



**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**“ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΩΤΙΣΤΙΚΩΝ LED**  
**ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ Φ/Β”**



**Επιβλέπων Καθηγητής:**  
**Σπουδαστής:**

Γεώργιος Ιωαννίδης  
Χρήστος Αλεβίζος

ΑΜ: 36496

**Αθήνα**  
**Οκτώβριος - 2011**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας κ. Γ. Ιωαννίδη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πειραιά για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου πρόσφερε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Τσιώλη για τις πληροφορίες που μου έδωσε σχετικά με τα φωτοβολταϊκά και όλους τους διδάσκοντες του Τμήματος για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	i
Περιεχόμενα .....	ii
Λίστα σχημάτων .....	iv
Λίστα πινάκων .....	vi
Summary .....	vii
Πρόλογος .....	1
<b>1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Φ/Β συστήματα” .....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Ηλιακή ενέργεια .....	2
1.3 Φωτοβολταϊκή παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος .....	4
1.4 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών κυττάρων .....	5
1.5 Απόδοση φωτοβολταϊκών κυττάρων .....	8
1.6 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα .....	9
1.6.1 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα - λειτουργία .....	11
1.6.2 Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα – λειτουργία .....	13
1.7 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα .....	15
1.8 Εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	17
1.9 Προοπτικές .....	21
<b>2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “ Το πυρίτιο και οι εφαρμογές του στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία ” .....</b>	<b>24</b>
2.1 Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του πυριτίου .....	24
2.2 Ενεργειακές ζώνες και απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	26
2.3 Η χρήση του πυριτίου στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές .....	26
2.3.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου .....	28
2.3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου .....	29
2.3.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας (ribbon silicon) .....	30
2.3.4 Φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου (amorphous – thin film silicon) .....	30
<b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Φωτισμός δρόμων” .....</b>	<b>32</b>
3.1 Γενικά .....	32
3.2 Βασικά φωτοτεχνικά μεγέθη .....	34
3.3 Μεσοπική όραση (mesopic vision) .....	38
3.4 Μοντέλα μεσοπικής όρασης .....	39
3.5 Φωτισμός και μέγεθος της κόρης του ματιού – pupil lumens .....	43
3.6 Κατηγορίες φωτισμού δρόμων .....	45
3.7 Διατάξεις τοποθέτησης φωτιστικών δρόμου .....	47
3.8 Τύποι ιστών φωτισμού .....	49
3.9 Λαμπτήρες για φωτισμό δρόμων .....	51
<b>4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Φωτιστικά τεχνολογίας LED” .....</b>	<b>53</b>
4.1 Γενικά .....	53
4.2 Ιστορία .....	55
4.3 Πλεονεκτήματα των LED .....	56
4.4 Μειονεκτήματα των LED .....	59
4.5 Εφαρμογές των LED .....	60
4.6 Ηλιακά φώτα δρόμου με LED .....	61
<b>5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Μελέτη φωτοβολταϊκού συστήματος” .....</b>	<b>65</b>
5.1 Χρησιμοποιούμενα φωτιστικά .....	65
5.2 Υπολογισμοί ηλιακής ακτινοβολίας .....	68
5.3 Προσδιορισμός ενεργειακών αναγκών .....	73
5.4 Υπολογισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	75

5.5	Συσσωρευτές .....	85
5.6	Άλλες απαιτούμενες μονάδες .....	89
5.6.1	Ρυθμιστής φόρτισης.....	89
5.6.2	Αντιστροφέας .....	90
<b>6 °</b>	<b>Κεφάλαιο “Μελέτη οδικού φωτισμού” .....</b>	<b>93</b>
6.1	Γενικά .....	93
6.2	Μελέτη φωτισμού για μικρό δρόμο (περίπτωση αυτόνομου φ/β συστήματος).....	94
6.3	Μελέτη φωτισμού για δρόμο με δύο ρεύματα και νησίδα (περίπτωση διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος) .....	102
<b>7 °</b>	<b>Κεφάλαιο “Υπολογισμός κόστους” .....</b>	<b>110</b>
<b>8 °</b>	<b>Κεφάλαιο “Συμπεράσματα” .....</b>	<b>112</b>
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>113</b>
	<b>Παράρτημα 1 .....</b>	<b>122</b>
	<b>Παράρτημα 2 .....</b>	<b>130</b>

## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Ηλιακό κύτταρο κρυσταλλικού πυριτίου .....	6
Σχήμα 1.2: Δομή και λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων .....	6
Σχήμα 1.3: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	7
Σχήμα 1.4: Μια τυπική διάταξη φωτοβολταϊκού πάρκου .....	10
Σχήμα 1.5: Ορολογία για τα φωτοβολταϊκά ([16]) .....	11
Σχήμα 1.6: Διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος .....	12
Σχήμα 1.7: Διάγραμμα διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος .....	14
Σχήμα 1.8: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα τηλεπικοινωνιών στο όρος Δίρφη .....	18
Σχήμα 1.9: Το φωτοβολταϊκό σύστημα του ξενοδοχείου Elounda Island Villas .....	19
Σχήμα 1.10: Ο παραδοσιακός οικισμός στον Άσπρο Ποταμό Κρήτης (αριστερά) και άποψη του φωτοβολταϊκού συστήματος (δεξιά). .....	20
Σχήμα 1.11: Το φωτοβολταϊκό πάρκο της ΔΕΗ στην Κύθνο .....	20
Σχήμα 1.12: Το φωτοβολταϊκό πάρκο της Σίφνου .....	21
Σχήμα 1.13: Το φωτοβολταϊκό σύστημα του ΚΑΠΕ .....	21
Σχήμα 1.14: Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα .....	23
Σχήμα 2.1: Η κρυσταλλική δομή του πυριτίου. Αριστερά φαίνεται η διάταξη των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα και δεξιά μια μοναδιαία κυψελίδα σε μεγέθυνση ([33]) .....	25
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών στους 300° Κ. ....	27
Σχήμα 2.3: Κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου ([37]) .....	28
Σχήμα 2.4: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου ([37]) .....	29
Σχήμα 2.5: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου ([14]) .....	29
Σχήμα 2.6: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου ([14]). .....	30
Σχήμα 2.7: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου ([14]) .....	31
Σχήμα 3.1: Καμπύλες φασματικής φωτεινής απόδοσης .....	35
Σχήμα 3.2: Διαφορετική λαμπρότητα πηγών ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικών διαστάσεων.....	36
Σχήμα 3.3: Διατάξεις τοποθέτησης φωτιστικών σωμάτων .....	48
Σχήμα 3.4: Διατάξεις δίδυμου βραχίονα ([71]) .....	49
Σχήμα 3.5: Συνήθεις τύποι ιστών φωτισμού .....	50
Σχήμα 3.6: Στύλος φωτισμού με καμπύλο βραχίονα .....	50
Σχήμα 3.7: Στύλος φωτισμού με ευθύγραμμο βραχίονα .....	50
Σχήμα 3.8: Στύλος φωτισμού με διπλό βραχίονα .....	50
Σχήμα 3.9: Φωτισμός επί υψηλών ιστών .....	50
Σχήμα 4.1: LED σε διάφορα χρώματα και μεγέθη ([72]) .....	54
Σχήμα 4.2: Δίοδος φωτοεκπομπής (LED) ([73]) .....	55
Σχήμα 4.3: Φωτισμός γέφυρας με φωτιστικά LED .....	60
Σχήμα 4.4: Λαμπτήρες LED για οδικό φωτισμό ([97]) .....	64
Σχήμα 5.1: Τα φωτιστικά δρόμου SpeedStar BGP 322 και BGP 323 .....	67
Σχήμα 5.2: Το φωτιστικό CitySoul LED BGP431 .....	67
Σχήμα 5.3: Το φωτιστικό Mini CitySoul LED BGP430 .....	67
Σχήμα 5.4: Η ιστοσελίδα του προγράμματος PVGIS.....	69
Σχήμα 5.5: Γραφική απεικόνιση των δεδομένων του πίνακα 5.2 .....	71
Σχήμα 5.6: Γραφική απεικόνιση των δεδομένων του πίνακα 5.3 .....	73
Σχήμα 5.7: Παραδείγματα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κολόνες ηλιακού φωτισμού.....	82

Σχήμα 6.1: Τα βασικά χαρακτηριστικά του δρόμου που χρησιμοποιήσαμε για τη μελέτη .....	94
Σχήμα 6.2: Επιλογή κατηγορίας φωτισμού .....	95
Σχήμα 6.3: Τα κριτήρια σχεδιασμού για την κατηγορία φωτισμού ΜΕ3c .....	96
Σχήμα 6.4: Επιλογή φωτιστικού.....	96
Σχήμα 6.5: Επιλογή παραμέτρων σχεδιασμού.....	97
Σχήμα 6.6: Τα χαρακτηριστικά του δρόμου για το δεύτερο παράδειγμα.....	102
Σχήμα 6.7: Οι απαιτήσεις σχεδιασμού για την κατηγορία ΜΕ3α .....	103

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών .....	9
Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές λαμπρότητας .....	37
Πίνακας 3.2: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού ME .....	46
Πίνακας 3.3: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού MEW.....	46
Πίνακας 3.4: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού S .....	47
Πίνακας 3.5: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού CE .....	47
Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά λαμπτήρων φωτισμού δρόμων.....	51
Πίνακας 4.1: Σύγκριση λαμπτήρων LED οδικού φωτισμού με λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσεως.....	63
Πίνακας 5.1: Φωτεινή ροή και ηλεκτρική κατανάλωση των χρησιμοποιούμενων φωτιστικών .....	66
Πίνακας 5.2: Μηνιαίες και ετήσιες μέσες τιμές της ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας (Wh/m <sup>2</sup> ) και βέλτιστη κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης για το Περιστέρι.....	70
Πίνακας 5.3: Ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ενέργειας (Wh/m <sup>2</sup> ) για διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς .....	72
Πίνακας 5.4: Υπολογισμός χρόνου λειτουργίας φωτιστικών (σε h) ανά εικοσιτετράωρο για μια τυπική μέρα του κάθε μήνα .....	74
Πίνακας 5.5: Αντιπροσωπευτικές τιμές της ανά εικοσιτετράωρο κατανάλωσης ενέργειας (Wh) κάθε φωτιστικού για κάθε μήνα του έτους .....	74
Πίνακας 5.6: Ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που παίρνουμε από ένα m <sup>2</sup> φωτοβολταϊκού πλαισίου. Οι τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας έχουν παρθεί από τον πίνακα 5.2 .....	78
Πίνακας 5.7: Διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια (Wh) ανά m <sup>2</sup> φωτοβολταϊκού πλαισίου μετά την αφαίρεση των απωλειών.....	78
Πίνακας 5.8: Απαιτούμενα m <sup>2</sup> φωτοβολταϊκού πλαισίου για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κάθε φωτιστικού ανά μήνα.....	79
Πίνακας 5.9: Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων που αντιστοιχούν στις ανάγκες του κάθε φωτιστικού ανά μήνα .....	80
Πίνακας 5.10: Ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που αποδίδεται στο δίκτυο της ΔΕΗ από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο Sharp κατά μέσο όρο ανά ημέρα .....	84
Πίνακας 5.11: Ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που αποδίδεται στο δίκτυο της ΔΕΗ ανά ημέρα ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	84
Πίνακας 5.12: Διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια (Wh) που αποδίδεται στη ΔΕΗ ανά ημέρα και σε αυτή που καταναλώνεται, ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που αντιστοιχούν σε κάθε φωτιστικό .....	85
Πίνακας 5.13: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών που ξεχωρίσαμε .....	88

## SUMMARY

The aim of this diploma thesis was to study the usage of photovoltaic technology and light emitting diodes (leds) for autonomous street lighting applications. The first four chapters present the main characteristics of photovoltaic systems and leds. The state of the art of these technologies is briefly described and the main advantages and disadvantages of various approaches are outlined. Then, in chapter 5, a detailed study of a photovoltaic installation for a particular LED luminaire is conducted. The calculations are based on simulated irradiance measurements provided by an online tool by an official EU laboratory. Chapter 6 contains lighting calculations for different types of roads based on the Dialux software. Finally, chapter 7 provides some cost estimates and chapter 8 contains the overall conclusions of the project.

**Keywords:** solar street lighting, led lighting, autonomous photovoltaic systems



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια, τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας και τη χρήση ανανεώσιμων πηγών. Οι κύριοι λόγοι είναι η αύξηση της τιμής των συμβατικών καυσίμων και η διαφαινόμενη εξάντλησή τους στο μέλλον αλλά και η γενικότερη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος. Επιπλέον σημαντικό ρόλο έχει παίξει και η εξέλιξη της τεχνολογίας που έχει καταστήσει δυνατή την παραγωγή σημαντικών ποσών ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με σχετικά χαμηλό κόστος.

Η φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας είναι μια τεχνολογία που προσφέρεται ιδιαίτερα για χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια όπως η Ελλάδα. Στην εργασία αυτή μελετάται η χρήση της για αυτόνομα συστήματα οδικού φωτισμού με λάμπες LED. Οι λάμπες αυτές αποτελούν την τελευταία λέξη της τεχνολογίας στις εφαρμογές φωτισμού και συνδυάζουν υψηλή ποιότητα, χαμηλή κατανάλωση και μεγάλη διάρκεια ζωής ενώ είναι και ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον.

Η εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια γενική εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία και τις εφαρμογές της. Το δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει τα διάφορα είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου. Το τρίτο κεφάλαιο αφορά το φωτισμό δρόμων ενώ το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με τα φωτιστικά τεχνολογίας LED. Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει λεπτομερώς μια μελέτη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος για μια συγκεκριμένη λάμπα LED του εμπορίου, που επιλέχτηκε μετά από αναζήτηση στο διαδίκτυο με βάση τα χαρακτηριστικά της. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν προσομοιωμένες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχονται από την ιστοσελίδα ενός ερευνητικού εργαστηρίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για λόγους σύγκρισης και πληρέστερης παρουσίασης έχει γίνει και μια μικρή διερεύνηση ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος για δρόμους με υψηλές απαιτήσεις φωτισμού. Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται μελέτες φωτισμού για διάφορους τύπους δρόμων με χρήση του προγράμματος Dialux. Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια χοντρική εκτίμηση του κόστους της εφαρμογής και στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

**Λέξεις κλειδιά:** Ηλιακός φωτισμός δρόμων, φωτισμός LED, αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

# 1<sup>Ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## “Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ”

### 1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια που εκπέμπεται από τον Ήλιο και φτάνει έως τη Γη με τη μορφή της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι η κύρια πηγή ενέργειας γι' αυτήν, αφού συντελεί στη διατήρηση της θερμοκρασίας της, τροφοδοτεί τις άλλες πηγές ενέργειας και δίνει, μέσω της φωτοσύνθεσης, ζωή στα φυτά και, συνακόλουθα, στα ζώα. Η ηλιακή ακτινοβολία, όμως, γίνεται και άμεσα αντιληπτή ως θερμότητα. Έτσι, ο άνθρωπος από παλιά τη χρησιμοποίησε για να καλύψει κάποιες θερμικές ενεργειακές του ανάγκες. Μέχρι πριν μερικούς αιώνες, άλλωστε, οι θερμικές ήταν και οι σημαντικότερες χρήσεις της ενέργειας, γενικότερα.

Στη σύγχρονη εποχή, όμως, οι ενεργειακές εφαρμογές έχουν αυξηθεί δραματικά και, παράλληλα, έχουν αποκτήσει μεγάλη ποικιλία, με αποτέλεσμα η ποιότητα ζωής των ανθρώπων να εξαρτάται πλέον από το επίπεδο εξασφάλισης των ενεργειακών τους αναγκών και, κυρίως, από αυτό της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη, τα μεγάλα προβλήματα που έχουν δημιουργηθεί στο περιβάλλον, με κυριότερα από αυτά το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τη μείωση του όζοντος στην ατμόσφαιρα, έχουν πλέον γίνει πολύ γνωστά και κατανοητά σε όλους.

Καθώς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες συμβατικών καυσίμων, όπως είναι το πετρέλαιο και ο λιγνίτης, αυτή ευθύνεται κατά μεγάλο μέρος για τα προαναφερθέντα περιβαλλοντικά προβλήματα. Εάν, μάλιστα, ληφθεί υπ' όψη ότι τα διαθέσιμα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων έχουν μειωθεί αισθητά τα τελευταία χρόνια, προκύπτει ότι το ενεργειακό προβάλλει ως το ζοφερότερο σύγχρονο πρόβλημα του πλανήτη, το οποίο μάλιστα χρήζει άμεσης επίλυσης. Προς την κατεύθυνση αυτή, ευοίωνες είναι οι προοπτικές που ανοίγονται από την ανάπτυξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Πράγματι, καθημερινά προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης μία τεράστια ποσότητα ηλιακής ενέργειας, η οποία, αν και αποτελεί ένα μικρό μόλις κλάσμα της ολικής ενέργειας που παράγεται από τον Ήλιο, εντούτοις είναι 20.000 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που καταναλώνεται σήμερα σε ολόκληρο τον κόσμο και με οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρική, μηχανική, θερμική κλπ.). Η εκμετάλλευση της δυνατότητας αποδοτικής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος απευθείας από την ηλιακή ενέργεια μπορεί να υποκαταστήσει σε σημαντικό βαθμό τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής του, δίνοντας ταυτόχρονα λύση σε μεγάλο μέρος των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Ήδη από τον περασμένο αιώνα, για την ακρίβεια το 1839, παρατηρήθηκε ότι η ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει τις ιδιότητες ορισμένων υλικών, των ημιαγωγών. Αυτά, όταν φωτίζονται, μπορούν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, μέσω του “φωτοβολταϊκού φαινομένου”. Εάν σε ένα κομμάτι ημιαγωγίμου υλικού (συνήθως εμπλουτισμένος κρύσταλλος πυριτίου), τοποθετηθούν δύο ηλεκτρόδια, στις άκρες των οποίων λαμβάνεται το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, η σχετικά απλή διάταξη που προκύπτει ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο. Αυτό αποτελεί την κύρια συνιστώσα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, όπως ονομάζεται το σύστημα που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι πρώτες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων αναπτύχθηκαν μόλις τη δεκαετία του ‘50, με σκοπό την ηλεκτροδότηση των δορυφόρων. Το υψηλό τους κόστος, όμως, εμπόδισε την περαιτέρω διάδοσή τους την εποχή εκείνη. Στις αρχές της δεκαετίας του ‘70, μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση, έγινε ιδιαιτέρως αισθητή παγκοσμίως η ανάγκη απεξάρτησης από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Υπήρξαν τότε τα κίνητρα για την ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής βιομηχανίας και, έτσι, άρχισε δειλά η μαζική παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων για ευρύτερη καταναλωτική χρήση.

