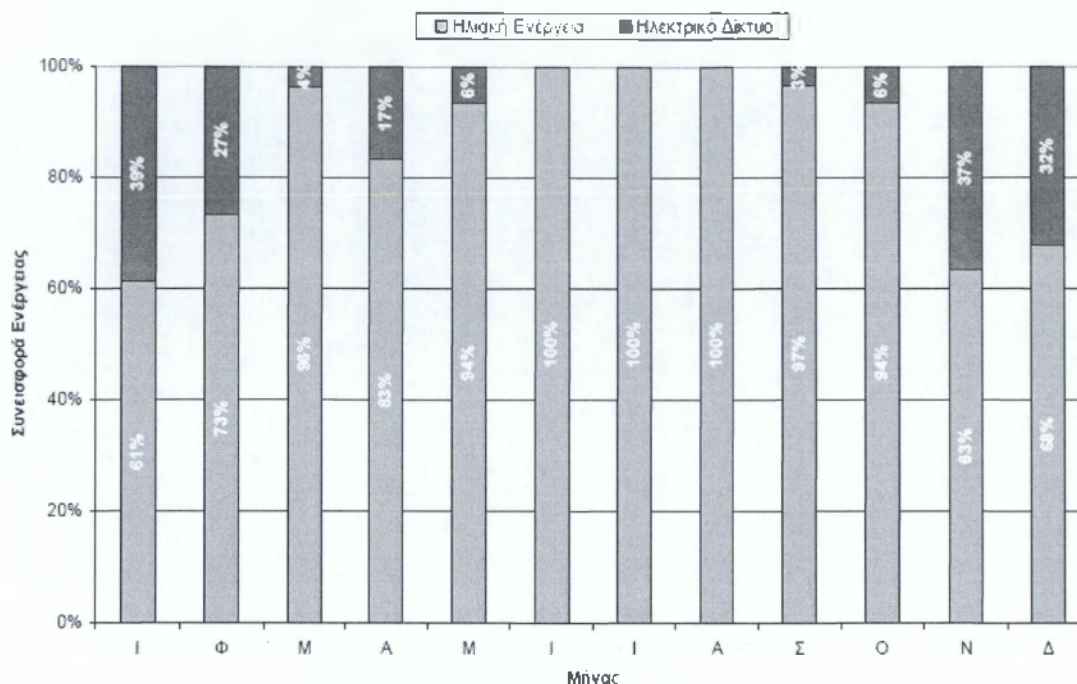
7.3 Εξοικονόμηση Ενέργειας

Πρωταρχικός σκοπός αυτής της μελέτης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος φωτισμού που κάνει χρήση της ηλιακής ενέργειας με σκοπό να εξοικονομηθεί ηλεκτρική ενέργεια και με ότι αυτό συνεπάγεται για το περιβάλλον. Στην παράγραφο αυτή γίνεται ο έλεγχος για το πόση τελικά ενέργεια είναι σε θέση να εξοικονομήσει το σύστημα. Οι υπολογισμοί αναφέρονται, όπως γίνεται κατανοητό, στο έτος 2001 αλλά εύκολα δίνουν μια τάξη μεγέθους των δυνατοτήτων του συστήματος.

Η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται με την χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος φωτισμού υπολογίζεται με βάση την ενέργεια που θα καταλάωνε το ίδιο σύστημα φωτισμού αν λειτουργούσε μόνο με τροφοδοσία από το ηλεκτρικό δίκτυο. Για το σύνολο του έτους το σύστημα με τροφοδοσία από το δίκτυο χρειάζεται $44\text{W} \cdot 365 \text{ Ημέρες} \cdot 11\text{h} = 176\text{kWh/έτος}$. Το υπό μελέτη φωτοβολταϊκό σύστημα χρειάζεται ενέργεια $44\text{W} \cdot (365-315) \text{ Ημέρες} \cdot 11\text{h} = 42\text{kWh/έτος}$. Επομένως η εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται περίπου στο 85%. Στους παραπάνω υπολογισμούς ως χρονική διάρκεια λειτουργίας του φωτιστικού τέθηκαν οι 11 ώρες που είναι μέσο ωράριο λειτουργίας για όλο το έτος. Αναλυτικότερα γίνονται υπολογισμοί για την χρήση ηλιακής ενέργειας και ενέργειας από το δίκτυο για κάθε μήνα του έτους και για την βέλτιστη κλίση του πάνελ (55°) που φαίνονται στο Διάγραμμα 7-2.