## 1.2 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας που είναι φιλική προς το περιβάλλον. Σε αντίθεση με την ενέργεια που προέρχεται από τα απολιθωμένα καύσιμα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να βρεθεί ελεύθερα σε όλα τα μέρη της γης και η διαθεσιμότητά της δεν επηρεάζεται από οικονομικές και πολιτικές συγκυρίες. Με την κατάλληλη τεχνολογία, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, φωτισμό ή παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας

Ειδικότερα, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: θερμικά ή φωτοβολταϊκά ([1]). Στα ηλιακά θερμικά συστήματα η ηλιακή

ακτινοβολία χρησιμοποιείται για τη θέρμανση νερού και τη μετατροπή του σε ατμό, που κινεί την τουρμπίνα μιας συνηθισμένης γεννήτριας ([2]). Αντίθετα, στα φωτοβολταϊκά συστήματα, το φως του ήλιου μετατρέπεται κατευθείαν σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών ([3]). Η δεύτερη αυτή μέθοδος, που βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με τρόπο άμεσο, εύκολο και αποδοτικό. Για το λόγο αυτό ο αριθμός των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών γεννητριών σε όλο τον κόσμο αυξάνει ραγδαία χρόνο με το χρόνο παρά το σχετικά υψηλό κόστος του εξοπλισμού και το γεγονός ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς δεν μπορεί να είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Οι πρώτες εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών κυττάρων πραγματοποιήθηκαν στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ και πιο συγκεκριμένα σε συστήματα δορυφόρων και διαστημικών σταθμών ([4]). Καθώς ο ήλιος ήταν η μόνη άμεσα διαθέσιμη πηγή ενέργειας στο διαστημικό περιβάλλον, η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας έδειχνε να είναι η μόνη εφικτή λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των συστημάτων αυτών. Έτσι η ραγδαία ανάπτυξη της διαστημικής τεχνολογίας κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα έδωσε την αφορμή για συστηματική έρευνα και ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων για την ηλεκτροδότηση σπιτιών ή άλλων εγκαταστάσεων στη γη ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Αρχικά το κόστος τους ήταν πολύ υψηλό και η χρήση τους περιοριζόταν κυρίως σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές, που η σύνδεσή τους με το δίκτυο ήταν πολύ δαπανηρή και οι οποίες βρίσκονταν σε τοποθεσίες, που δέχονταν σημαντικά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους. Οι σημαντικές όμως τεχνολογικές εξελίξεις, που έχουν σημειωθεί στον τομέα αυτό κατά τα τελευταία χρόνια, έχουν μειώσει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο σε εντυπωσιακό βαθμό. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι στα πρώτα φωτοβολταϊκά κύτταρα, που εμφανίστηκαν τη δεκαετία του '50, το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού ήταν 300\$/kW ([5]) ενώ στα σημερινά φωτοβολταϊκά συστήματα υψηλής ισχύος (>125 kW) το κόστος είναι περίπου 4\$/kW ([6]). Έτσι σήμερα η φωτοβολταϊκή τεχνολογία χρησιμοποιείται ευρύτατα σε πολλές χώρες του κόσμου και παράγει σημαντικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, την τελευταία δεκαετία η παγκόσμια αγορά των φωτοβολταϊκών έχει σημειώσει ραγδαίους ρυθμούς ανάπτυξης, πολλές φορές της τάξης του 50% το χρόνο ([7]). Η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς στο τέλος του 2008 ήταν 16 GW ([8])

ενώ το 2009 ανέβηκε στα 21 GW ([9]). Οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ είναι η Γερμανία, η Ισπανία, η Ιαπωνία και οι ΗΠΑ ενώ οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η Κίνα, η Γερμανία, οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία.

Στην Ελλάδα, το ενδιαφέρον για ηλιακά συστήματα ξεκίνησε την δεκαετία του 1970 αλλά οι εφαρμογές αφορούσαν κυρίως ηλιακούς συλλέκτες για τη θέρμανση νερού σε σπίτια. Μέχρι το 1987 υπήρξε μια σταθερή ανάπτυξη των εμπορικών δραστηριοτήτων, η οποία κορυφώθηκε στην περίοδο 1984-1986, χάρη και σε μια μεγάλη διαφημιστική εκστρατεία, που υποστηρίχτηκε από την ελληνική κυβέρνηση. Εκτιμήθηκε πως ο αριθμός των κατασκευαστών ηλιακών συλλεκτών σε αυτή τη περίοδο έφτανε τους 300 ενώ οι πωλήσεις έφτασαν τα 218000m<sup>2</sup>. Από το 1987 και μετά διάφορες οικονομικές συγκυρίες οδήγησαν στη σταθεροποίηση του ρυθμού ανάπτυξης της αγοράς ([10]). Αντίθετα, η φωτοβολταϊκή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα παρέμενε σε πολύ χαμηλά επίπεδα μέχρι τα μέσα της δεκαετίας που διανύουμε. Η κατάσταση φάνηκε να αλλάζει τον Ιούνιο του 2006 με το νόμο 3468/2006, ο οποίος θέσπιζε κίνητρα για την εγκατάσταση και λειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Παρά το γεγονός ότι η ανάπτυξη δεν ήταν τόσο ραγδαία όσο αρχικά έδειχνε, τόσο ο αριθμός των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων όσο και η εγκατεστημένη ισχύς σημειώνουν σημαντική αύξηση από χρόνο σε χρόνο ([11]).

### 1.3 Φωτοβολταϊκή παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος

Η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται χρησιμοποιώντας τα φωτοβολταϊκά (PV) ή ηλιακά κύτταρα. Τα κύτταρα αυτά (που λέγονται επίσης και στοιχεία ή κυψέλες) είναι συσκευές ημιαγωγών, συνήθως φτιαγμένες από πυρίτιο. Σε αντίθεση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα δεν περιέχουν υγρά, διαβρωτικές χημικές ουσίες ή κινούμενα μέρη. Παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με χρήση του φωτός, απαιτούν λίγη συντήρηση, δεν μολύνουν και λειτουργούν σιωπηλά, κάνοντας την φωτοβολταϊκή ενέργεια την καθαρότερη και ασφαλέστερη μέθοδο ηλεκτρικής παραγωγής. Επιπλέον, τα συνηθισμένα Φ/Β πλαίσια έχουν μια οικονομικά ενεργή ζωή 20 – 30 ετών.

Τα ηλιακά ηλεκτρικά ή φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν ένα ποσοστό της ηλιακής ενέργειας, που πέφτει πάνω τους, κατευθείαν σε ηλεκτρική. Το πυρίτιο είναι το δεύτερο αφθονότερο στοιχείο στο φλοιό της γης και είναι το ίδιο ημιαγωγίμο υλικό, που χρησιμοποιείται και στους υπολογιστές. Αν το πυρίτιο συνδυαστεί με ένα ή περισσότερα υλικά, παρουσιάζει ηλεκτρική συμπεριφορά όταν εκτεθεί στο φως του ήλιου. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόνια διεγείρονται από το φως και κινούνται μέσω του πυριτίου. Αυτό είναι γνωστό

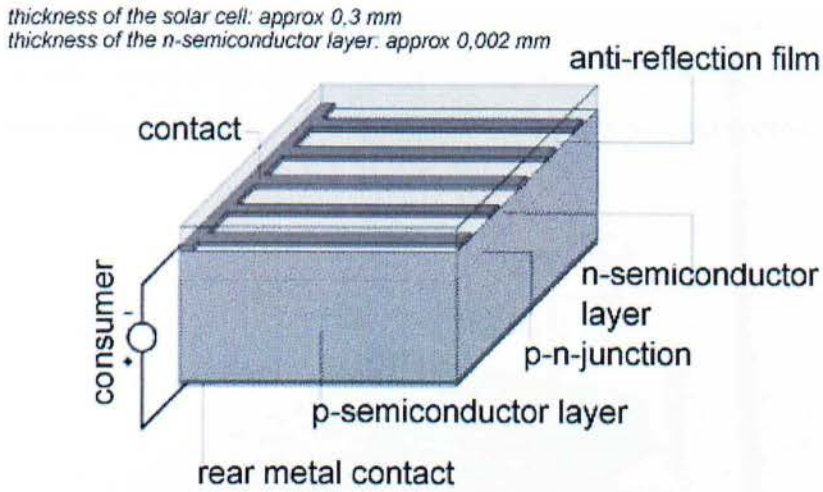
ως φωτοβολταϊκή επίδραση και οδηγεί στην άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή συνεχούς τάσης (DC).

Η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι μια από τις πιο ελπιδοφόρες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον κόσμο. Σε αντίθεση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνθρακα, το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο κλπ., η φωτοβολταϊκή παραγωγή δεν δημιουργεί απολύτως καμία ρύπανση του περιβάλλοντος, δε χρειάζεται βοήθεια από μηχανές και δεν απαιτεί πολύ συντήρηση. Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι ότι δεν απαιτεί μεγάλες εγκαταστάσεις. Μια ηλιακή γεννήτρια μπορεί να εγκατασταθεί σε κάθε σπίτι, επιχείρηση ή σχολείο, και να παράγει ισχύ ήσυχα και ακίνδυνα.

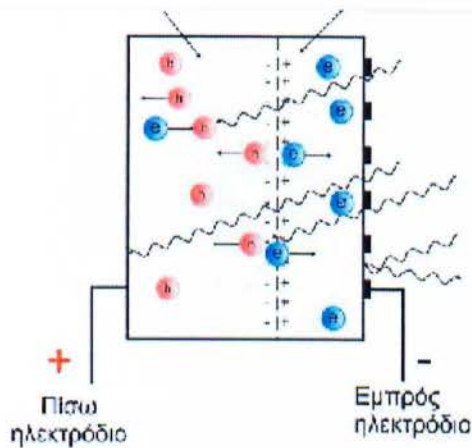
Ένα βασικό μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε σχέση με άλλες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι η τροφοδοσία τους (δηλαδή η ηλιακή ακτινοβολία) δεν παραμένει σταθερή αλλά αυξομειώνεται, συχνά με απότομο και απρόβλεπτο τρόπο, από μια μέγιστη τιμή μέχρι το μηδέν. Επίσης στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχονται στην επιφάνειά τους, σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον, ενώ και από την ακτινοβολία που διεισδύει στο στοιχείο ένα μέρος συμβάλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

#### **1.4 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών κυττάρων**

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή στην εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός ημιαγωγού, που η επιφάνειά του δέχεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (και ειδικότερα ηλιακό φως) ([12],[46],[47]). Όπως είναι γνωστό, το ηλιακό φως αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται φωτόνια. Η ενέργεια, που μεταφέρει κάθε φωτόνιο, είναι ανάλογη του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Έτσι π.χ. τα φωτόνια του γαλάζιου φωτός ή της υπεριώδους ακτινοβολίας έχουν περισσότερη ενέργεια από τα φωτόνια του κόκκινου φωτός ή των υπέρυθρων ακτίνων. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, από την άλλη μεριά, είναι ουσιαστικά δίοδοι από ημιαγωγό υλικό, που έχουν τη μορφή δίσκου. Η τυπική μορφή των φωτοβολταϊκών κυττάρων φαίνεται στα σχ. 1.1 ([12]) και 1.2 ([46]). Βλέπουμε ότι η επαφή p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου και δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία από την πλευρά τύπου n του ημιαγωγού, η οποία έχει γενικά πολύ μικρότερο πάχος.



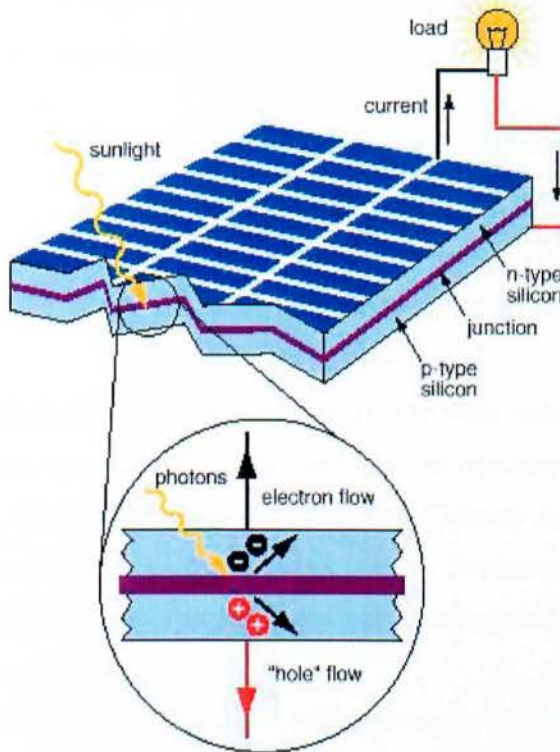
Σχήμα 1.1: Ηλιακό κύτταρο κρυσταλλικού πυριτίου



Σχήμα 1.2: Δομή και λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων

Όταν το ηλιακό φως πέφτει πάνω σε ένα τέτοιο κύτταρο, κάθε φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης  $p - n$  και να δεχτούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Όταν συμβεί αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $n$  (το μπροστινό μέρος του κυττάρου) ενώ οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $p$  (το πίσω μέρος του κυττάρου). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου και διατηρείται για όσο χρόνο συνεχίζεται η πρόσπτωση της ηλιακής

ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η διαδικασία αυτή, που εικονίζεται στα σχ. 1.2 και 1.3 [47], ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του φαινομένου αυτού [12,13].



Σχήμα 1.3: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ένα σημείο, που θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα, είναι ότι τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια ένα μικρό μόνο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχονται στην επιφάνειά τους ([46]). Αυτό συμβαίνει για διάφορους λόγους. Πρώτα-πρώτα, ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται προς το περιβάλλον. Η υπόλοιπη ακτινοβολία διεισδύει στον ημιαγωγό αλλά μόνο το μέρος της, που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μπορεί να απορροφηθεί. Για τα υπόλοιπα φωτόνια ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το υλικό του κυττάρου και απορροφάται στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο, που καλύπτει την πίσω όψη του, το οποίο και θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια, που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος της ενέργειας, που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται σαν κινητική ενέργεια στα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Τέλος, όπως



προαναφέρθηκε, ένα μέρος από τα ηλεκτρόνια, που ελευθερώνονται, επανασυνδέονται με σπές και παύουν να υφίστανται ως ελεύθεροι φορείς.

## 1.5 Απόδοση φωτοβολταϊκών κυττάρων


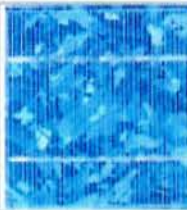


Η απόδοση των φωτοβολταϊκών κυττάρων ορίζεται ως το ποσοστό της φωτεινής ισχύος εισόδου, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Με άλλα λόγια, η απόδοση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{ΑΠΟΔΟΣΗ} = \frac{\text{ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ}}{\text{ΦΩΤΕΙΝΗ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ}} * 100\%$$

Η τιμή της απόδοσης ποικίλει ανάλογα με τον τύπο των κυττάρων, δηλαδή την τεχνολογία κατασκευής τους. Οι κυριότεροι τύποι είναι τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, τα φωτοβολταϊκά “λεπού υμενίου” (thin film, όπως είναι τα άμορφα, τα CIS, CdTe, κλπ.), καθώς και τα λεγόμενα “υβριδικά”, τα οποία συνδυάζουν τις τεχνολογίες των άμορφων και των μονοκρυσταλλικών, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνολογιών ([13]).

Με τη σημερινή τεχνολογία (η οποία βέβαια συνεχώς βελτιώνεται) τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια το 5 – 17% της ηλιακής ενέργειας που δέχονται. Τα κύτταρα, που χρησιμοποιούνται συνήθως, πετυχαίνουν γενικά βαθμό απόδοσης μεταξύ του 10% και του 20% ([13]), αν και εργαστηριακά έχει επιτευχθεί βαθμός απόδοσης κοντά στο 29% (κύτταρα GaAs ([14])) ενώ έχουν αναφερθεί και αποδόσεις της τάξεως του 40% σε κάποιες πειραματικές τεχνολογίες ([15]). Παρακάτω παρατίθεται ένας συγκριτικός πίνακας, που δείχνει τυπικές τιμές για την απόδοση, τη μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια ανά kWp και ανά m<sup>2</sup> και τη μέση ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών ([16]).

Πίνακας 1.1 Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών				
ΤΥΠΟΣ	'Λεπού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά	'Υβριδικά'
Εμφάνιση				
Απόδοση	Άμορφα: 5-7% CIS: 7-10% CdTe: 8-9%	11-14%	13-16%	16-17%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	10-20 m <sup>2</sup>	8-10 m <sup>2</sup>	7-8 m <sup>2</sup>	6-7 m <sup>2</sup>
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	1.300-1.400	1.300	1.300	1.350
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m <sup>2</sup> ) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	65-140	130-160	160-185	190-225
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO <sub>2</sub> ανά kWp)	1.380-1.485	1.380	1.380	1.435

## 1.6 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να παραχθεί μία σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία μαζί συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρονικά, σχηματίζοντας έτσι μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, τα στοιχεία αυτά έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό τζάμι και ειδικά μονωτικά πλαστικά. Η συνολική ηλεκτρική ισχύς μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι ίση με το άθροισμα της ισχύος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που την αποτελούν.

Πολλές φωτοβολταϊκές γεννήτριες, όταν συνδεθούν εν παραλλήλω μεταξύ τους, σχηματίζουν μία φωτοβολταϊκή συστοιχία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά

πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια ακτινοβολίας και, συνακόλουθα, η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τέτοιο κινητό σύστημα μπορεί να έχει από 15 έως 25% καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά πλαίσια όταν είναι τοποθετημένα σε σταθερά στηρίγματα.

Όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις στις οποίες γίνεται παραγωγή μέσης ή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η ύπαρξη πολλών φωτοβολταϊκών συστοιχιών, οι οποίες όλες μαζί σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάρκο (Σχ. 1.4). Αυτές διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο, στο διαθέσιμο χώρο, ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα σκίασης μεταξύ των διαφορετικών σειρών των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Ειδικά κατά τις ώρες που η ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνει μεγάλες τιμές, εάν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σκιάζουν το ένα το άλλο, υπάρχει μεγάλη πτώση στην απόδοση του συστήματος.

Έτσι, οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες πρέπει να τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές, με περίπου νότιο προσανατολισμό, και σε απόσταση μεταξύ τους τέτοια που να περιορίζεται η σκίαση στις πολύ πρώτες πρωινές ή τελευταίες απογευματινές ώρες. Η σκίαση που προκαλείται, και κατά συνέπεια η απόσταση που απαιτείται, είναι τόσο μεγαλύτερη όσο αυξάνει η γωνία τοποθέτησης των πλαισίων. Το φαινόμενο σκίασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι εντονότερο το χειμώνα, οπότε ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ορίζοντα και, ως εκ τούτου, η σκιά του κάθε πλαισίου εκτείνεται σε σημαντικό μήκος.



Σχήμα 1.4: Μια τυπική διάταξη φωτοβολταϊκού πάρκου

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες, όπως εξάλλου και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από τα οποία αποτελούνται, παράγουν πάντοτε ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς τάσης και, ανάλογα με την εφαρμογή, αυτό είτε χρησιμοποιείται απευθείας ως έχει, είτε μετατρέπεται σε ρεύμα εναλλασσόμενης τάσης. Ανεξάρτητα, όμως, από την εφαρμογή, οι γεννήτριες συνδυάζονται

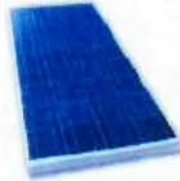
και με άλλες κύριες ή βοηθητικές ηλεκτρονικές συσκευές, σχηματίζοντας τα λεγόμενα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο κύριος διαχωρισμός των συστημάτων αυτών είναι σε αυτόνομα και διασυνδεδεμένα.

**Φωτοβολταϊκό φαινόμενο** ονομάζεται η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση. Για ευκολία, συνήθως χρησιμοποιούμε τη σύντμηση Φ/Β για τη λέξη "φωτοβολταϊκό" (*photovoltaic - PV*).

**Φωτοβολταϊκό στοιχείο:** Η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχεται ακτινοβολία. Λέγεται ακόμα Φ/Β κύτταρο ή Φ/Β κυψέλη (*PV cell*).



**Φωτοβολταϊκό πλαίσιο:** Ένα σύνολο Φ/Β στοιχείων που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της Φ/Β γεννήτριας (*PV module*).



**Φωτοβολταϊκό πάνελο:** Ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε Φ/Β εγκατάσταση (*PV panel*).

**Φωτοβολταϊκή συστοιχία:** Μια ομάδα από Φ/Β πλαίσια ή πάνελα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης (*PV array*).



**Φωτοβολταϊκή γεννήτρια:** Το τμήμα μιας Φ/Β εγκατάστασης που περιέχει Φ/Β στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα (*PV generator*).

Σχήμα 1.5: Ορολογία για τα φωτοβολταϊκά ([16])

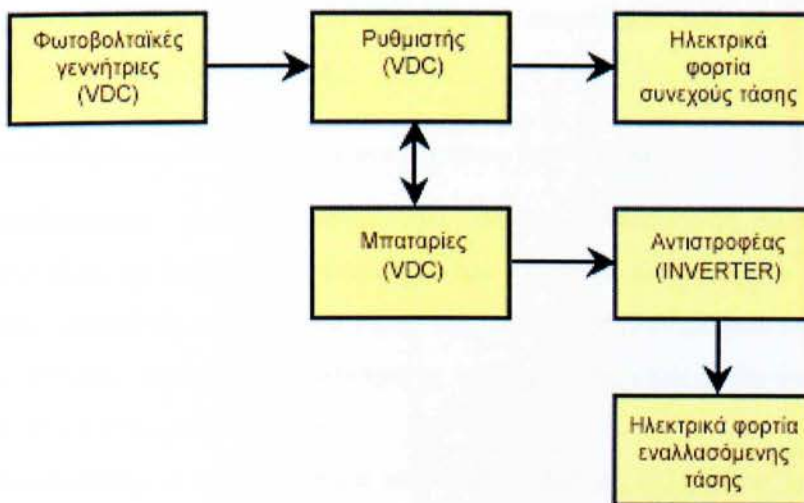
### 1.6.1 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα - λειτουργία

**Αυτόνομο σύστημα:** είναι ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά που καλύπτει πλήρως το σύνολο των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου ή μιας επαγγελματικής χρήσης. Τα συστήματα αυτά απαιτούν συσσωρευτές για την εξασφάλιση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις νυκτερινές ώρες ή σε μέρες συννεφιάς.

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι κατάλληλα για εφαρμογές που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο και βρίσκονται εγκατεστημένες κυρίως σε απομακρυσμένες ή απομονωμένες περιοχές. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αυτά καταναλώνεται εξ ολοκλήρου από το χρήστη, ενώ, στη συντριπτική τους πλειοψηφία, τα συστήματα αυτά διαθέτουν και διατάξεις αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Συνηθέστερα ηλεκτροδοτούν ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές συσκευές που λειτουργούν με συνεχή τάση, αν και είναι δυνατό, με την εγκατάσταση κατάλληλου μετατροπέα, να παρέχουν ηλεκτρική ισχύ και σε συσκευές που λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση.

Ένα τυπικό αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα εξής κύρια υποσυστήματα, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.6:

- Τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία κατ' ευθείαν σε ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς τάσης.
- Τη διάταξη αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, που συνήθως είναι κάποια μπαταρία.
- Τον ηλεκτρονικό ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος προστατεύει τις μπαταρίες τόσο από έντονη φόρτιση όσο και από υπερβολική εκφόρτιση.
- Τον αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση του παραγόμενου ρεύματος σε εναλλασσόμενη, εάν τα ηλεκτρικά φορτία απαιτούν κάτι τέτοιο.



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου. Το συνεχούς τάσης παραγόμενο ρεύμα ηλεκτροδοτεί τα υφιστάμενα ηλεκτρικά φορτία, εφ' όσον αυτά λειτουργούν με συνεχή τάση, και, παράλληλα, φορτίζει τις μπαταρίες, αποθηκεύεται δηλαδή με τη μορφή χημικής ενέργειας, κατά τρόπο ελεγχόμενο από το ρυθμιστή φόρτισης. Η αποθήκευση ενέργειας στις

μπαταρίες γίνεται προκειμένου να υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύκτας ή, ακόμα, τις ημέρες κατά τις οποίες η ηλιοφάνεια είναι περιορισμένη και δεν επαρκεί για την κάλυψη των προβλεπόμενων αναγκών.

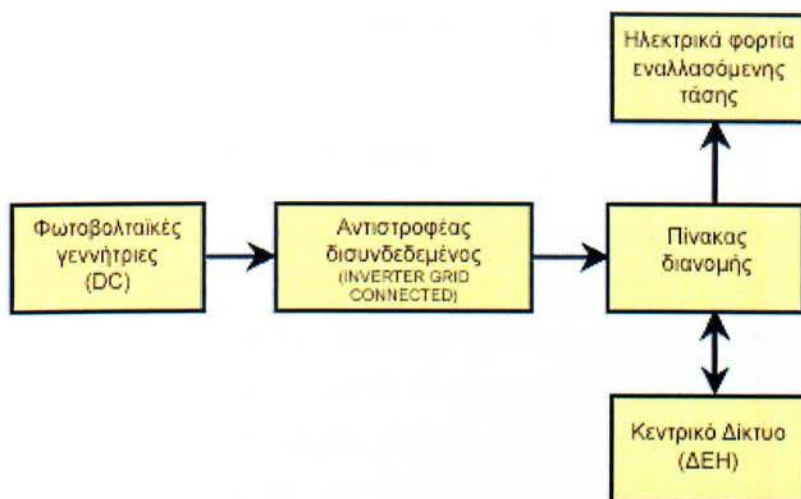
Ο ρόλος του ρυθμιστή φόρτισης στη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι σημαντικός. Όταν οι μπαταρίες έχουν φορτιστεί αρκετά καλά, ο ρυθμιστής διακόπτει την παροχή ρεύματος προς αυτές αποσυνδέοντας τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες, τις οποίες και επανασυνδέει όταν οι μπαταρίες εκφορτιστούν κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο και δεν υφίσταται πλέον κίνδυνος υπερφόρτισής τους. Από την άλλη μεριά, εάν οι μπαταρίες εκφορτιστούν πάρα πολύ, π.χ. σε περιόδους παρατεταμένης συννεφιάς, ο ρυθμιστής αποκόπτει από αυτές τα ηλεκτρικά φορτία συνεχούς τάσης, παρέχοντάς τους προστασία από τον κίνδυνο υπερβολικής εκφόρτισής τους. Τα φορτία επανασυνδέονται όταν οι μπαταρίες φορτιστούν πάνω από κάποιο προκαθορισμένο όριο ασφαλείας.

Ο ρυθμιστής φόρτισης, εκτός από την προστασία των μπαταριών, χρησιμεύει και ως κεντρικός πίνακας - διακλαδωτής για τα φορτία συνεχούς τάσης, κατευθύνοντας το ηλεκτρικό ρεύμα είτε προς χρήση είτε προς αποθήκευση, ανάλογα με την περίπτωση και τις ανάγκες. Εάν τα ηλεκτρικά φορτία λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση, τότε είναι υποχρεωτική η σύνδεση στο σύστημα ενός αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Αυτό γίνεται προκειμένου να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα συστήματα αυτά κοινές συσκευές του εμπορίου, η πλειοψηφία των οποίων λειτουργεί αποκλειστικά με εναλλασσόμενο ρεύμα.

### 1.6.2 Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα – λειτουργία

**Διασυνδεδεμένο σύστημα:** είναι ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού με φωτοβολταϊκά αλλά με σύνδεση στο βασικό δίκτυο της ΔΕΗ. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αυτοπαραγωγός μπορεί να καταναλώσει μέρος της παραγωγής ηλεκτρισμού και να πωλήσει στη ΔΕΗ το υπόλοιπο, έναντι προσυμφωνημένης τιμής, έχοντας κέρδος. Στο διασυνδεδεμένο σύστημα δεν απαιτούνται συσσωρευτές.

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι με άλλα λόγια κατάλληλα για εφαρμογές όπου υπάρχει πρόσβαση σε κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο και τροφοδοτούν με ενέργεια. Τα συστήματα αυτά δεν απαιτούν την ύπαρξη κάποιας διάταξης αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας (δηλ. μπαταριών), με αποτέλεσμα να περιορίζεται τόσο το κόστος κατασκευής όσο και αυτό της λειτουργίας τους, καθώς δεν χρειάζονται αναλώσιμα υλικά. Μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι, σ' αυτού του είδους τις εφαρμογές, ως "αποθήκη" ενέργειας χρησιμοποιείται το ίδιο το κεντρικό δίκτυο.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος

Ανάλογα με την εφαρμογή, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είτε αυτοκαταναλώνεται εν μέρει από το χρήστη και η πλεονάζουσα διοχετεύεται προς το κεντρικό δίκτυο, είτε αυτή παρέχεται (πωλείται) καθ' ολοκληρίαν στο δίκτυο. Ένα τυπικό διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες και τα ηλεκτρονικά διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Με τον όρο ηλεκτρονικά διασύνδεσης εννοούνται κυρίως οι διασυνδεδεμένοι αντιστροφέες ή αντιστροφέες δικτύου.

Το ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς τάσης που παράγεται κατά την απ' ευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική στις φωτοβολταϊκές γεννήτριες, μεταφέρεται στους διασυνδεδεμένους αντιστροφέες και αυτοί, με τη σειρά τους, τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα εναλλασσόμενης τάσης, ημιτονικό και συγχρονισμένο με αυτό του κεντρικού δικτύου. Από τους αντιστροφέες, μέσω κάποιου μετρητού ισχύος, το ηλεκτρικό ρεύμα διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο. Ο μετρητής ισχύος (π.χ. ένα κιλοβατόμετρο) καταγράφει τις κιλοβατώρες (kWh) που παράγονται από το φωτοβολταϊκό σύστημα και παρέχονται προς κατανάλωση.

Η παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό σύστημα ηλεκτρική ενέργεια αυτοκαταναλώνεται από τα διάφορα λειτουργούντα ηλεκτρικά φορτία του χρήστη. Εάν η παραγωγή δεν επαρκεί για την κάλυψη όλων των ηλεκτρικών φορτίων, τότε γίνεται προμήθεια της επιπλέον απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της νύκτας ή τις ημέρες με πυκνή συννεφιά, οπότε το σύστημα δεν είναι σε θέση να παράγει ενέργεια, όλη η απαιτούμενη από τα φορτία ηλεκτρική ισχύς προέρχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η παραγόμενη από το σύστημα ενέργεια δεν

καταναλώνεται εξ' ολοκλήρου από το χρήστη, οπότε εμφανίζεται πλεόνασμα, το οποίο διοχετεύεται στο δίκτυο και πωλείται ή γίνεται συμψηφισμός με την ήδη καταναλωθείσα από το δίκτυο ενέργεια.

### 1.7 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα

Τα φωτοβολταϊκά είναι μια τεχνολογία, που αναμένεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην αγορά ενέργειας τα επόμενα χρόνια. Στο καινούργιο επιχειρηματικό περιβάλλον της απελευθερωμένης αγοράς οι μικρές, ευέλικτες και αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού παραγωγής αναμένεται να αποτελέσει σύντομα ένα σημαντικό κομμάτι της συνολικής παραγωγής. Τεχνολογίες όπως τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά συστήματα συμπαραγωγής, οι μικροτουρμπίνες και οι κυψέλες καυσίμου είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την επιτυχημένη εγκατάσταση και λειτουργία των μονάδων αυτών.

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των νέων αυτών τεχνολογιών είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Η ηλιακή ενέργεια, ειδικότερα, είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη. Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι αδιαμφισβήτητα. Κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από φωτοβολταϊκά (και άρα όχι από συμβατικά καύσιμα) συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης 1,1 κιλών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου). Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα του ενός κιλοβάτ, αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1,3 – 1,4 τόνων διοξειδίου του άνθρακα, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν δύο στρέμματα δάσους. Επιπλέον, συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων (όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου κλπ.)

Η χρήση των φωτοβολταϊκών έχει και πολλά άλλα οφέλη για την κοινωνία γενικά και τους καταναλωτές ειδικότερα. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί έναν ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία μιας χώρας. Τα φωτοβολταϊκά, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα, θεωρούνται τα ιδανικά συστήματα ενεργειακής μετατροπής καθώς χρησιμοποιούν την πλέον διαθέσιμη πηγή ενέργειας στον πλανήτη, δεν έχουν κινούμενα μέρη και δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον. Έχουν αθόρυβη λειτουργία, χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, έχουν δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες και αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας (στο δίκτυο ή σε συσσωρευτές) ενώ απαιτούν ελάχιστη συντήρηση.



Ακόμη, δεδομένου ότι η παραγωγή και η κατανάλωση του ηλιακού ηλεκτρισμού γίνονται τοπικά, αποφεύγονται οι σημαντικές απώλειες της μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρισμού και κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% σε σχέση με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου ([17]).

Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά παρέχουν στους καταναλωτές απόλυτο έλεγχο και άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια και τους βοηθούν έτσι να γίνουν πιο προσεκτικοί στον τρόπο, που καταναλώνουν την ηλεκτρική ενέργεια, συμβάλλοντας μ' αυτό τον τρόπο στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση της ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων συνοψίζονται παρακάτω:

- Έχουν μηδενικό κόστος λειτουργίας, διότι δεν καταναλώνουν πρώτη ύλη.
- Μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απ' ευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Δεν παράγουν υποπροϊόντα και δε μολύνουν το περιβάλλον, αλλά βρίσκονται σε πλήρη αρμονία με το οικοσύστημα. Επίσης, δεν προκαλούν ηχορύπανση, αφού η λειτουργία τους είναι εντελώς αθόρυβη.
- Είναι εύχρηστα.
- Δεν προσβάλλουν αισθητικά το περιβάλλον και μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν μέσα σε πόλεις.
- Μπορούν να ενσωματωθούν στην αρχιτεκτονική του κτιρίου και να χρησιμοποιηθούν ακόμα και ως δομικά στοιχεία, μειώνοντας έτσι το κόστος κατασκευής μιας εγκατάστασης.
- Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας, π.χ. με ένα αιολικό πάρκο, σε υβριδικά συστήματα.
- Επεκτείνονται εύκολα και ανά πάσα στιγμή, για να καλύψουν κάποια αύξηση των αναγκών σε ενέργεια των χρηστών.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και μεγάλη αξιοπιστία.
- Έχουν πρακτικά μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης.
- Παρέχουν πλήρη ενεργειακή ανεξαρτησία στο χρήστη, όπου και αν βρίσκεται αυτός. Μπορούν έτσι να εγκατασταθούν σε δυσπρόσιτες περιοχές ή όπου δεν είναι δυνατό, ή/και οικονομικά συμφέρον, να φτάσει το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα αποκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παράγουν «δωρεάν» ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο, που είναι μια ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.

Από την άλλη μεριά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν σχετικά υψηλό κόστος αγοράς για τον οικιακό καταναλωτή. Όπως και όλες οι υπόλοιπες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνολογίες, οι οποίες έχουν συνήθως μικρότερο σχετικά κόστος αρχικής επένδυσης και υψηλά λειτουργικά κόστη.

Τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Υψηλό κόστος των φ/β κυττάρων αλλά και των συσσωρευτών.
- Η εγκατάστασή τους απαιτεί σχετικά μεγάλες επιφάνειες, λόγω της μικρής απόδοσης.
- Λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, στις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι αρκετά δαπανηρή.
- Η κατασκευή τους απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας ενώ συνδέεται και με την παραγωγή ρύπων.

Παρ' όλα αυτά, ήδη το κλίμα φαίνεται να αλλάζει. Πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών, με γενναίες επιδοτήσεις τόσο της αγοράς και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.

## 1.8 Εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, λόγω των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων τους, βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν παντού, όπου απαιτείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία τους έχει ωριμάσει αρκετά και μπορούν να εξυπηρετούν και τα πλέον απαιτητικά ηλεκτρικά φορτία, χωρίς κανένα πρόβλημα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δίνουν αξιόπιστες και ικανοποιητικές λύσεις στο πρόβλημα του ηλεκτρισμού εκεί όπου δεν υπάρχει ηλεκτρική ενέργεια ή η μεταφορά της συνεπάγεται μεγάλο κόστος ή, ακόμα, εκεί όπου είναι αδύνατον να εγκατασταθεί άλλη πηγή ενέργειας. Τέλος, τα συστήματα αυτά είναι σκόπιμο να εγκαθίστανται εκεί όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία, καθώς και ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για συντήρηση και επίβλεψη.

Γεγονός, όμως, είναι ότι το υψηλό κόστος που, προς το παρόν, απαιτείται για την αγορά και την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, έχει περιορίσει μέχρι σήμερα τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές, που χαρακτηρίζονται συνήθως από:

- Μικρές ενεργειακές απαιτήσεις.
- Αδυναμία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από άλλη πηγή.

- Απαιτήσεις μεγάλης αξιοπιστίας.
- Επιθυμία ελάχιστης συντήρησης και παρακολούθησης.

Σε εφαρμογές που παρουσιάζουν κάποια από, ή και όλα, τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα γνωρίζουν σημαντική εξάπλωση.

Έτσι, οι πιο ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές τους είναι ορισμένες συσκευές χειρός, όπως π.χ. φανοί, ρολόγια, ηλεκτρονικά παιχνίδια, αριθμητικές μηχανές κ.ά., που συχνά τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία και ενεργοποιούνται με τη βοήθεια του φωτός, αντί να καλύπτουν τις ανάγκες τους με μπαταρίες. Επίσης, σε τροχόσπιτα και σκάφη αναψυχής, σε αγροτικές ή εξοχικές κατοικίες, καθώς και σε μικρά ή/και απομονωμένα, ως επί το πλείστον, ξενοδοχεία χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα, προκειμένου να αποφευχθεί η εξάρτηση από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Εξάλλου, τέτοια φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται και σε ορεινά καταφύγια, παρατηρητήρια δασοφυλάκησης, τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς (σχ. 1.8) ή/και σε φάρους ναυτιλίας, εξαιτίας της αδυναμίας πρόσβασής τους στο κεντρικό δίκτυο.

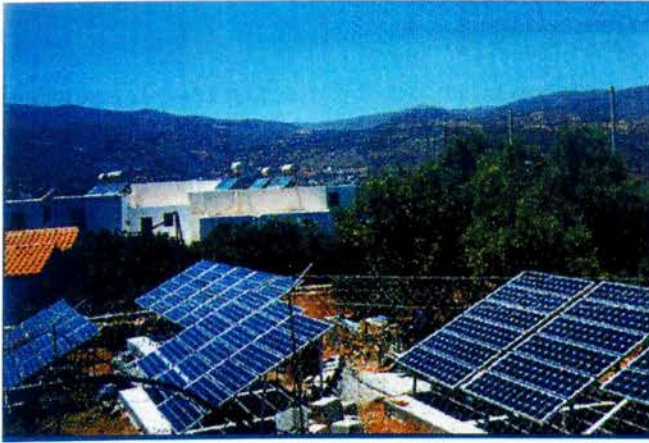


Σχήμα 1.8: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα τηλεπικοινωνιών στο όρος Δίρφη

Ακόμα και μέσα στην πόλη, όμως, φωτοβολταϊκά συστήματα μικρού μεγέθους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ηλεκτροδότηση τηλεφωνικών θαλάμων, μηχανημάτων εκδόσεως εισιτηρίων, ηλεκτρονικών πινακίδων πληροφοριών, καθώς επίσης για το φωτισμό οδών και, γενικότερα εξωτερικών χώρων διαφόρων ειδών. Επίσης, με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι δυνατό να ηλεκτροδοτηθούν συστήματα φωτεινής σηματοδότησης της κυκλοφορίας, αλλά και προληπτικής ή προειδοποιητικής σήμανσης, που τοποθετούνται όταν π.χ. γίνονται έργα ή υπάρχει μεγάλη κυκλοφορία σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο.

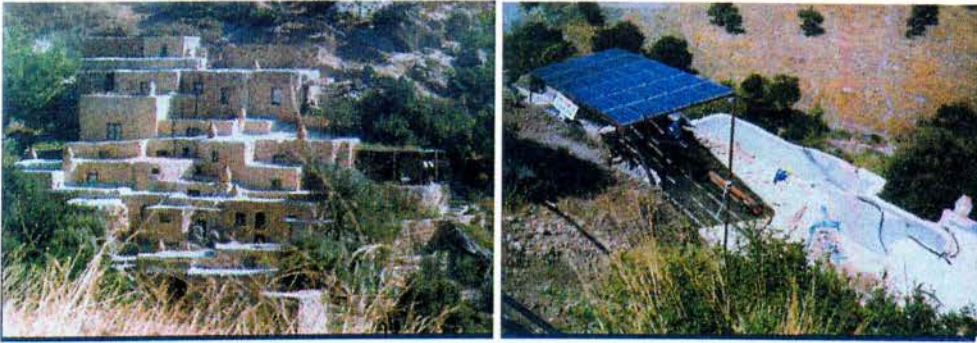
Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εξυπηρετήσουν άριστα μεμονωμένες κατοικίες ή μεγαλύτερες μονάδες, όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία, σχολεία, κλπ. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι μία κατοικία στις Μαργαρίτες Ρεθύμνου, όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα, ισχύος 1000 W περίπου που εγκαταστάθηκε το 1992, ηλεκτροδοτεί όλες σχεδόν τις εγκατεστημένες ηλεκτρικές συσκευές.