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται μια ποιοτική εικόνα για την συνεισφορά τόσο του φωτοβολταϊκού συστήματος όσο και του ηλεκτρικού δικτύου στην λειτουργία του συστήματος φωτισμού. Η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται είναι φανερή και σε ποσοστό που πλησιάζει στην πλήρη αυτονομία. Για την επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης αυτονομίας, μεγαλύτερης του 85% απαιτείται η χρήση μεγαλύτερης επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πάνελ που αυτό σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστο 2 φωτοβολταϊκά πάνελ σε κάθε ιστό φωτισμού. Αυτό

βέβαια θέτει σε κίνδυνο της κατασκευής λόγω επικινδυνότητας της στήριξης καθώς και επιβαρύνει το κόστος της κατασκευής του συστήματος.



Διάγραμμα 7-2 Ετήσιο ισοζύγιο ενέργειας

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι σε περίπτωση μεγάλης εγκατάστασης φωτισμού που θα γίνει χρήση του υπό μελέτη φωτοβολταϊκού συστήματος φωτισμού η εξοικονόμηση ενέργειας γίνεται υπολογίσιμη σε σύγκριση με την συνολική κατανάλωση ενέργειας για τον φωτισμό των οδών.

8 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η συγκεκριμένη έρευνα έγινε με σκοπό την μελέτη και ανάπτυξη ενός συστήματος φωτισμού δρόμων, το οποίο θα χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερο την ηλιακή ενέργεια. Η ανάγκη για να είναι το σύστημα μια ολοκληρωμένη μονάδα περιόρισε την χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ μεγάλης επιφάνειας με άμεσο αποτέλεσμα τον περιορισμό της ισχύος που το σύστημα θα μπορούσε να αποδώσει. Ως αντιστάθμισμα σε αυτόν τον περιορισμό έγινε χρήση ενός λαμπτήρα χαμηλής κατανάλωσης ενώ το φωτιστικό σώμα επιλέχθηκε με σκοπό την μέγιστη απόδοση του λαμπτήρα στον φωτισμό του δρόμου. Παράλληλα με την χρήση μαθηματικής μεθόδου προσδιορίστηκε η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος και επιλέχθηκε η βέλτιστη κλίση και ο προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Με δεδομένη την δομή και την απόδοση του συστήματος ερευνήθηκε η δυνατότητα του συστήματος να φωτίσει επαρκώς τυπικούς δρόμους σύμφωνα με τις προδιαγραφές που θέτουν διεθνείς φορείς. Το αποτέλεσμα όλης της μελέτης είναι ότι το σύστημα που έχει αναπτυχθεί είναι ικανό να φωτίσει δρόμο χαμηλής και μέσης

κυκλοφορίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές της CIE. Η εξοικονόμηση ενέργειας, κάτι που αποτελεί και τον πρωταρχικό στόχο της έρευνας, ανέρχεται σύμφωνα με τους υπολογισμούς στο 85%.