Πιο πρόσφατα, τον Ιούνιο του 1996, εγκαταστάθηκε ένα ανάλογο, αλλά αρκετά μεγαλύτερο, φωτοβολταϊκό σύστημα στο ξενοδοχείο Elounda Island Villas (Σχ. 1.9). Το εν λόγω σύστημα, ισχύος 6.500 W, εξυπηρετεί όλες τις ανάγκες ηλεκτροδότησής του δυναμικότητας 50 κλινών ξενοδοχείου (φωτισμός, ψυγεία, μικροσυσκευές) ([130]).



*Σχήμα 1.9: Το φωτοβολταϊκό σύστημα του ξενοδοχείου Elounda Island Villas*

Επιπλέον, συστήματα αυτού του είδους, μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος, μπορούν να εξυπηρετήσουν ικανοποιητικά τις ανάγκες ολόκληρων μικρών οικισμών, όπως έχει γίνει στην περίπτωση του παραδοσιακού οικισμού στον Άσπρο Ποταμό Κρήτης (Σχ. 1.10). Ο εν λόγω οικισμός αποτελείται από 14 οικίες, ανακαινίστηκε το 1989 και έκτοτε γίνεται συστηματική εκμετάλλευσή του για τουριστικούς λόγους. Τον Οκτώβριο του 1991 εγκαταστάθηκε φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 1500 W, το οποίο ηλεκτροδοτεί τα ψυγεία και τα φώτα του οικισμού, καθώς και μερικές τηλεοράσεις. Κατά το σχεδιασμό του δόθηκε μεγάλη προσοχή, εκτός από την αξιοπιστία του συστήματος, και στην αισθητική του, με αποτέλεσμα να τοποθετηθεί σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο και να μη φαίνεται σχεδόν από πουθενά.



Σχήμα 1.10: Ο παραδοσιακός οικισμός στον Άσπρο Ποταμό Κρήτης (αριστερά) και άποψη του φωτοβολταϊκού συστήματος (δεξιά).

Η σημαντικότερη, βέβαια, χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αφορά τη λειτουργία σταθμών ηλεκτροπαραγωγής μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους, όπου το ηλεκτρικό ρεύμα αυτοκαταναλώνεται από τον παραγωγό ή διοχετεύεται στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ή συμβαίνουν και τα δύο παράλληλα, ανάλογα με τις ανάγκες. Στην Ελλάδα, η πρώτη και σημαντικότερη τέτοια εγκατάσταση έχει γίνει από τη ΔΕΗ στην Κύθνο (Σχ. 1.11). Το φωτοβολταϊκό πάρκο που εγκαταστάθηκε εκεί σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε συνδυασμό με ένα αιολικό πάρκο, που έχει επίσης εγκαταστήσει η ΔΕΗ στο νησί, και τον υπάρχοντα συμβατικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό τη μείωση της ποσότητας ρεύματος που παράγεται από ορυκτά καύσιμα.



Σχήμα 1.11: Το φωτοβολταϊκό πάρκο της ΔΕΗ στην Κύθνο

Η ηλιακή γεννήτρια του φωτοβολταϊκού σταθμού της Κύθνου, που έχει μέγιστη δυνατότητα εξόδου 100 kWp (ο δείκτης “p” σημαίνει “peak”, αναφέρεται δε σε τιμή αιχμής).

Άλλη μία σημαντική εγκατάσταση είναι αυτή της Σίφνου (Σχ. 1.12). Το 2000 εγκαταστάθηκε στη Σίφνο φωτοβολταϊκό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 60kWp συνδεδεμένο στο τοπικό δίκτυο με μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας 100.000 kWh. Χρησιμοποιήθηκαν Φ/Β συλλέκτες πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 1.12: Το φωτοβολταϊκό πάρκο της Σίφνου

Τέλος στις εγκαταστάσεις του ΚΑΠΕ τοποθετήθηκε Φ/Β σύστημα ισχύος 40kWp το Νοέμβριο του 2003 (Σχ. 1.13).



Σχήμα 1.13: Το φωτοβολταϊκό σύστημα του ΚΑΠΕ

## 1.9 Προοπτικές

Το βασικότερο μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων σήμερα, το οποίο αποτελεί τροχοπέδη για την επέκταση της χρήσης τους σε ευρεία κλίμακα, θεωρείται το

υψηλό κόστος κτήσης τους, δηλαδή το σχετικά μεγάλο κεφάλαιο που απαιτείται να επενδυθεί για την αγορά των συστημάτων αυτού του είδους, με συνακόλουθα μεγάλο διάστημα απόσβεσης της σχετικής επένδυσης, έναντι της χρήσης των συμβατικών μορφών ενέργειας. Αν και το κόστος εγκατάστασης των διάφορων φωτοβολταϊκών συστημάτων μειώνεται με ταχύ ρυθμό, δεν έχει ακόμα φτάσει σε επίπεδα τέτοια που να είναι βραχυπρόθεσμα ανταγωνιστικό άλλων, συμβατικών κυρίως, τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας.

Δεν είναι, όμως, απολύτως ορθό και δίκαιο η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, όπως και οι άλλες τεχνολογίες εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, να συγκρίνεται μόνο από την άποψη του οικονομικού οφέλους του επενδυτή με τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Πρέπει, παράλληλα, κατά τις συγκρίσεις να λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιαιτερότητες των εφαρμογών που μπορεί αυτή να έχει, καθώς και το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από την εφαρμογή της, το οποίο, αν και δεν υπάρχει ακριβής τρόπος αποτίμησής του, αποτελεί σπουδαίο παράγοντα στις μέρες μας.

Η Ελλάδα είναι μία από τις πιο ευνοημένες χώρες του πλανήτη από πλευράς ηλιοφάνειας και παρουσιάζει ευνοϊκότερες προϋποθέσεις για τη χρήση και την ευρεία διάδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Λόγω της μορφολογίας της, υπάρχουν περιοχές, τόσο στην ηπειρωτική όσο και στη νησιωτική χώρα, όπου η εγκατάσταση συστημάτων αυτού του είδους είναι η πλέον ανταγωνιστική οικονομικά λύση, ακόμα και με τα σημερινά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, έχουν ήδη εγκατασταθεί και λειτουργούν αρκετά φωτοβολταϊκά συστήματα σε διάφορες εφαρμογές, για τις οποίες αποτελούν τις πιο ενδεδειγμένες τεχνικά και οικονομικά λύσεις (Σχ. 1.14). Η περαιτέρω ανάπτυξη και αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, η οποία είναι μία από τις πλέον “καθαρές” τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, ακόμα και σε σχέση με τις τεχνολογίες εκμετάλλευσης των άλλων μορφών των Α.Π.Ε., είναι βέβαιο ότι θα συμβάλει σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, μειώνοντας την εξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο και ενισχύοντας την ασφάλεια του ενεργειακού ανεφοδιασμού. Παράλληλα, θα συντελέσει κατά πολύ στην προστασία του περιβάλλοντος και στην αξιοποίηση των τοπικών ενεργειακών πόρων, με αντίστοιχες ευεργετικές επιπτώσεις στην τοπική ανάπτυξη (πραγματοποίηση επενδύσεων με μακρύ χρονικό ορίζοντα, δημιουργία νέων θέσεων εργασίας σε τοπικό επίπεδο, ενεργειακή αποκέντρωση κλπ.).



Σχήμα 1.14: Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα



## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ ΤΟ ΠΥΡΙΤΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΣΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ”

#### 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του πυριτίου

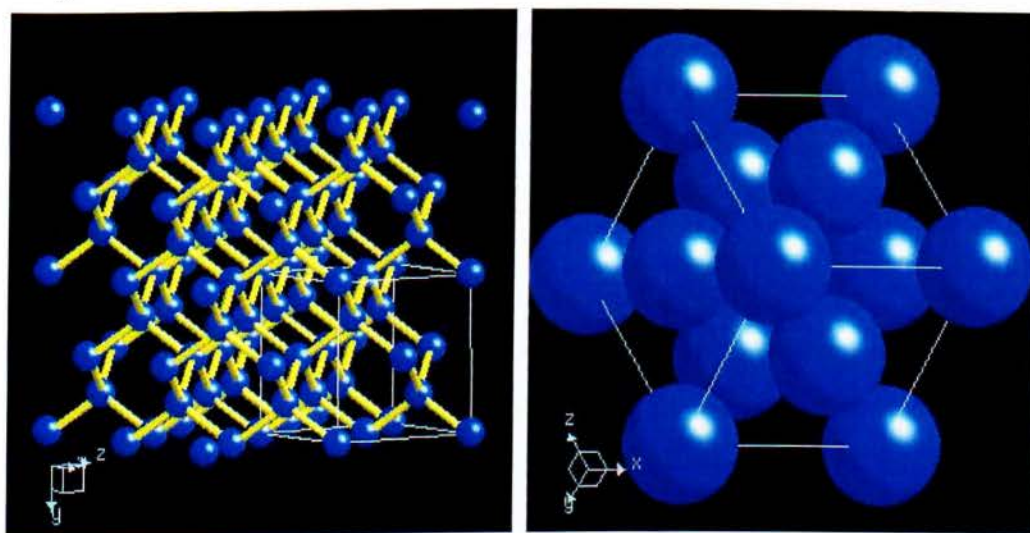
Το πυρίτιο είναι το σημαντικότερο από τα χημικά στοιχεία, που ονομάζονται ημιαγωγοί. Έχει ατομικό αριθμό 14 και ανήκει στην IVA ομάδα του περιοδικού πίνακα μαζί με τον άνθρακα, το γερμάνιο, τον κασσίτερο και το μόλυβδο. Το άτομο του πυριτίου διαθέτει 4 ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική στοιβάδα ([18]).

Το στοιχείο πυρίτιο δεν συναντιέται στη φύση σε ελεύθερη μορφή. Όμως τα διάφορα ορυκτά και πετρώματά του αποτελούν το 87% του φλοιού της Γης ([18]), ενώ είναι το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη γήινη φύση μετά το οξυγόνο, με ποσοστό 28% και το έβδομο πιο άφθονο στοιχείο στο Σύμπαν ([19]). Εξαιτίας της αφθονίας του στη φύση αλλά και των ιδιοτήτων του, το πυρίτιο και οι ενώσεις του χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας (ολοκληρωμένα κυκλώματα και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, σιλικόνες, διάφορες πρώτες ύλες στη μεταλλουργία, την υαλουργία, την τσιμεντοβιομηχανία, την αγγειοπλαστική, κ.α.) ([20]). Επιπλέον το πυρίτιο αποτελεί την πρώτη ύλη για την κατασκευή των πιο συνηθισμένων τύπων ηλιακών κυττάρων, που χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές ([14]).

Το πυρίτιο συναντάται σε δύο αλλοτροπικές μορφές: μια άμορφη και μια κρυσταλλική. Το άμορφο πυρίτιο έχει την εμφάνιση καφετιάς σκόνης. Αντίθετα, το κρυσταλλικό έχει σκούρο γκρι χρώμα, είναι σκληρό και παρουσιάζει μεταλλική λάμψη. Δεν είναι ούτε ελατό ούτε όλκιμο και σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκεται σε στερεή κατάσταση. Είναι ημιαγωγός ακόμη και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, ενώ δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας ([18], [19]).

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του πυριτίου (και γενικότερα των ημιαγωγών), μπορούν να περιγραφούν συνοπτικά ως εξής ([34],[35]): Σε ένα κρύσταλλο πυριτίου (σχ. 2.1) κάθε άτομο συνδέεται με τέσσερα γειτονικά άτομα, με τα οποία μοιράζεται από ένα ζεύγος ηλεκτρονίων

και σχηματίζει χημικό δεσμό. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κοντά στο απόλυτο μηδέν) το κάθε άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση έχοντας 8 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα. Στην κατάσταση αυτή δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρισμού και το πυρίτιο συμπεριφέρεται ως μονωτής. Στις συνηθισμένες θερμοκρασίες κάποια από τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας αποκτούν τέτοια κινητική ενέργεια, που τους επιτρέπει να μεταπηδήσουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και να μετατραπούν σε ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι κενές θέσεις, που αφήνουν στους χημικούς δεσμούς τα ηλεκτρόνια αυτά, ονομάζονται οπές. Αν εφαρμοστεί μια τάση στα άκρα του ημιαγωγού, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Με τον τρόπο αυτό το πυρίτιο εμφανίζει μια μικρή αγωγιμότητα, η οποία, όπως συμβαίνει σ' όλους τους ημιαγωγούς, οφείλεται στη συνεισφορά τόσο των ελεύθερων ηλεκτρονίων όσο και των οπών. Η αγωγιμότητα των ημιαγωγών αυξάνει σημαντικά όταν αυτοί νοθευτούν με μια μικρή ποσότητα ενός πεντασθενούς ή τρισθενούς στοιχείου, η οποία δημιουργεί στο κρυσταλλικό πλέγμα μια περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων ή οπών, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1: Η κρυσταλλική δομή του πυριτίου. Αριστερά φαίνεται η διάταξη των ατόμων στο κρυσταλλικό πλέγμα και δεξιά μια μοναδιαία κυψελίδα σε μεγέθυνση ([33])

Εκτός από την αύξηση της κινητικής ενέργειας λόγω θερμοκρασίας, δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων μπορεί να προκληθεί και από μια εξωτερική ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος, όπως π.χ. το ηλιακό φως. Στην περίπτωση αυτή κάποια άτομα απορροφούν ενέργεια με τη μορφή ενός φωτονίου και απελευθερώνουν ένα ηλεκτρόνιο σθένους. Σε συνθήκες σταθερής ενεργειακής κατάστασης (σταθερή θερμοκρασία ή ακτινοβολία), το πλήθος των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται ισούται με το πλήθος των

ελεύθερων ηλεκτρονίων που παγιδεύονται σε οπές, διατηρώντας έτσι ισορροπία μεταξύ των δύο φορέων.

## 2.2 Ενεργειακές ζώνες και απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων

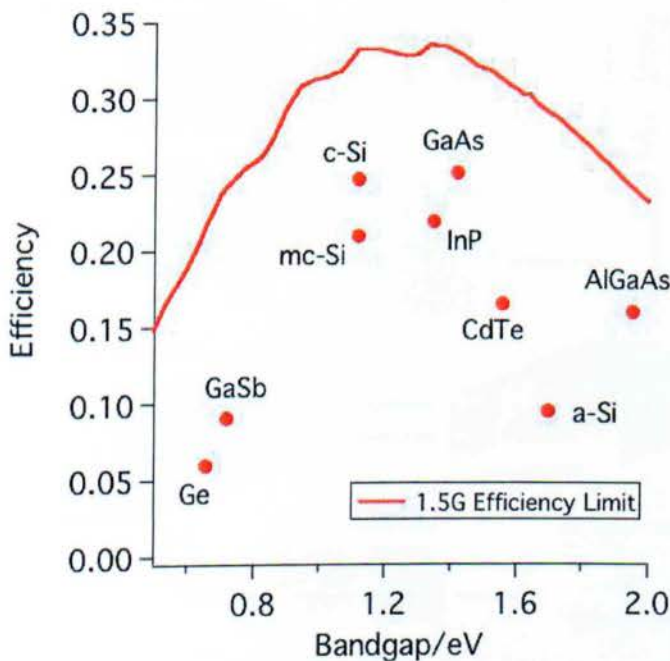
Η ηλεκτρική συμπεριφορά των ημιαγώγιμων στοιχείων περιγράφεται συνήθως με τη βοήθεια του μοντέλου των ενεργειακών ζωνών ([34], [35]). Οι ενεργειακές ζώνες είναι πιθανές περιοχές ενέργειας των ηλεκτρονίων του στερεού. Ανάλογα με την ενέργειά τους, τα ηλεκτρόνια χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων, τα ηλεκτρόνια σθένους και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα πρώτα είναι τα λιγότερο ενεργά και δε συμμετέχουν στους μηχανισμούς της αγωγιμότητας και γενικότερα της ηλεκτρικής συμπεριφοράς. Τα ηλεκτρόνια σθένους είναι τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας των ατόμων, η οποία ονομάζεται ζώνη σθένους. Η αμέσως επόμενη ηλεκτρονική στοιβάδα, μετά τη ζώνη σθένους, είναι η ζώνη αγωγιμότητας (ή ζώνη αγωγής), στην οποία ανήκουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η διαφορά ενέργειας μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους ονομάζεται ενεργειακό διάκενο ή χάσμα (gap) και εκφράζει την ελάχιστη ενέργεια, που απαιτείται για να διεγερθεί ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο αφήνοντας στη θέση του μια οπή. Η τιμή του ενεργειακού διακένου  $E_g$  χαρακτηρίζει το υλικό και σχετίζεται με την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $300^{\circ}\text{K}$ , η τιμή του ενεργειακού χάσματος για το πυρίτιο είναι  $1.12\text{ eV}$  ([36]).

Στο σχήμα 2.2 βλέπουμε την απόδοση των πιο σημαντικών τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συνάρτηση με το ενεργειακό χάσμα των αντίστοιχων ημιαγωγών σε θερμοκρασία  $300^{\circ}\text{K}$  ([37]). Η συνεχής κόκκινη γραμμή είναι η μέγιστη θεωρητική απόδοση, που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή του ενεργειακού χάσματος για τυποποιημένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας  $1.5\text{G}$  ([38]), ενώ οι κόκκινες κουκίδες δείχνουν τις συνηθισμένες τιμές απόδοσης, που επιτυγχάνονται στην πράξη.

## 2.3 Η χρήση του πυριτίου στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές

Οι διάφορες τεχνολογίες κατασκευής φωτοβολταϊκών κυττάρων χωρίζονται σε τρεις «γενιές», ανάλογα με τα υλικά, που χρησιμοποιούν, την απόδοση και το κόστος ([39]). Η πρώτη γενιά είναι αυτή, που χρησιμοποιείται περισσότερο, αντιπροσωπεύοντας το 89% της παγκόσμιας παραγωγής. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρώτης γενιάς έχουν ως βάση το πυρίτιο και χαρακτηρίζονται από υψηλότερες αποδόσεις αλλά και υψηλότερο κόστος παραγωγής σε

σχέση με τις τεχνολογίες δεύτερης γενιάς. Λόγω του υψηλού κόστους τους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα πρώτης γενιάς μπορεί να χρειαστούν χρόνια για να αποσβέσουν τη δαπάνη αγοράς τους. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν τα φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς (τεχνολογία λεπτού φίλμ), τα οποία χρησιμοποιούν φθηνότερα υλικά και χαμηλότερου κόστους διαδικασίες κατασκευής. Το μειονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι έχει γενικά χαμηλότερη απόδοση, η οποία όμως σε πολλές περιπτώσεις αντισταθμίζεται από το μικρότερο κόστος των μονάδων. Ηλιακά κύτταρα λεπτού φίλμ κατασκευάζονται από διάφορα υλικά, ανάμεσα στα οποία περιλαμβάνονται και διάφορες μορφές πυριτίου ([40]). Τέλος, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τρίτης γενιάς περιλαμβάνουν διάφορες τεχνολογίες, που βρίσκονται κυρίως σε ερευνητικό ακόμη στάδιο και σκοπό έχουν να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις (της τάξεως του 30-60%) με χαμηλό σχετικά κόστος.

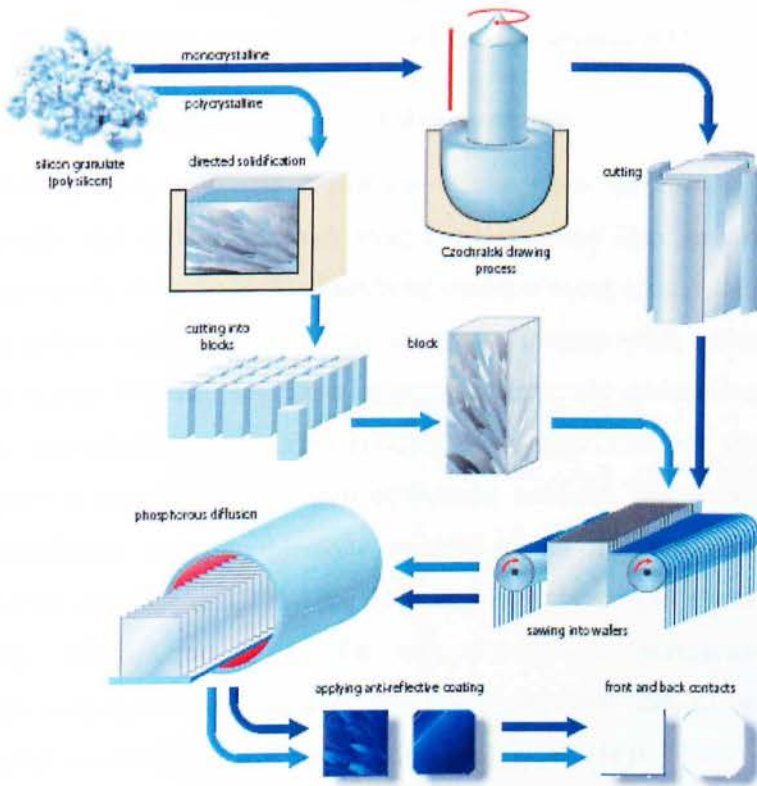


Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών στους 300° K.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το πυρίτιο αποτελεί το κυριότερο υλικό για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυττάρων, που χρησιμοποιούνται σήμερα αλλά και αυτών, που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στα αμέσως επόμενα χρόνια. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής ([37]). Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

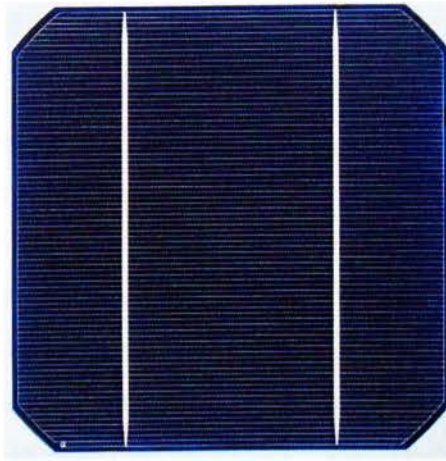
### 2.3.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα στοιχεία αυτά έχουν την καλύτερη σχέση απόδοσης/επιφάνεια. Η απόδοση των συνηθισμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων μονοκρυσταλλικού πυριτίου κυμαίνεται από 13% έως 16% ενώ στο εργαστήριο έχουν μετρηθεί και κυβελίδες με απόδοση πάνω από 24% ([41]). Τα στάδια της διαδικασίας κατασκευής φωτοβολταϊκών κυττάρων κρυσταλλικού πυριτίου φαίνονται στο σχήμα 2.3. Στην περίπτωση του μονοκρυσταλλικού πυριτίου οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (flat zone), που βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδων πυριτίου.



Σχήμα 2.3: Κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου ([37])

Η επιφάνεια των στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου (σχήμα 2.4) έχει σκούρο χρώμα ενώ το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer ~ 0.3 mm). Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά ([14]).



Σχήμα 2.4: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου ([37])

### 2.3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

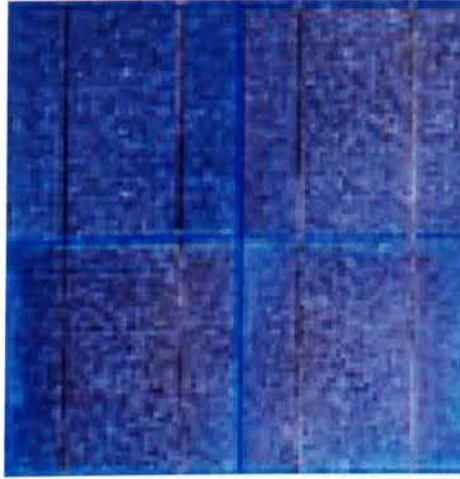
Η μέθοδος παραγωγής των στοιχείων αυτών είναι φθηνότερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών και γι' αυτό η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης (direct solidification - DS), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου («χύτευση») και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC. Στην επιφάνεια τους (σχήμα 2.5) διακρίνονται οι διάφορες ενώσεις των κρυσταλλικών κόκκων από τους οποίους αποτελούνται (μονοκρυσταλλικές περιοχές). Γενικά, όσο μεγαλύτερες διαστάσεις έχουν οι περιοχές αυτές, τόσο υψηλότερη απόδοση έχει το πολυκρυσταλλικό στοιχείο. Οι αποδόσεις των βιομηχανικών φωτοβολταϊκών πλαισίων πολυκρυσταλλικού τύπου κυμαίνονται συνήθως από 13% έως 15% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί και αποδόσεις της τάξεως του 20%. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται ακόμη από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα ενώ το πάχος του υλικού είναι γύρω στα 0.3 mm (όπως και στα μονοκρυσταλλικά) ([14], [36]).



Σχήμα 2.5: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου ([14])

### 2.3.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας (ribbon silicon)

Πρόκειται για μια νέα σχετικά τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων, που στηρίζεται στη δημιουργία μιας λεπτής ταινίας από τηγμένο υλικό πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να επιτύχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής καθώς μειώνει σημαντικά τη χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής πολυκρυσταλλικών στοιχείων. Το πάχος του υλικού είναι και πάλι γύρω στα 0.3 mm. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών αυτού του τύπου είναι κάπως χαμηλότερη (περίπου 12-13% για τα πλαίσια, που κυκλοφορούν στο εμπόριο και μέχρι 18% στο εργαστήριο) ([14], [36]). Η μορφή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ταινίας πυριτίου φαίνεται στο σχήμα 2.6.



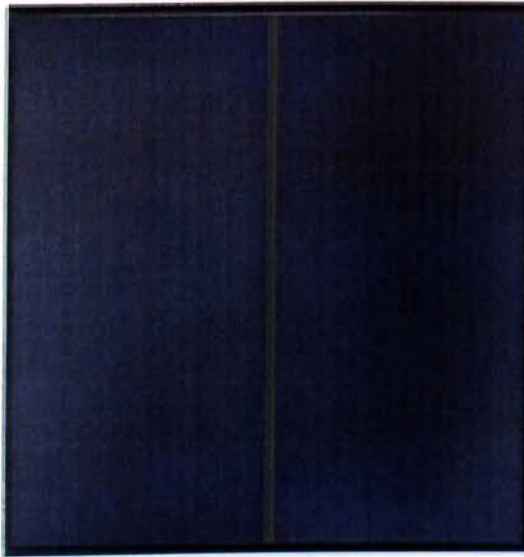
Σχήμα 2.6: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου ([14]).

### 2.3.4 Φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου (amorphous – thin film silicon)

Τα φωτοβολταϊκά αυτά βασίζονται στην τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films). Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται ταινίες λεπτών επιστρώσεων, οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυριτίου) πάνω σε χαμηλού κόστους υπόστρωμα υποστήριξης (συνήθως γυαλί ή αλουμίνιο). Η τιμή τους είναι γενικά αρκετά χαμηλότερη αλλά και η απόδοση τους είναι σημαντικά μικρότερη (6%-8% για τα πλαίσια, που κυκλοφορούν στην αγορά και μέχρι 14% στο εργαστήριο). Άλλα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών αυτού του τύπου είναι ότι δεν επηρεάζονται πολύ από τις υψηλές θερμοκασίες και ότι έχουν καλύτερη απόδοση από τα κρυσταλλικά σε συνθήκες συννεφιάς. Από την άλλη μεριά, υπάρχουν αρκετές επιφυλάξεις για τη διάρκεια ζωής τους, που όμως δεν μπορούν να τεκμηριωθούν με δεδομένα, μια και η τεχνολογία είναι σχετικά καινούργια. Πάντως πολλοί κατασκευαστές δίνουν μέχρι και 20 χρόνια εγγύηση για την απόδοση των

προϊόντων τους ([14]). Η μορφή της επιφάνειας ενός φωτοβολταϊκού άμορφου πυριτίου φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Ας σημειωθεί ότι εκτός από το πυρίτιο, που είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη, φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρώσεων κατασκευάζονται και από άλλα υλικά, όπως δισεληνιοϊνδιούχος χαλκός ( $\text{CuInSe}_2$  ή συντομογραφικά CIS), CIGS (παραλλαγή του τύπου CIS, στην οποία μέρος του ινδίου έχει αντικατασταθεί από γάλλιο), τελουριούχο κάδμιο ( $\text{CdTe}$ ), αρσενικούχο γάλλιο ( $\text{GaAs}$ ), θειούχο χαλκό/θειούχο κάδμιο ( $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ ) ([40]). Γενικά τα φωτοβολταϊκά αυτά στοιχεία εμφανίζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με το πυρίτιο, αλλά έχουν και αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία περιορίζουν τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές ([36]). Τέλος, η τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων χρησιμοποιείται και για την κατασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων, που χρησιμοποιούν διαδοχικά στρώματα δύο ή τριών υλικών με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος ([40]).



Σχήμα 2.7: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου ([14])



## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΦΩΤΙΣΜΟΣ ΔΡΟΜΩΝ”

#### 3.1 Γενικά

Ο φωτισμός των δρόμων κατά τη διάρκεια της νύχτας αποσκοπεί κυρίως στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας με το να παρέχει καλύτερη ορατότητα στους χρήστες του οδικού δικτύου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πρακτική του να φωτίζονται οι δρόμοι τη νύχτα, τουλάχιστον στις μεγάλες πόλεις, είναι πολύ πιο παλιά από την εμφάνιση των αυτοκινήτων. Εφαρμοζόταν ήδη από τα αρχαία χρόνια για να βλέπουν καλύτερα οι άνθρωποι και να μη σκοντάφτουν αλλά και για να αποθαρρύνονται οι τυχόν εγκληματίες ([21]). Στη σύγχρονη εποχή, ο φωτισμός των δρόμων των πόλεων εξυπηρετεί και άλλους σκοπούς, όπως η διευκόλυνση των εμπορικών δραστηριοτήτων, η ανάδειξη της αρχιτεκτονικής, η βελτίωση της αισθητικής εικόνας και γενικότερα η δημιουργία ενός ασφαλούς, άνετου και ευχάριστου περιβάλλοντος που προωθεί τις κοινωνικές δραστηριότητες των ανθρώπων και προβάλλει τον ιδιαίτερο χαρακτήρα της κάθε περιοχής ([22], [23]). Καθώς όμως τα θέματα αυτά αφορούν το φωτισμό όχι μόνο των δρόμων αλλά των εξωτερικών χώρων γενικότερα, δεν θα ασχοληθούμε με αυτά στην παρούσα εργασία, αλλά θα εξετάσουμε το πρόβλημα του φωτισμού των δρόμων από την άποψη της οδικής ασφάλειας και μόνο.

Από την καθημερινή εμπειρία είναι γνωστό ότι ο σωστός φωτισμός των μικρών ή μεγάλων οδικών αρτηριών βελτιώνει την ορατότητα των οδηγών και συμβάλλει έτσι στη μείωση των τροχαίων ατυχημάτων, τα οποία έχουν συχνά σαν αποτέλεσμα σοβαρούς τραυματισμούς ή και απώλεια ανθρώπινων ζωών αλλά και σημαντικές υλικές ζημιές. Η παραπάνω εμπειρική διαπίστωση έχει επιβεβαιωθεί και από μελέτες, που έχουν γίνει κατά καιρούς σε διάφορες χώρες. Συγκεκριμένα έχει στατιστικά παρατηρηθεί ότι η πιθανότητα ατυχήματος τη νύχτα είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ’ ότι τη μέρα. Το βασικό ερώτημα, στο οποίο προσπαθούν να απαντήσουν οι μελετητές, είναι αν το γεγονός αυτό θα πρέπει να

αποδοθεί στην έλλειψη φωτισμού ή σε άλλους παράγοντες (π.χ. στην κούραση του οδηγού, στο γεγονός ότι τη νύχτα κυκλοφορούν πιο πολλοί μεθυσμένοι οδηγοί απ' ότι τη μέρα κ.λ.π.) ([24], [25]). Αν και τα αποτελέσματα δεν συμφωνούν πάντα μεταξύ τους, οι περισσότερες μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι πράγματι ο φωτισμός των δρόμων συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των ατυχημάτων. Ήδη από τις πρώτες έρευνες, που είχαν γίνει στις δεκαετίες του '60 και του '70, είχε προκύψει ότι στις αστικές περιοχές ο φωτισμός οδηγεί σε μείωση των ατυχημάτων κατά 30% ([25]). Στο βιβλίο ([24]) (σελ. 361) δίνεται μια προσεγγιστική εξίσωση, που βρέθηκε εμπειρικά το 1980 από τον P.P. Scott και συσχετίζει το λόγο των νυχτερινών ατυχημάτων προς τα ημερήσια με τη μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος. Η εξίσωση αυτή έχει τη μορφή

$$N_R = 0.66 e^{-0.42 L}$$

όπου  $N_R$  είναι ο λόγος του αριθμού των ατυχημάτων της νύχτας προς τον αριθμό των ατυχημάτων της ημέρας και  $L$  η μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος σε  $\text{cd/m}^2$ . Από την εξίσωση προκύπτει ότι μια αύξηση της λαμπρότητας κατά  $1 \text{ cd/m}^2$  έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των νυχτερινών ατυχημάτων κατά περίπου 35%.

Συνοπτικά μπορεί κανείς να πεί ότι μια σωστή εγκατάσταση οδικού φωτισμού βοηθά τον οδηγό να αντιλαμβάνεται καλύτερα τη γεωμετρία του δρόμου και τις συνθήκες της κυκλοφορίας και συμβάλλει έτσι στην επίτευξη μιας πιο ομαλής κυκλοφοριακής ροής και στη μείωση των κινδύνων κατά τις προσπεράσεις. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του οδικού δικτύου σε όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και με όλες τις καιρικές συνθήκες.

Μια εγκατάσταση φωτισμού πρέπει να παρέχει στον οδηγό τη δυνατότητα να καθορίζει ([42]):

- Την κατάσταση του δρόμου στο τμήμα που θα διανύσει στα επόμενα 5 έως 10 sec.
- Τη θέση του οχήματος και την κίνησή του για το παραπάνω τμήμα.
- Τη θέση και την κίνηση των άλλων οχημάτων, τα οποία ήδη χρησιμοποιούν ή πρόκειται να χρησιμοποιήσουν το διάστημα αυτό.
- Την ύπαρξη τυχόν εμποδίων στο οδόστρωμα στο εν λόγω τμήμα.
- Τη σήμανση του δρόμου.

Ένα σύστημα φωτισμού πληρεί τις παραπάνω προϋποθέσεις όταν είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά των εθνικών και διεθνών προδιαγραφών, που έχουν συνταχθεί από τους αρμόδιους οργανισμούς τυποποίησης με σκοπό τη διασφάλιση της ποιότητας του οδικού φωτισμού. Τότε το σύστημα μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά,

δηλαδή να παρέχει την αναγκαία και κατάλληλη ορατότητα στους δρόμους, βοηθώντας έτσι στην ασφάλεια των οδηγών και στην αποδοτική λειτουργία του δικτύου.

### 3.2 Βασικά φωτοτεχνικά μεγέθη

#### Φωτεινή ενέργεια (Light energy) Q

Με τον όρο φωτεινή ενέργεια Q, εννοείται η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από μία πηγή, η οποία γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Όπως είναι γνωστό, μια πηγή ακτινοβολίας εκπέμπει ενέργεια που είναι κατανομημένη ανομοιόμορφα στο φάσμα εκπομπής της πηγής συναρτήσει του μήκους κύματος  $\lambda$ . Την κατανομή την καθορίζει η Φασματική Ενέργεια ακτινοβολίας  $W_\lambda$ . Το κλάσμα της Ενέργειας W που εκπέμπεται στη ζώνη κύματος από 380 έως 780 nm είναι η ενέργεια του ορατού φωτός ([44]).

#### Φωτεινή ροή (Luminous FLUX) Φ

Η φωτεινή ροή ορίζεται ως το ποσό της ακτινοβολούμενης ισχύος επί τη βάση της φωτεινής εντύπωσης που δημιουργεί στον οφθαλμό ([48]). Είναι γνωστό ότι ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν αντιλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο ίσης ενέργειας αλλά διαφορετικού χρώματος (άρα μήκους κύματος) φωτεινά ερεθίσματα. Στην ουσία αποδίδει διαφορετικό βάρος σε κάθε συχνότητα του ορατού φάσματος. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες φασματικής φωτεινής απόδοσης κατά την διάρκεια της ημέρας (φωτοπική όραση, δεξιά καμπύλη) και κατά την διάρκεια της νύκτας (σκοτοπική όραση, αριστερή καμπύλη).

Μονάδα μέτρησης της φωτεινής ροής είναι το 1 lumen.

#### Φωτεινή απόδοση (Luminous efficacy)

Η φωτεινή απόδοση (lm/W) ενός λαμπτήρα δηλώνει την φωτεινή ροή που παράγει ένας λαμπτήρας ανά Watt καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Η μέγιστη θεωρητική φωτεινή απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί μετατρέποντας όλη την ενέργεια σε ορατό φως είναι 683 lm/W. Στην πράξη πολύ μικρότερες τιμές επιτυγχάνονται συνήθως μεταξύ 10 και 150 lm/W ([48]).

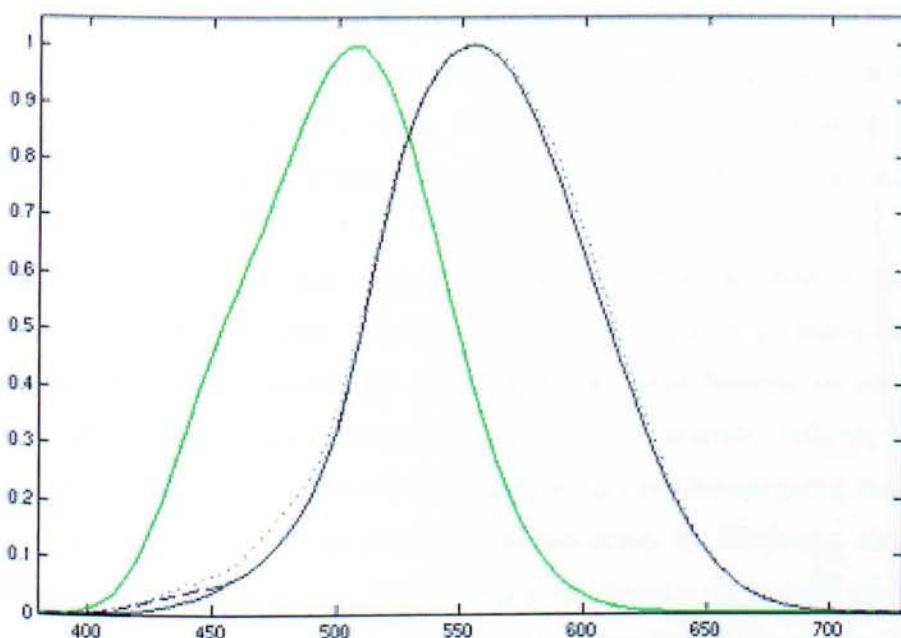
#### Φωτεινή ένταση (Luminous intensity) I

Μια πηγή φωτός εκπέμπει φωτεινή ροή σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Ορίζεται ως φωτεινή ένταση μιας πηγής φωτός σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, το πηλίκο της φωτεινής ροής dΦ που εκπέμπεται από την πηγή σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία dω γύρω από την θεωρούμενη κατεύθυνση, προς τη στοιχειώδη στερεά γωνία dω δηλαδή,

$$I = (d\Phi / d\omega)$$

Μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης είναι η candela (cd). 1 candela είναι η φωτεινή ένταση που δημιουργείται όταν φωτεινή ροή 1 lm μεταφέρεται σε στερεά γωνία 1 στερεακτινίου (sr).

Η χωρική κατανομή της φωτεινής έντασης μιας πηγής φωτός παράγει ένα τρισδιάστατο γράφημα κατανομής της φωτεινής έντασης γνωστό ως στερεό της εντάσεως φωτισμού. Μια τομή του γραφήματος αυτού παράγει την φωτεινή καμπύλη κατανομής ή καμπύλη φωτεινής έντασης για συγκεκριμένο επίπεδο. Συνήθως χρησιμοποιούνται πολικές συντεταγμένες όποτε και το διάγραμμα καλείται πολικό και οι τιμές κανονικοποιούνται με βάση τα 1000lm έτσι ώστε να είναι εύκολα δυνατές οι συγκρίσεις διαφορετικών λαμπτήρων ή φωτιστικών ([48]).