Όλη η μελέτη που παρουσιάζεται στα προηγούμενα κεφάλαια αναφέρεται στην θεωρητική προσέγγιση και ανάπτυξη του συστήματος που όμως βασίζεται σε τεκμηριωμένους υπολογισμούς και μαθηματικά μοντέλα. Το επόμενο βήμα, που δεν αποτελεί βέβαια μέρος της παρούσας μελέτης, είναι η δοκιμή στην πράξη του συστήματος που έχει αναπτυχθεί. Αυτό αναφέρεται στην κατασκευή του συστήματος, την τοποθέτησή του σε κατάλληλο εξωτερικό χώρο και την πιλοτική του εφαρμογή. Η προτεινόμενη περίοδος της δοκιμαστικής λειτουργίας είναι τουλάχιστον 2 έτη για να είναι το δείγμα αντιπροσωπευτικό. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας πρέπει να γίνεται καταγραφή των ηλεκτρικών και φωτομετρικών μεγεθών του φωτοβολταϊκού συστήματος και του συστήματος φωτισμού και η συγκέντρωσή τους σε βάση δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία.

Παράλληλα με την δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος πρέπει να γίνει και εξέλιξη του υπάρχοντος συστήματος βελτιώνοντας το κάθε μέρος του ή εφαρμόζοντας νέες ιδέες πάνω σε αυτό. Αυτό συνιστά στην έρευνα για νέους λαμπτήρες περισσότερο αποδοτικούς που πιθανότατα θα εμφανιστούν στο μέλλον, φωτοβολταϊκά πάνελ με καλύτερο συντελεστή απόδοσης, εύκαμπτα πάνελ και άλλα. Με την μελέτη των αποτελεσμάτων της δοκιμαστικής λειτουργίας θα γίνει φανερό η απόδοση του συστήματος στην πράξη καθώς και αν υπάρχουν σημεία που μπορούν να βελτιωθούν με νέα υλικά και εφαρμογές.

9 Βιβλιογραφία

- [01] R.Barlow, J.P. Louineau, P.L. Fraenkel, "*Design of PV Lighting systems for developing countries*", 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting
- [02] Trinh Quang Dung, Le Hoang To, "*Photovoltaic lighting in the rural development of Vietnam*", 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting
- [03] D.G.D.C. Wijeratna, "*Rural Lighting With SPV systems: Sri Lankan experience and strategy for development*", 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting
- [04] J. Moesslein, "*Photovoltaics in the light of sustainable development and qualitative growth*", Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the 24th, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Vol. 1, pp. 788-791, 1994.
- [05] N.P. Singh, B. Bhargava, "*Photovoltaic powered lights for Indian villages*", Photovoltaic Specialists Conference 1990, Conference Record of the 21st IEEE, Vol. 2, pp. 991-993, 1990.
- [06] R Barlow, J.P. Louineau, P.L. Fraenkel: "*Design of PV Lighting Systems for Developing Countries*" Proceeding of 3th Right Light Conference, Newcastle, UK, 1995
- [07] Βόκας Γεώργιος, "*Φωτοβολταϊκά Κύτταρα και Εφαρμογές*", Σημειώσεις σεμιναρίου, εκδόσεις ΕΜΠ, 2001.
- [08] *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Κ. Καγκαράκη, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992.
- [09] ΠΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ : <http://www.rae.gr/>