Σχήμα 3.1: Καμπύλες φασματικής φωτεινής απόδοσης

### Ένταση φωτισμού (Illuminance) E

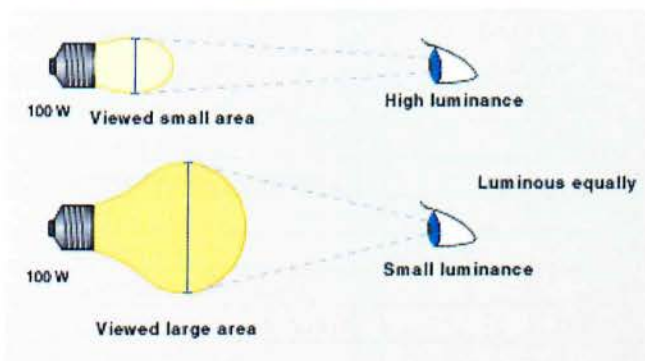
Η ένταση φωτισμού E σ' ένα σημείο μιας επιφάνειας είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής dΦ που λαμβάνει στοιχειώδης επιφάνεια εμβαδού dA η οποία περιέχει το σημείο αυτό προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής δηλαδή,

$$E = (d\Phi/dA)$$

Μονάδα μέτρησης της έντασης φωτισμού ή απλά του φωτισμού είναι το 1 Lux ή lx. Ένταση φωτισμού 1 lx είναι η ένταση που δημιουργείται σε ένα σημείο μιας επιφάνειας 1 m<sup>2</sup> όταν σ' αυτή προσπίπτει φωτεινή ροή 1 lm ([48]).

### Λαμπρότητα (Luminance) L

Δύο φωτεινές πηγές ίσης φωτεινής εντάσεως αλλά διαφορετικών διαστάσεων φαίνεται (στο μάτι) ότι εμφανίζουν διαφορετική λαμπρότητα. Η πηγή μικρότερων διαστάσεων φαίνεται πιο φωτεινή-λαμπρή όπως δηλώνεται παραστατικά στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.2: Διαφορετική λαμπρότητα πηγών ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικών διαστάσεων

Λαμπρότητα μιας φωτεινής πηγής μπορούμε να πούμε ότι είναι η μετρημένη φωτεινότητα της πηγής ή μιας φωτεινής επιφάνειας. Μονάδα μέτρησης της λαμπρότητας είναι  $1 \text{ cd/m}^2$  ή  $1 \text{ cd/cm}^2$ .

Γενικά, οι υπολογισμοί, που αφορούν τη λαμπρότητα των φωτεινών πηγών και των φωτιζόμενων επιφανειών, έχουν μεγάλη σημασία στις μελέτες φωτισμού. Τυχόν ανομοιομορφίες ή απότομες μεταβολές της λαμπρότητας είναι δυνατόν να προκαλέσουν προβλήματα στην όραση, κόπωση του ματιού (οθόνες υπολογιστών, στυλπνές επιφάνειες κ.λπ.) ή και ατυχήματα, όταν πρόκειται για τη λαμπρότητα του οδοστρώματος και τον οδικό φωτισμό. Τα προβλήματα αυτά είναι γνωστά ως το φαινόμενο της θάμβωσης, στο οποίο θα αναφερθούμε εκτενέστερα παρακάτω. Για το λόγο αυτό, παρόλο που η τιμή του φωτισμού δίνει μια γενική εικόνα για την ποιότητα μιας εγκατάστασης φωτισμού δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι περιγράφει πλήρως την πραγματική κατάσταση μιας φωτιζόμενης επιφάνειας και ειδικότερα του οδοστρώματος. Αντίθετα, το μέγεθος της λαμπρότητας θεωρείται το αντικειμενικό μέτρο και το πιο σημαντικό κριτήριο για το φωτισμό του οδικού δικτύου, καθώς εξετάζει την ακτινοβολία που προέρχεται από ανάκλαση στο οδόστρωμα και κατευθύνεται προς το μάτι του οδηγού, καθιστώντας το οδόστρωμα ορατό ([44]).

Ο ανθρώπινος οφθαλμός μπορεί πολύ καλά να ξεχωρίσει διαφορετικά επίπεδα λαμπρότητας. Στον παρακάτω πίνακα 3.1 φαίνονται τυπικές λαμπρότητες διαφόρων φωτεινών πηγών/επιφανειών ([48]).

Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές λαμπρότητας

Πηγή φωτός	Μέση λαμπρότητα ( $\text{cd/m}^2$ )
Λαμπτήρας αερίου ξένου	200,000 - 5,000,000,000
Ήλιος	1,600,000,000
Λαμπτήρας Μεταλλικών ιωδιδίων	10,000,000 - 60,000,000
Λαμπτήρες πυράκτωσης	2,000,000 - 26,000,000
Λαμπτήρες φθορισμού Compact	20,000 - 70,000
Λαμπτήρες φθορισμού	5,000 - 30,000
Ηλιόλουστος Συννεφιασμένος ουρανός	10000
Κερί	7500
Μπλε ουρανός	5000
Κατοπτρικό φωτιστικό με γρίλιες	100
Προτιμώμενες τιμές εσωτερικού φωτισμού	50 – 500
Λευκό χαρτί στα 500 Lux	100
Λευκό χαρτί στα 5 Lux	1

### Διάρκεια ζωής (Lifetime)

Η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα είναι ο αριθμός των ωρών λειτουργίας του όταν το 50% μιας μεγάλης ομάδας λαμπτήρων της ίδιας κατηγορίας καταστρέφονται αλλά και όταν το φως του λαμπτήρα πέσει κάτω από ένα ποσοστό (συνήθως 70%) οπότε στη διάρκεια ζωής δεν προσμετράται το χρονικό διάστημα της μειωμένης φωτιστικής απόδοσης ([48]).

### Ομοιομορφία λαμπρότητας (Brightness uniformity) U

Για να είναι ένα αντικείμενο ορατό πάνω στο οδόστρωμα πρέπει η κατανομή της λαμπρότητας σε αυτό να είναι ομοιόμορφη. Η ομοιομορφία εκφράζεται είτε για διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση του παρατηρητή (εγκάρσια ομοιομορφία) είτε για διεύθυνση που συμπίπτει με τη διεύθυνση του παρατηρητή (διαμήκης ομοιομορφία). Διακρίνονται τρεις συντελεστές ομοιομορφίας:

- Γενικός συντελεστής ομοιομορφίας  $U_0$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος  $L_{\min}/L_{\text{med}}$ , ή  $L_{\min}/L_{\max}$ , όπου  $L_{\min}$ ,  $L_{\text{med}}$ ,  $L_{\max}$  η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη λαμπρότητα αντίστοιχα στο σύνολο της εξεταζόμενης επιφάνειας.
- Συντελεστής διαμήκους ομοιομορφίας  $U_l$ , ο οποίος ορίζεται ως ο μικρότερος λόγος  $L_{\min}/L_{\max}$  σε ευθείες παράλληλες προς τον άξονα της οδού. Η ανεπαρκής διαμήκης ομοιομορφία βλάπτει την άνεση και την ασφάλεια.
- Συντελεστής εγκάρσιας ομοιομορφίας  $U_v$ , ο οποίος ορίζεται ως ο μικρότερος λόγος  $L_{\min}/L_{\max}$  σε ευθείες κάθετες προς τον άξονα της οδού. Καλή εγκάρσια ομοιομορφία επιτρέπει στον οδηγό ευκρινής διάκριση της επιφάνειας της οδού σε όλο της το πλάτος ([44]).

### Θάμβωση (Glare) G

Θάμβωση δημιουργείται όταν οι συνθήκες ορατότητας είναι τέτοιες ώστε κάποιος να αισθάνεται ενόχληση και μείωση της ικανότητας να διακρίνει αντικείμενα εξαιτίας της μη κατάλληλης κατανομής της λαμπρότητας λόγω υπερβολικών αντιθέσεων λαμπρότητας. Πρακτικά μπορούμε να πούμε ότι η θάμβωση μπορεί να αποφευχθεί όταν μεταξύ των σημείων του οπτικού πεδίου με την μέγιστη και την ελάχιστη λαμπρότητα ισχύει η σχέση:

$$[(L_{\max} - L_{\min}) / L_{\max}] < 10\%$$

Η θάμβωση παρουσιάζεται σε τρεις μορφές:

- Απόλυτη θάμβωση, η οποία οφείλεται σε υπερβολικά μεγάλη λαμπρότητα μέσα στο οπτικό πεδίο (τιμές μεγαλύτερες από 10000 cd/m<sup>2</sup>).
- Ψυχολογική θάμβωση ή θάμβωση ενόχλησης, κατά την οποία δημιουργείται μία δυσφορία στον οδηγό και μία έλλειψη άνεσης.
- Φυσιολογική θάμβωση ή θάμβωση ανικανότητας, η οποία όπως και η απόλυτη θάμβωση συνδέεται με τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου πέπλου φωτός σε όλο το οπτικό πεδίο, το οποίο μειώνει την αντίθεση λαμπρότητας μεταξύ ενός αντικειμένου και του περιβάλλοντός του. Αντιστοιχεί λοιπόν σε μια πρόσθετη λαμπρότητα (ισοδύναμη λαμπρότητα πέπλου – Veiling Equivalent Luminance ( $L_{seq}$ )), που επικάθεται στο οπτικό πεδίο μειώνοντας την αντίθεση λαμπρότητας. Το ποσοστό κατά το οποίο πρέπει να αυξηθεί ο φωτισμός του περιβάλλοντος για να γίνει ένα αντικείμενο ορατό και πάλι ορίζεται ως προσαύξηση καταφλίου της λαμπρότητας του περιβάλλοντος (Threshold Increment, TI).

Η μείωση της οπτικής ικανότητας του οδηγού εξαιτίας του φαινομένου της θάμβωσης μπορεί να είναι αιτία ατυχήματος, ιδίως όταν το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα. Σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στην μείωση της θάμβωσης είναι η επιλογή του τύπου των φωτιστικών, το ύψος ανάρτησης αυτών, η κατεύθυνση της δέσμης φωτός, και η λαμπρότητα του φόντου ([44]).

### **3.3 Μεσοπική όραση (mesopic vision)**

Όπως ήδη αναφέραμε (σχ. 3.1), η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού στα διάφορα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το φωτισμό. Έτσι μιλάμε για φωτοπική όραση (ημέρα, πλήρης φωτισμός) και σκοτοπική όραση (τη νύχτα, ελάχιστος φωτισμός). Η περιοχή όρασης, που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο αυτά άκρα, ονομάζεται μεσοπική ([45]). Πιο συγκεκριμένα, μεσοπικές

συνθήκες θεωρούμε ότι έχουμε για τιμές λαμπρότητας από 0,001 έως 3 cd/m<sup>2</sup> περίπου ([65]). Η μελέτη της μεσοπικής όρασης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον διότι οι περισσότερες περιπτώσεις νυχτερινής όρασης με τη βοήθεια φωτισμού εξωτερικών χώρων (και ειδικότερα οδικού φωτισμού) συμβαίνουν υπό μεσοπικές συνθήκες. Έτσι φαίνεται περίεργο το γεγονός ότι οι καθιερωμένοι τρόποι υπολογισμού, που χρησιμοποιούνται στις φωτοτεχνικές μελέτες δεν λαμβάνουν καθόλου υπόψη τις ιδιαιτερότητες της μεσοπικής περιοχής. Η βασική αιτία γι' αυτό είναι ότι τα φαινόμενα της μεσοπικής όρασης είναι δύσκολο να αναλυθούν και να περιγραφούν με έναν απλό τρόπο, που θα προσφέρεται για πρακτικούς υπολογισμούς. Κάποιοι ερευνητές έχουν προτείνει διάφορους προσεγγιστικούς τρόπους περιγραφής αλλά κανένας από τους τρόπους αυτούς δεν έχει καταφέρει να γίνει γενικά αποδεκτός από τους διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης. Μια σύντομη παρουσίαση των κυριότερων από τους τρόπους αυτούς θα γίνει στην επόμενη ενότητα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της μεσοπικής όρασης είναι τα εξής ([66]):

- Στη μεσοπική περιοχή παρατηρείται γενικά ασυμφωνία μεταξύ της μετρούμενης λαμπρότητας και του αισθήματος που προκαλεί (brightness). Ακτινοβολίες ίσης λαμπρότητας μπορεί να μη φαίνονται στο μάτι εξίσου φωτεινές, εάν είναι έντονα χρωματισμένες. Οι καταστάσεις αυτές αναφέρονται γενικά ως «χρωματικό φαινόμενο».
- Για χαμηλές τιμές λαμπρότητας, ακτινοβολίες πλούσιες σε μικρά μήκη κύματος φαίνονται λαμπρότερες από άλλες, που η φασματική τους κατανομή αποτελείται από μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο Purkinje και οφείλεται μάλλον στην συνεισφορά των ραβδίων, η οποία σε μικρές λαμπρότητες είναι αναλογικά μεγαλύτερη.
- Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού για διάφορα μήκη κύματος στις μεσοπικές συνθήκες δεν μπορεί να περιγραφεί με μια μόνο καμπύλη σαν αυτές, που εικονίζονται στο σχήμα 3.1, αλλά χρειάζεται μια ολόκληρη οικογένεια καμπυλών, που καθεμιά αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή λαμπρότητας. Οι καμπύλες αυτές θα πρέπει να βρίσκονται ανάμεσα στην φωτοπική και τη σκοτοπική καμπύλη (σχ. 3.1) και να εξασφαλίζουν ομαλή μετάβαση από την φωτοπική όραση στην σκοτοπική.

### 3.4 Μοντέλα μεσοπικής όρασης

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει προσπάθειες για την τυποποίηση της μεσοπικής όρασης και έχουν προταθεί πολλά μοντέλα για τον σκοπό αυτό ([45]). Η ταξινόμηση των μοντέλων της μεσοπικής όρασης μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους:



- Κριτήριο ταύτισης των οπτικών ερεθισμάτων:

Κάποια μοντέλα προκύπτουν από καθαρά οπτικές μεθόδους (συνήθως μετρήσεις ταύτισης λαμπρότητας) ενώ σε άλλα λαμβάνονται υπόψη και οι χρόνοι αντίδρασης των παρατηρητών.

- Τρόπος θεώρησης της μεσοπικής όρασης:

Η μεσοπική όραση μπορεί να χαρακτηριστεί είτε ως σύνθεση της φωτοπικής και της σκοτοπικής όρασης είτε ως συνδυασμός ακόμα περισσότερων παραγόντων, πιο συγκεκριμένα των χρωματικών συντεταγμένων.

- Ανάλογα με τον τελικό στόχο του μοντέλου:

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση αυτή τα μοντέλα διακρίνονται σε εκείνα, που προορίζονται για την επίλυση πρακτικών εφαρμογών και εκείνα, που αποσκοπούν στην περαιτέρω έρευνα και την πλήρη εξήγηση της ανθρώπινης όρασης.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες για τον καθορισμό καμπυλών φασματικής ευαισθησίας στην μεσοπική περιοχή. Καμιά από αυτές δεν έχει γίνει γενικά αποδεκτή μέχρι τώρα.

Από πρακτικής απόψεως, μεγαλύτερο ενδιαφέρον φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια μοντέλα, που προσπαθούν να καθορίσουν μια «ισοδύναμη μεσοπική λαμπρότητα» για κάθε τύπο λαμπτήρα, που εξαρτάται από τα επίπεδα του φωτισμού. Τα πιο γνωστά τέτοια μοντέλα είναι το «Ενοποιημένο Σύστημα Φωτομετρίας» του Rea ([67]), που αναφέρεται επίσης και ως «μοντέλο X» και το μοντέλο MOVE ([68]). Το πρώτο αναπτύχθηκε στο Rensselaer Polytechnic Institute των ΗΠΑ ενώ το δεύτερο αναπτύχθηκε μια κοινοπραξία πανεπιστημίων και άλλων φορέων στα πλαίσια ενός ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος. Και τα δύο μοντέλα καταλήγουν σε αναλυτικούς πίνακες τιμών, που επιτρέπουν την εύκολη εύρεση της ισοδύναμης μεσοπικής λαμπρότητας από τη συνηθισμένη (φωτοπική) λαμπρότητα και τα χαρακτηριστικά της πηγής. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοψίζονται στις παραμέτρους P και S, που εκφράζουν τη φωτεινή ροή της πηγής, υπολογισμένη με βάση τη φωτοπική (P) και τη σκοτοπική (S) καμπύλη ευαισθησίας, αντίστοιχα.

Μια διαφορετική προσέγγιση παρουσιάζεται από τον Ian Lewin ([49]). Ο Lewin ξεκινάει με την παρατήρηση ότι παρά το μεγάλο αριθμό δημοσιευμένων εργασιών, κανένας τρόπος περιγραφής των φαινομένων της μεσοπικής όρασης δεν έχει βρει πρακτική εφαρμογή σε σημαντικό βαθμό. Το γεγονός αυτό το αποδίδει σε δύο παράγοντες:

(α) Οι επιπτώσεις της φασματικής κατανομής των φωτεινών πηγών στην ικανότητα όρασης υπό μεσοπικές συνθήκες δεν μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από ένα μόνο αριθμό, που εκφράζει lumen ή κάποιο άλλο φωτομετρικό μέγεθος. Αυτό, που χρειάζεται,

είναι ένας συντελεστής, ή μια σειρά συντελεστών, που θα επιτρέπουν τον υπολογισμό των επιπτώσεων αυτών κατά το σχεδιασμό μιας εφαρμογής.

(β) Οι τεχνικές υπολογισμού, που προτείνονται συνήθως, είναι υπερβολικά πολύπλοκες με αποτέλεσμα οι σχεδιαστές να αντιμετωπίζουν δυσκολία στο να τις κατανοήσουν και να τις ενσωματώσουν στις μελέτες τους. Για να μπορέσει να καθιερωθεί μια τεχνική υπολογισμού, πρέπει να είναι απλή στη διατύπωση και εύκολη στη χρήση.

Για το λόγο αυτό, ο Lewin προτείνει την χρήση των LEM (Lumen Effectiveness Multipliers). LEM ονομάζεται ένας συντελεστής που μετατρέπει τα κανονικά φωτοπικά ή αναγραφόμενα lumen σε «προσαρμοσμένα» lumen για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα προσαρμοσμένα lumen περιγράφουν ικανοποιητικότερα τις οπτικές συνθήκες, που ισχύουν στην εφαρμογή. Ο υπολογισμός μιας τιμής LEM χρειάζεται ορισμένες διαδικασίες και μπορεί να παρουσιάζει δυσκολία. Από τη στιγμή όμως, που θα βρεθεί, η χρήση της είναι απλούστατη.

Δύο σημεία είναι σημαντικά:

1. Δεν υπάρχει μόνο μια τιμή του συντελεστή LEM. Η τιμή του πρέπει να επιλέγεται κάθε φορά ανάλογα με τις συνθήκες της εφαρμογής. Για κεντρική όραση η τιμή του πρέπει να είναι 1,0 ενώ για περιφερειακή όραση η τιμή του μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.
2. Ο LEM είναι σχετικό μέγεθος. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η πολυπλοκότητα και οι συνέπειες των αριθμητικών οπτικών συντελεστών που θα έπρεπε να συνυπολογιστούν αν χρησιμοποιούντο απόλυτες τιμές. Ο LEM είναι πιο απλά οριζόμενος και χρησιμοποιούμενος σαν ο λόγος της απόδοσης δυο φασματικών κατανομών για τις δεδομένες συνθήκες.

$$\text{LEM} = \frac{\text{οπτική απόδοση της φωτεινής πηγής}}{\text{οπτική απόδοση φωτεινής πηγής αναφοράς}}$$

Το να χρησιμοποιεί κανείς μια πηγή αναφοράς είναι συνηθισμένο. Επειδή οι συντελεστές LEM προτάθηκαν κυρίως για τον υπολογισμό συστημάτων εξωτερικού φωτισμού και ειδικότερα φωτισμού δρόμων, ως πηγή αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν οι λάμπες Νατρίου υψηλής πίεσεως (HPS), που είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος λαμπτήρων οδικού φωτισμού. Έτσι, για εφαρμογές που χρησιμοποιούν λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσεως, η τιμή των LEM είναι 1,0. Εάν έχει βρεθεί εργαστηριακά ότι μία πηγή έχει κάτω από τις ίδιες συνθήκες απόδοση 50% μεγαλύτερη από την πηγή αναφοράς τότε ο συντελεστής έχει την τιμή 1,5.