- [10] Androutsos A.I., P.G. Pligoropoulos, E.K. Bakis 2001, "*Beyond Kythnos Island - Advanced Autonomous Power Supply Systems with High Wind and Solar Penetration*", Proceedings of NTUA/RENES International Conference "Renewable Energies for Islands - Towards 100% RES Supply", Chania, Greece, June 14-16, 2001.
- [11] Πληγορόπουλος Π., Ε. Καλαγκιά, Γ. Βέργος, Α. Ανδρούτσος 1992, "Στοιχεία Λειτουργίας Φ/Β Σταθμού Αρκών. Αξιολόγηση Λειτουργίας του - Μελλοντικές Προοπτικές", Δ' Εθν. Συνέδριο "Ήπιες Μορφές Ενέργειας", Ξάνθη, 6-8 Οκτωβρίου 1992, ΙΗΤ, ΑΠΘ, Τομ. Β, σ. 14-21.
- [12] "*Photovoltaic Technology and their Future Potential*" EAB-OPET.
- [13] M. S. Rea, "*Lighting Handbook*", Illuminating Engineering Society (IES) of North America, 9th ed., New York, 2000.
- [14] Commission Internationale de l' Eclairage, "*Design methods for lighting of roads*", publication CIE No.132, 1999.
- [15] *British Standard BS 5489*: http://www.oxfordshire.gov.uk/annex_2-2.pdf
- [16] "*Urban design standards manual*", Street lighting, 1998.
- [17] Commission Internationale de l' Eclairage, "*Glare and uniformity in road lighting installations*", publication CIE No.31, 1990.
- [18] *OPTICS FOR STREETLIGHTING*: <http://www.eskimo.com/~jrterry/optics.Html>
- [19] *Light pollution*: <http://www.darksky.org/links/lighpoll.html>
- [20] Φ. Β. Τοπαλής, " Φωτοτεχνία. Βασικές αρχές φωτομετρίας και μελέτες φωτισμού", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1994.
- [21] OSRAM: <http://www.osram.com/>
- [22] Κ. Ρήγας, Π. Κορωνάκης, "Μετρήσεις έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα για την περιοχή των Αθηνών", Εκδόσεις ΤΕΕ, IV, τεύχος 1- 2, 1995.
- [23] Μετεωρολογική Υπηρεσία Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου NTUA METEO, <http://meteo.chi.civil.ntua.gr>
- [24] Δημ. Π. Λάλα, Δημ. Κ. Πισιμάνη, Βασ. Α. Νοταρίδου, "Μέθοδοι υπολογισμού εντάσεως ηλιακής ακτινοβολίας σε αυθαίρετης κλίσεως επίπεδο και πίνακες για 30°, 45° και 60° στον Ελληνικό χώρο", Εργαστήριο Μετεωρολογίας Πανεπιστημίου Αθηνών, Μάιος 1982.
- [25] A. Mefti, M.Y. Bouroubi, A. Adane, "*Generation of hourly solar radiation for inclined surfaces using monthly mean sunshine duration in Algeria*", Energy Convers. Mgmt, Elsevier Science Ltd, 1995.
- [26] Carlos Sierra Garriga, Eduardo García Ochoa, Lluís Ferrero, Lluís García: "*Design and Implementation of a PV Lighting System*" Proceeding of 4th Right Light Conference, Copenhagen, Denmark, 1997
- [27] Vinod Kumar Sharma, Antonio Colangelo and Giuseppe Spagna, *Photovoltaic technology: Basic concepts, sizing of a stand alone photovoltaic system for domestic applications and preliminary economic analysis*", Energy Convers. Mgmt. vol 36 No 3, pp 161-174, Elsevier Science Ltd, 1995
- [28] Wagdy R. Anis, M. Abdul-Sadek Nour, "*Energy losses in photovoltaic systems*", Energy Convers. Mgmt. vol 36 No 11, pp 1107-1113, Elsevier Science Ltd, 1995
- [29] J.G.M Kortman, M.G.H. Van Kampen, L.A Verhoff, G.Loois, "*A life cycle assessment of the environmental impact of photovoltaic streetlight systems*", Right light 4, Volume 1, 1997.
- [30] S.R. Harrington, T.D. Hund, "*Photovoltaic lighting system performance*",

Photovoltaic Specialists Conference, 1996., Conference Record of the 25th IEEE, pp. 1307-1310, 1996.

[31] N. Bisketzi, G. Polymeropoulos, F.V. Topalis: "*Some remarks on the mesopic vision in comparison with the photopic and scotopic vision*". Proceedings of Illuminat 2003, Cluj-Napoca, Romania, 8-9 May 2003

[32] N. Bisketzi, G. Polymeropoulos, M.B. Kostic, F.V. Topalis: "*Efficiency of road lighting installations from the point of view of mesopic vision*". Proceedings of the 3rd Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution, Med Power 2002, Athens, Greece, 4-6 November 2002