Όπως αναφέρθηκε, το βασικό πρόβλημα με τους LEM είναι η εύρεση της τιμής του συντελεστή. Αυτό εξαρτάται από το αν η όραση θα είναι κεντρική η περιφερειακή, από τα επίπεδα λαμπρότητας και από την φύση της ζητούμενης εφαρμογής. Στην περιοχή της μεσοπικής όρασης τα μεσοπικά lumen μιας πηγής μπορούν να υπολογισθούν με ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας κάποια μεσοπική καμπύλη φασματική ευαισθησίας. Ο συντελεστής LEM θα δίνεται από την σχέση:

$$\text{LEM} = \frac{\text{ΜΕΣΟΠΙΚΑ LUMEN ΠΗΓΗΣ}}{\text{ΑΝΑΓΡΑΦΟΜΕΝΑ LUMEN ΠΗΓΗΣ}} * \frac{\text{ΑΝΑΓΡΑΦΟΜΕΝΑ LUMEN HPS}}{\text{ΜΕΣΟΠΙΚΑ LUMEN HPS}}$$

Είναι αυτονόητο ότι η τιμή του LEM θα εξαρτάται από τη συγκεκριμένη συνάρτηση φασματικής ευαισθησίας στην μεσοπική περιοχή που θα χρησιμοποιηθεί..

Αναφορικά με τις διάφορες μεθόδους προσδιορισμού των LEM μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

1. Δεδομένα που προέρχονται από μετρήσεις της λαμπρότητας που αντιλαμβάνεται το μάτι (brightness) και μεσοπικές συναρτήσεις ευαισθησίας παράγουν πολύ συντηρητικούς LEM, αν συγκριθούν με δημοσιευμένα δεδομένα μη κεντρικής όρασης. Δεδομένα βασισμένα στο αίσθημα της λαμπρότητας δίνουν τιμές LEM περίπου 2, ενώ δεδομένα βασισμένα σε πειράματα μη κεντρικής όρασης δίνουν τιμές για τον LEM περίπου 30.
2. Οι μεσοπικές συναρτήσεις ευαισθησίας, που έχουν κατά καιρούς προταθεί, είναι τυπικά ένας συνδυασμός κεντρικής και μη κεντρικής όρασης. Δεν είναι γνωστό όμως αν αυτό εξομοιώνει ικανοποιητικά τον εξωτερικό φωτισμό. Οι μαρτυρίες δείχνουν ότι πολλά ατυχήματα μπορεί να προκαλούνται από αντικείμενα που αρχικά ανιχνεύθηκαν με την περιφερειακή όραση. Έτσι λοιπόν οι μεσοπικές συναρτήσεις, που προέρχονται από ταύτιση φωτεινότητας, μπορεί να υποβαθμίζουν τη φασματική κατανομή στις συνθήκες οδήγησης.
3. Ο αριθμός των παραγόντων που βρίσκονται πίσω από τα δεδομένα που βασίζονται στην οπτική αντίληψη, αποτελεί ένα μειονέκτημα στην χρήση των ερευνητικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν με τέτοιες μεθόδους.
4. Ο κατευθείαν υπολογισμός των φασματικών κατανομών νέων πηγών απαιτεί τη χρήση μεσοπικών συναρτήσεων βασισμένων είτε σε πειράματα ταύτισης της λαμπρότητας που αντιλαμβάνεται το μάτι (brightness matching) είτε σε μελέτες οπτικής αντίληψης.

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί κάποια από τις παραπάνω μεθόδους για τον υπολογισμό ενός συστήματος οδικού φωτισμού, που θα λαμβάνει υπόψη τις μεσοπικές συνθήκες όρασης. Δυστυχώς όμως δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν (είτε από τη βιβλιογραφία είτε από τους κατασκευαστές) οι τιμές των αναγκαίων παραμέτρων P και S ή κάποιου συντελεστή LEM για τις συγκεκριμένες λάμπες LED, που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν. Επειδή οι λάμπες αυτές είχαν επιλεγεί μετά από εκτεταμένη έρευνα, με βάση την απόδοση και τα λοιπά τεχνικά χαρακτηριστικά τους, κρίθηκε σκόπιμο να μη γίνει νέα έρευνα προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις, για τις οποίες να είναι διαθέσιμες και οι μεσοπικές παράμετροι υπολογισμού, αλλά να χρησιμοποιηθεί ο συνηθισμένος τρόπος μελέτης, που βασίζεται στα φωτοπικά δεδομένα.

### 3.5 Φωτισμός και μέγεθος της κόρης του ματιού – pupil lumens

Επι αρκετές δεκαετίες όλες οι μέθοδοι υπολογισμού και οι μονάδες μέτρησης (lumen, cd) της φωτοτεχνίας βασίζονταν αποκλειστικά στην καμπύλη της φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού υπό συνθήκες φωτοπικής όρασης  $V(\lambda)$  (η δεξιά καμπύλη του σχ. 3.1). Ήδη όμως από τη δεκαετία του '70 ήταν γνωστό ότι σε πολλές περιπτώσεις αυτός ο τρόπος προσέγγισης δεν μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά ούτε το «πόσο καλά» βλέπουν οι άνθρωποι με το φωτισμό, που δημιουργεί μια πηγή A, ούτε το «πόσο καλύτερα» ή «πόσο χειρότερα» θα έβλεπαν αν χρησιμοποιούσαν κάποια άλλη πηγή B ([26], [27]).

Προσπαθώντας να εξηγήσουν τις αποκλίσεις των θεωρητικών προβλέψεων από τα πειραματικά δεδομένα οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι το όλο θέμα είχε τεθεί σε λάθος βάση, καθώς είχε στηριχτεί στην άποψη ότι στις συνηθισμένες συνθήκες φωτισμού τα δύο είδη αισθητήρων, που υπάρχουν στο μάτι (κωνία και ραβδία) δεν συμμετέχουν ταυτόχρονα στη δημιουργία του αισθήματος της όρασης. Πιο συγκεκριμένα είχε θεωρηθεί ως δεδομένο ότι η όραση την ημέρα οφείλεται μόνο στα κωνία ενώ τη νύχτα μόνο στα ραβδία. Έτσι ο προσδιορισμός της φωτοπικής καμπύλης  $V(\lambda)$  και κατ' επέκταση όλων των φωτοτεχνικών μονάδων μέτρησης, που λαμβάνουν υπόψη την απόκριση του ματιού στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, στηρίχτηκε στα χαρακτηριστικά των κωνίων και μόνο. Όμως οι έρευνες, που έγιναν στη συνέχεια, έδειξαν ότι στις συνηθισμένες συνθήκες φωτισμού των εσωτερικών χώρων (σπίτια, γραφεία) η όραση επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την απόκριση των ραβδίων ([28]).

Κατά τη δεκαετία του '90 μια ομάδα ερευνητών από το Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) στην Καλιφόρνια πρότεινε να χρησιμοποιείται στους φωτοτεχνικούς υπολογισμούς μια διορθωμένη τιμή φωτεινής ροής (lm), η οποία λαμβάνει υπόψη και την

επίδραση των ραβδίων στο μηχανισμό της όρασης ([29]). Επειδή η έρευνα αυτή έλαβε υπόψη τη μεταβολή του μεγέθους της κόρης του ματιού (pupil) ανάλογα με το φωτισμό, η διορθωμένη τιμή της φωτεινής ροής πήρε το όνομα *pupil lumens*.

Ο νέος αυτός τρόπος προσέγγισης περιγράφεται αναλυτικά στις εργασίες του Sam Berman ([30], [31]), ο οποίος πρότεινε τον τρόπο διόρθωσης της φωτεινής ροής και είναι ένας από τους κύριους υποστηρικτές της ιδέας των *pupil lumens*. Σε γενικές γραμμές η προτεινόμενη μεθοδολογία του Berman συνοψίζεται στα εξής. Σύμφωνα με τα πορίσματα εργαστηριακών μελετών, τόσο η ευκρίνεια της όρασης, δηλαδή η ικανότητα να διακρίνουμε λεπτομέρειες όσο και το βάθος του οπτικού πεδίου, δηλαδή η ικανότητα να διακρίνουμε μακρινά αντικείμενα, σχετίζονται με το μέγεθος της κόρης του ματιού και συγκεκριμένα βελτιώνονται όταν αυτό μικραίνει. Γενικά το μέγεθος της κόρης εξαρτάται από την ποσότητα του φωτός, που πέφτει στο μάτι. Όταν μπαίνει πολύ φως, η κόρη συστέλλεται ενώ όταν μπαίνει λίγο φως η κόρη διαστέλλεται. Επομένως ένας εύκολος τρόπος για να βλέπουμε καλύτερα είναι να αυξήσουμε το φωτισμό ώστε να αναγκάσουμε το μέγεθος της κόρης να μικρύνει. Όμως μια πιο προσεκτική ανάλυση δείχνει ότι τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά.

Είναι γνωστό ότι οι μηχανισμοί, που ελέγχουν το μέγεθος της κόρης του ματιού, ελέγχονται από τα ραβδία, των οποίων η απόκριση στα διαφορετικά μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας περιγράφεται από τη σκοτοπική καμπύλη ευαισθησίας του ματιού (την αριστερή καμπύλη του σχ 3.1). Αντί λοιπόν να αυξήσουμε το φωτισμό, μπορούμε να επηρεάσουμε το μέγεθος της κόρης του ματιού (και κατ' επέκταση την ικανότητά μας να βλέπουμε καλύτερα), αλλάζοντας απλώς το χρώμα του φωτός και συγκεκριμένα ενισχύοντας εκείνα τα μήκη κύματος, για τα οποία η σκοτοπική καμπύλη παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές της. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να επιτύχουμε καλύτερη όραση ακόμη και με μικρότερη συνολική φωτεινή ροή και συνεπώς με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Σύμφωνα με τις μελέτες του Berman, ένας απλός τρόπος για να περιγράψουμε μαθηματικά την επίδραση του μεγέθους της κόρης του ματιού είναι να πολλαπλασιάσουμε τη φωτεινή ροή της πηγής με ένα συντελεστή της μορφής  $(S/P)^n$ , όπου  $P$  είναι η συνηθισμένη φωτεινή ροή (σε  $lm$ ), που υπολογίζεται με βάση τη φωτοπική καμπύλη ευαισθησίας,  $S$  είναι μια αντίστοιχη τιμή «φωτεινής ροής» βασισμένη στη σκοτοπική καμπύλη ευαισθησίας και  $n$  είναι ένας εκθέτης, που η τιμή του εξαρτάται από το είδος των εργασιών, που θέλουμε να εκτελούμε με το συγκεκριμένο φωτισμό. Συγκεκριμένα, για συνηθισμένες εργασίες γραφείου η τιμή του  $n$  είναι 0.78 ενώ για εργασίες σε οθόνη υπολογιστή η τιμή του  $n$  είναι 1. Έχει ακόμη προταθεί και η τιμή  $n=0.5$ , για την περίπτωση που το χαρακτηριστικό της όρασης, που μας ενδιαφέρει κυρίως, είναι η αίσθηση της συνολικής λαμπρότητας της πηγής. Όπως

προαναφέραμε, η διορθωμένη τιμή της φωτεινής ροής  $P^*(S/P)^n$  ονομάζεται pupil lumen της πηγής.

Αν και η παραπάνω μεθοδολογία δεν έχει γίνει αποδεκτή από τους διεθνείς οργανισμούς, έχει χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας με καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος της φωτεινής πηγής. Μια πρόσφατη τέτοια εφαρμογή είναι η υιοθέτησή της από το πρόγραμμα τεχνολογίας κτιρίων του υπουργείου ενέργειας των ΗΠΑ με την ονομασία “spectrally enhanced lighting” (φασματικά βελτιωμένος φωτισμός) ([32]).

### 3.6 Κατηγορίες φωτισμού δρόμων

Η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale De L' Eclairage, CIE) αλλά και η ευρωπαϊκή ένωση με την νόρμα CEN13201 έχουν διακρίνει τους δρόμους σε κλάσεις ανάλογα με τη χρήση τους ([48]). Εδώ θα αναφερθούμε μόνο στις κλάσεις φωτισμού κατά CEN13201 διότι αυτό τον τρόπο κατηγοριοποίησης χρησιμοποιεί το πρόγραμμα Dialux, με το οποίο έγιναν οι υπολογισμοί της μελέτης φωτισμού της παρούσας εργασίας (κεφ. 6). Η κατηγοριοποίηση κατά CIE βασίζεται σε παρόμοιες αρχές αλλά οι κλάσεις φωτισμού που προβλέπει είναι λίγο διαφορετικές.

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νόρμα CEN13201 προβλέπονται τρεις κατηγορίες κλάσεων φωτισμού δρόμων: ME, CE και S.

- Οι ME-κατηγορίες αφορούν σε δρόμους στους οποίους κινούνται οδηγοί μηχανοκίνητων οχημάτων, και σε μικρές χώρες σε δρόμους κατοικημένων περιοχών που επιτρέπουν μέσες έως υψηλές ταχύτητες οδήγησης.
- Οι CE-κατηγορίες αφορούν σε δρόμους στους οποίους κινούνται οδηγοί μηχανοκίνητων οχημάτων αλλά και σε αμφισβητούμενες περιοχές όπως: οδοί αγορών, οδικές διασταυρώσεις κάποιας πολυπλοκότητας, διασταυρώσεις κυκλικής κυκλοφορίας και περιοχές αναμονής. Αυτές οι κατηγορίες ισχύουν επίσης για πεζούς και ποδηλάτες.
- Οι S-κατηγορίες αφορούν σε δρόμους στους οποίους κινούνται πεζοί και ποδηλάτες σε μονοπάτια και πλατείες, σε λωρίδες έκτακτης ανάγκης και άλλες οδικές περιοχές που βρίσκονται χωριστά ή κατά μήκος του οδοστρώματος μιας διαδρομής κυκλοφορίας, σε κατοικημένους δρόμους, σε πεζόδρομους, σε περιοχές χώρων στάθμευσης, αυλές σχολείων, κ.λπ.

Οι απαιτήσεις της κάθε κατηγορίας αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες 3.2 έως 3.5.

Πίνακας 3.2: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού ME

Κλάση	Λαμπρότητα δρόμου σε συνθήκες ξηρής επιφάνειας οδοστρώματος			Φυσιολογική θάμβωση (Disability glare)	Φωτισμός περιβάλλοντος (Lighting of surroundings)
	L in cd/m <sup>2</sup> (ελάχιστη διατηρούμενη)	U <sub>0</sub> (ελάχιστη)	U <sub>I</sub> (ελάχιστη)	TI % (a)	SR (b)
ME1	2.0	0.4	0.7	10	0.5
ME2	1.5	0.4	0.7	10	0.5
ME3a	1.0	0.4	0.7	15	0.5
ME3b	1.0	0.4	0.6	15	0.5
ME3c	1.0	0.4	0.5	15	0.5
ME4a	0.75	0.4	0.6	15	0.5
ME4b	0.75	0.4	0.5	15	0.5
ME5	0.5	0.35	0.5	15	0.5
ME6	0.3	0.35	0.4	15	καμία απαίτηση

*Σημειώσεις:*  
 (a) Μια αύξηση 5% στο TI μπορεί να επιτραπεί εκεί όπου χρησιμοποιούνται πηγές φωτός χαμηλής λαμπρότητας.  
 (b) Αυτό το κριτήριο μπορεί να εφαρμοστεί εκεί όπου δεν υπάρχουν περιοχές κυκλοφορίας με τις δικές τους απαιτήσεις.

Πίνακας 3.3: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού MEW

Κλάση	Λαμπρότητα δρόμου σε συνθήκες ξηρής και υγρής επιφάνειας οδοστρώματος				Φυσιολογική θάμβωση (disability glare)	Φωτισμός περιβάλλοντος (Lighting of surroundings)
	Ξηρές συνθήκες			Υγρές συνθήκες		
	L in cd/m <sup>2</sup> (ελάχιστη διατηρούμενη)	U <sub>0</sub> (ελάχιστη)	U <sub>I</sub> (a) (ελάχιστη)	U <sub>0</sub> (ελάχιστη)	TI % (b)	SR (c)
MEW1	2.0	0.4	0.6	0.15	10	0.5
MEW2	1.5	0.4	0.6	0.15	10	0.5
MEW3	1.0	0.4	0.6	0.15	15	0.5
MEW4	0.75	0.4	καμία απαίτηση	0.15	15	0.5
MEW5	0.5	0.35	καμία απαίτηση	0.15	15	0.5

*Σημειώσεις:*  
 (a) Η εφαρμογή αυτού του κριτηρίου είναι προαιρετική αλλά μπορεί να εφαρμοστεί στους αυτοκινητοδρόμους.  
 (b) Μια αύξηση 5% στο TI μπορεί να επιτραπεί εκεί όπου χρησιμοποιούνται πηγές φωτός χαμηλής λαμπρότητας.  
 (c) Αυτό το κριτήριο μπορεί να εφαρμοστεί εκεί όπου δεν υπάρχουν περιοχές κυκλοφορίας με τις δικές τους απαιτήσεις.

Πίνακας 3.4: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού S

Κλάση	Οριζόντια ένταση φωτισμού	
	E σε lx (a) (ελάχιστη διατηρούμενη)	E <sub>min</sub> σε lx (διατηρούμενη)
S1	15	5
S2	10	3
S3	7.5	1.5
S4	5	1
S5	3	0.6
S6	2	0.6
S7	Δεν έχει καθοριστεί	Δεν έχει καθοριστεί

*Σημειώσεις:*  
(a) Για να επιτευχθεί η ομοιομορφία, η πραγματική τιμή της διατηρούμενης μέσης έντασης φωτισμού δεν μπορεί να υπερβεί 1.5 φορές την ελάχιστη συνιστώμενη τιμή του E.

Πίνακας 3.5: Απαιτήσεις για τις κλάσεις φωτισμού CE

Κλάση	Οριζόντια ένταση φωτισμού	
	E σε lx (ελάχιστη διατηρούμενη)	U <sub>0</sub> (ελάχιστη)
CE0	50	0.4
CE1	30	0.4
CE2	20	0.4
CE3	15	0.4
CE4	10	0.4
CE5	7.5	0.4

Για την εύρεση της κλάσης φωτισμού που θα πρέπει να επιλεγεί σε μια συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να συμβουλευτούμε την νόρμα CEN13201 ή να χρησιμοποιήσουμε κάποιο ειδικό λογισμικό όπως το Road wizard της Philips.

### 3.7 Διατάξεις τοποθέτησης φωτιστικών δρόμου

Οι βασικές διατάξεις τοποθέτησης φωτιστικών σε οδόστρωμα είναι: η μονόπλευρη διάταξη (single sided), η αξονική διάταξη (catenary), η αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη (staggered), η αμφίπλευρη διάταξη (opposite) και η διάταξη του δίδυμου βραχίονα (twin brackets) [48]. Οι τέσσερις πρώτες φαίνονται στο σχήμα 3.3 ([42]). Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποια στοιχεία για καθεμιά από αυτές ([69]-[71]).

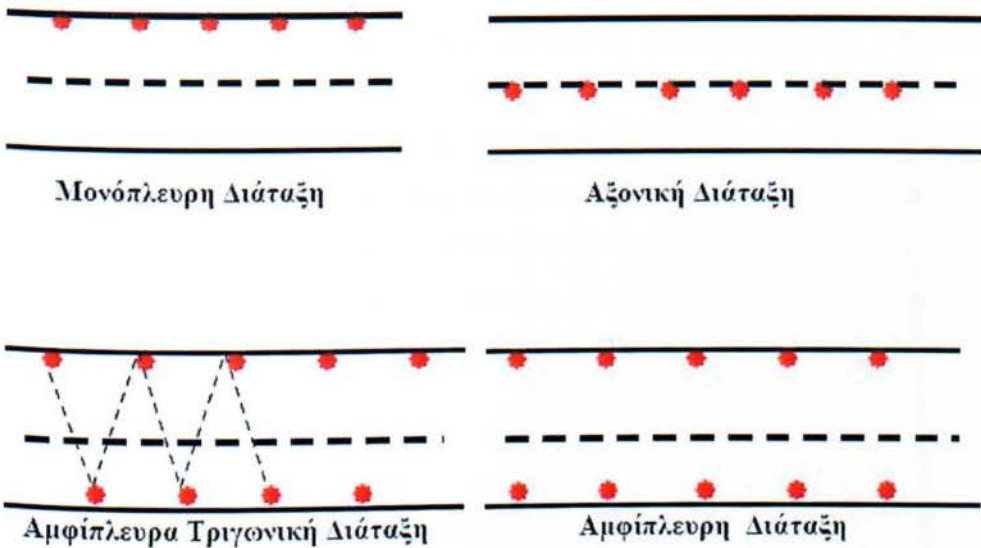
#### (α) Μονόπλευρη διάταξη

Η διάταξη αυτή επιτρέπει να φωτιστεί περισσότερο η μία πλευρά του δρόμου, στην οποία βρίσκονται τα φωτιστικά. Χρησιμοποιείται κυρίως σε δρόμους μικρού πλάτους (και πιο συγκεκριμένα όταν το πλάτος του δρόμου είναι μικρότερο από το ύψους ανάρτησης του φωτιστικού) ή σε δρόμους που παρουσιάζουν ασυμμετρία, όπως:

- Όταν η κυκλοφορία είναι μόνιμα μεγαλύτερα από την μία πλευρά
- Σε μονόδρομους, που η κυκλοφορία γίνεται προς την μία κατεύθυνση μόνο



- Όταν ο δρόμος, που θα φωτιστεί, παρουσιάζει καμπυλότητα. Στην περίπτωση αυτή η τοποθέτηση των φωτιστικών συνιστάται να γίνεται στην πλευρά με την μεγαλύτερη ακτίνα.
- Όταν υπάρχουν δέντρα στην μια πλευρά του δρόμου  
Εκτός από τις παραπάνω περιπτώσεις, η μονόπλευρη διάταξη μπορεί ακόμη να προτιμηθεί για λόγους αισθητικής ή ευκολίας στην τοποθέτηση.



Σχήμα 3.3: Διατάξεις τοποθέτησης φωτιστικών σωμάτων

### (β) Αξονική διάταξη

Χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν επιτακτικοί λόγοι, όπως δέντρα ή εμπόδια στα άκρα του δρόμου. Κάποια προβλήματα, που μπορεί να παρουσιαστούν με τη διάταξη αυτή, είναι:

- Ο άνεμος προκαλεί την κίνηση των φωτιστικών στην περίπτωση που δεν είναι πολύ καλά στερεωμένα.
- Οι εργασίες συντηρήσεως δυσχεραίνουν την κυκλοφορία.
- Προσελκύει τους οδηγούς στο κέντρο του δρόμου.

### (γ) Αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται σε δρόμους μέτριου πλάτους (1 - 1,5 φορές το ύψος ανάρτησης των φωτιστικών). Μπορεί να δώσει πολύ καλή φωτεινή κατανομή, χρειάζεται όμως προσεκτικό έλεγχο της ομοιομορφίας λαμπρότητας ώστε να μη δημιουργούνται φωτεινές κηλίδες και σκοτεινοί κυματισμοί. Γενικά η αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές της διαμήκου ομοιομορφίας και αν δε σχεδιαστεί σωστά μπορεί να δώσει κακή οπτική καθοδήγηση, με αποτέλεσμα να προκαλείται σύγχυση στους οδηγούς για την πορεία του δρόμου. Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι η διάταξη αυτή

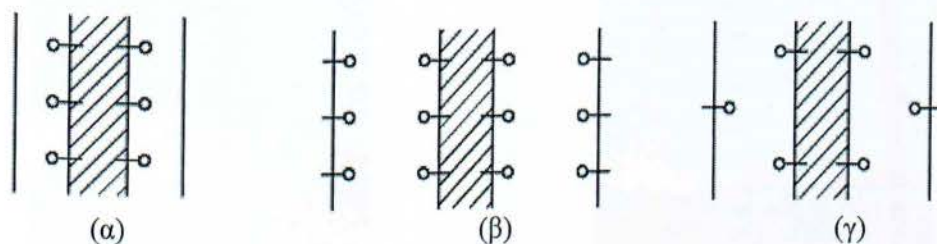
παρουσιάζει αυξημένο κόστος κατασκευής σε σχέση με τις προηγούμενες λόγω διπλής καλωδίωσης.

#### (δ) Αμφίπλευρη διάταξη

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για δρόμους μεγάλου πλάτους (μεγαλύτερο από 1,5 φορές το ύψος ανάρτησης των φωτιστικών). Ουσιαστικά πρόκειται για δύο μονόπλευρες διατάξεις τοποθετημένες αντικριστά.

#### (ε) Διάταξη δίδυμου βραχίονα

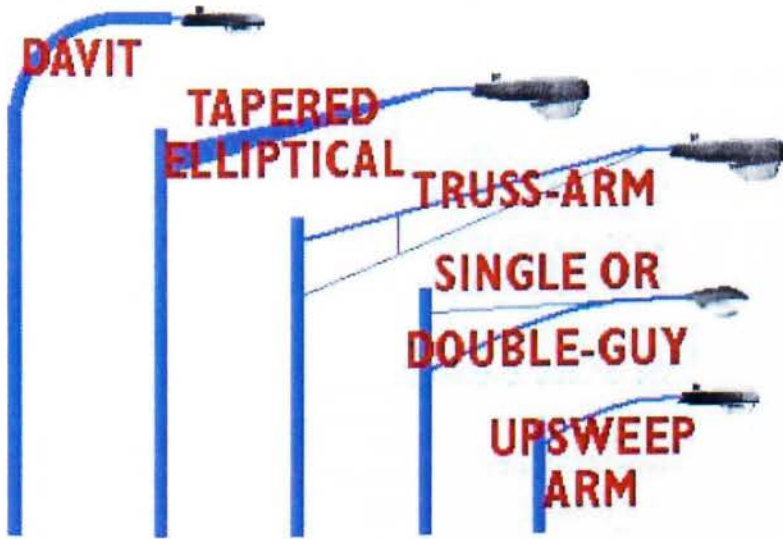
Η διάταξη αυτή (σχ. 3.4α) χρησιμοποιείται σε λεωφόρους διπλής κυκλοφορίας με ύπαρξη κεντρικής νησίδας. Στην ουσία πρόκειται για δύο μονόπλευρες διατάξεις τοποθετημένες η μία όπισθεν της άλλης. Η οπτική καθοδήγηση αυτής της διάταξης είναι άριστη. Οι λωρίδες ταχείας κυκλοφορίας φωτίζονται περισσότερο συγκριτικά με τις λωρίδες βραδείας κυκλοφορίας, διαπίστωση η οποία δεν είναι απαραίτητα αρνητική. Σε μεγάλου πλάτους αυτοκινητοδρόμους η διάταξη δίδυμου βραχίονα μπορεί να συνδυαστεί με την αμφίπλευρη ή την αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη, όπως φαίνεται στα σχ. 3.4β και 3.4γ, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4: Διατάξεις δίδυμου βραχίονα ([71])

### 3.8 Τύποι ιστών φωτισμού

Οι ιστοί φωτισμού ποικίλουν ανάλογα την κλάση και τον περιβάλλοντα χώρο του δρόμου που πρέπει να φωτιστεί. Υπάρχουν δεκάδες τύποι ιστών και δεκάδες κατασκευαστές. Κάποιοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε σχέση με τους άλλους. Οι κυριότεροι τύποι ιστών φωτισμού παρουσιάζονται στο σχήμα 3.5 ([55]) ενώ αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες ιστών φωτισμού φαίνονται στα σχήματα 3.6 έως 3.9 ([69]).



Σχήμα 3.5: Συνήθεις τύποι ιστών φωτισμού



Σχήμα 3.6: Στόλος φωτισμού με καμπύλο βραχίονα



Σχήμα 3.7: Στόλος φωτισμού με ευθύγραμμο βραχίονα



Σχήμα 3.8: Στόλος φωτισμού με διπλό βραχίονα



Σχήμα 3.9: Φωτισμός επί υψηλών ιστών

### 3.9 Λαμπτήρες για φωτισμό δρόμων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότεροι τύποι λαμπτήρων, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φωτισμού δρόμων. Ο πίνακας 3.6 ([55]) δείχνει για καθέναν από τους τύπους αυτούς τυπικές τιμές για την αρχική φωτεινή ροή (δηλαδή τη φωτεινή ροή, που δίνει ένας καινούργιος λαμπτήρας), τη φωτεινή απόδοση και τη διάρκεια ζωής. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε τύπου ([55], [66], [69], [70]).

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά λαμπτήρων φωτισμού δρόμων

Τύπος Λαμπτήρα	Αρχική Φωτεινή Ροή (lumen)	Φωτεινή Απόδοση (lumen/Watt)	Διάρκεια Ζωής (ώρες)
ΠΥΡΑΚΤΩΣΕΩΣ	600-15000	9,7-17,4	1000-2000
ΑΤΜΩΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ	3700-57000	37-57	18000-28000
ΑΤΜΩΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΦΩΣΦΩΡΟΥΧΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ	4000-63000	40-63	18000-28000
ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΛΟΓΟΝΙΔΙΩΝ	34000-100000	85-100	10000-15000
ΝΑΤΡΙΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΕΩΣ	9500-140000	95-140	15000-28000
ΝΑΤΡΙΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΕΩΣ	1800-33000	100-183	10000-18000

Λαμπτήρας πυρακτώσεως: Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως χρησιμοποιούνταν ευρύτατα στο παρελθόν σε εφαρμογές φωτισμού δρόμων. Αντικαταστάθηκαν όμως από άλλους τύπους λαμπτήρων επειδή είχαν χαμηλή απόδοση και περιορισμένη διάρκεια ζωής.

Λαμπτήρας ατμών υδραργύρου: Στις περισσότερες περιπτώσεις οι λαμπτήρες πυρακτώσεως αντικαταστάθηκαν από λαμπτήρες ατμών υδραργύρου. Παρόλο που οι λαμπτήρες αυτοί έχουν υψηλότερο κόστος και χρειάζονται ρυθμιστή (ballast), έχει βρεθεί ότι συμφέρουν καλύτερα διότι έχουν υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Λαμπτήρας ατμών υδραργύρου φωσφορούχου επίστρωσης: Πρόκειται για μια βελτιωμένη εκδοχή των λαμπτήρων ατμών υδραργύρου, που έχει καλύτερη απόδοση και δίνει

πιο ευχάριστο χρώμα. Στους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου, ένα σημαντικό μέρος της ακτινοβολούμενης ενέργειας είναι μέσα στην υπεριώδη περιοχή. Με τις φωσφορούχες επιστρώσεις, η ενέργεια αυτή μετατραπέεται σε ορατό φως. Ένα μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι λόγω του μεγέθους της φωτεινής πηγής, που είναι ολόκληρο το περίβλημα του λαμπτήρα, παρουσιάζονται δυσχέρειες στον έλεγχο της φωτεινής δέσμης και την οδήγησή της προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων: Είναι ένας άλλος τύπος λαμπτήρα ατμών υδραργύρου. Ο σωλήνας τόξων περιέχει μεταλλικά αλογονίδια, που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και την απόδοση του χρώματος χωρίς να χρειάζονται επιστρώσεις. Το μέγεθος της πηγής φωτός είναι αυτό ενός σωλήνα τόξων και επιτρέπει τον καλό έλεγχο του φωτός με τα ίδια φωτιστικά, που χρησιμοποιούνται και για τους λαμπτήρες καθαρού υδραργύρου. Το μειονέκτημα των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων είναι η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής.

Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης: Ο λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης έχει προς το παρόν αντικαταστήσει τον λαμπτήρα υδραργύρου. Χαρακτηρίζεται από το χρυσό-λευκό χρώμα του παραγόμενου φωτός. Οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης χρησιμοποιούν συνήθως ειδικά ballast, που εξασφαλίζουν την απαιτούμενη υψηλή τάση για την έναυση του λαμπτήρα. Παρόλα αυτά, πολλοί λαμπτήρες μπορούν να χρησιμοποιούν και ballast από ορισμένους τύπους λαμπτήρων ατμών υδραργύρου, αλλά με φτωχότερη απόδοση και πιο σύντομη ζωή.

Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης: Χαρακτηρίζεται από την παραγωγή ενός μονοχρωματικού φωτός κίτρινου χρώματος. Απαιτεί ειδικό ballast, που αυξάνει σε μέγεθος με την αύξηση των Watt. Έχει την καλύτερη φωτεινή απόδοση για φωτοπικές συνθήκες, κυρίως διότι η συχνότητα της παραγόμενης ακτινοβολίας βρίσκεται πολύ κοντά στο μέγιστο της καμπύλης ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού. Η σύγχρονη τάση για εξοικονόμηση ενέργειας και η υψηλή αποτελεσματικότητα των λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης έχει οδηγήσει σε ευρεία χρήση τους για φωτισμό εμπορικών και κατοικημένων περιοχών. Δύο άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα των λαμπτήρων αυτού του τύπου είναι ότι η έξοδός τους παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα στις αυξομειώσεις της τάσης του δικτύου και ότι η απόδοσή τους δεν πέφτει με τη γήρανση (η παραγόμενη φωτεινή ροή δεν μειώνεται με την πάροδο του χρόνου).

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΦΩΤΙΣΤΙΚΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LED”

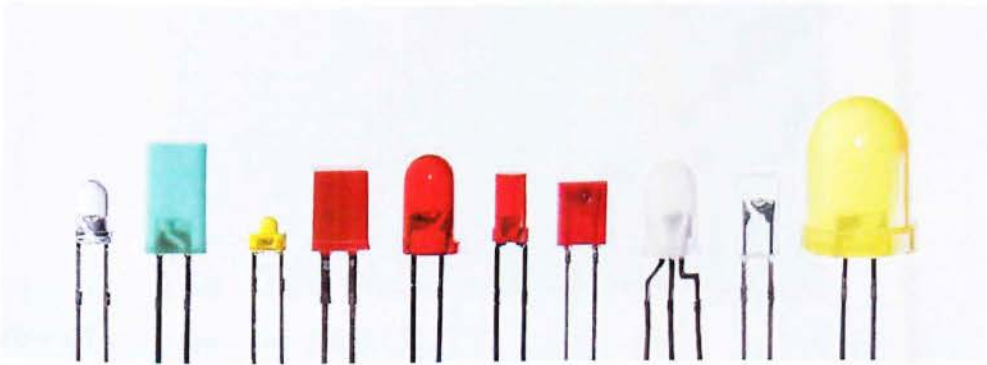
#### 4.1 Γενικά

Δίοδος Εκπομπής Φωτός, (LED, Light Emitting Diode), καλείται ένας ημιαγωγός ο οποίος εκπέμπει φως στενού φάσματος όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Ακριβέστερα, μια LED είναι μια επαφή p-n, που εκπέμπει φως όταν είναι ορθά πολωμένη, μετατρέποντας έτσι την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε την τεχνολογία των LED και τη χρήση της για το φωτισμό δρόμων. Επειδή οι LED δεν είναι τίποτε άλλο παρά δίοδοι ειδικής κατασκευής, θα ξεκινήσουμε την παρουσίαση με μια σύντομη αναφορά στις διόδους. Όπως είναι γνωστό, οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος στους ημιαγωγούς είναι δύο ειδών: τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι ηλεκτρόνια, που έχουν μεταβεί από την εξωτερική στοιβάδα των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος (ζώνη σθένους) στην υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση (ζώνη αγωγιμότητας) ενώ οι οπές είναι κενές θέσεις ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους. Σε έναν αμιγή ημιαγωγό (π.χ. σε ένα κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου ή γερμανίου) ο αριθμός των οπών είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Χρησιμοποιώντας όμως διάφορες προσμίξεις είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ημιαγωγικά υλικά, που παρουσιάζουν περίσσεια οπών (τύπου p) ή περίσσεια ηλεκτρονίων (τύπου n). Επαφή p-n είναι η ένωση δύο τμημάτων ημιαγωγού, το ένα από τα οποία είναι τύπου p και το άλλο τύπου n. Μια δίοδος γενικά αποτελείται από ένα τσιπ ημιαγωγικού υλικού εμπλουτισμένου με κατάλληλες προσμίξεις ώστε να δημιουργηθεί μία επαφή p-n. Το κυριότερο χαρακτηριστικό των διόδων είναι ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί εύκολα να πηγαιίνει από την πλευρά p (άνοδος), στην πλευρά n (κάθοδος), αλλά όχι αντίθετα. Όταν στα άκρα της διόδου εφαρμοστεί τάση, που αντιστοιχεί στη φορά διέλευσης του ρεύματος (όταν δηλαδή το ‘+’ της τάσης συνδεθεί στο μέρος p της επαφής) τότε λέμε ότι η δίοδος είναι ορθά πολωμένη.

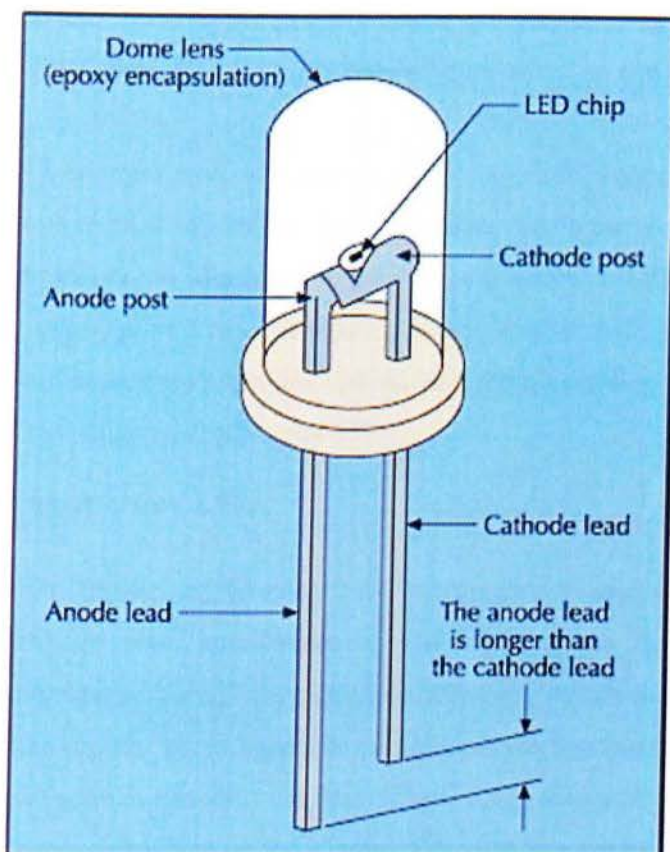
Οι LED είναι δίοδοι κατασκευασμένες με ειδικό τρόπο ώστε, κατά τη διέλευση του ρεύματος από αυτές, ένας σημαντικός αριθμός ηλεκτρονίων να επανασυνδέεται με οπές

εκπέμποντας ακτινοβολία ([74]). Σε κάθε τέτοια επανασύνδεση ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει σε μια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση και απελευθερώνει ενέργεια με τη μορφή ενός φωτονίου. Το ποσό της ενέργειας αυτής (και κατά συνέπεια η συχνότητα ή το μήκος κύματος του φωτονίου, άρα και το χρώμα του φωτός, που εκπέμπεται) εξαρτάται από το ενεργειακό διάκενο των υλικών, που αποτελούν την ένωση pn. Με κατάλληλη επιλογή των υλικών αυτών μπορούν να κατασκευαστούν LED, που εκπέμπουν φως με μήκη κύματος κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία, σε διάφορα χρώματα του ορατού φάσματος ή κοντά στην υπεριώδη ακτινοβολία. Χάρη στον ιδιαίτερο τρόπο κατασκευής τους, τα LED μπορούν να διώχνουν προς τα έξω ένα μεγάλο αριθμό φωτονίων. Επιπλέον, συχνά τοποθετούνται σε κατάλληλο πλαστικό περίβλημα, που έχει την ιδιότητα να στέλνει το φως προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ([72]). Στο σχ. 4.1 εικονίζονται διάφοροι τύποι διόδων LED.



Σχήμα 4.1: LED σε διάφορα χρώματα και μεγέθη ([72])

Τα μέρη μιας τυπικής LED φαίνονται στο σχήμα 4-2. Το κεντρικό κομμάτι είναι ο ημιαγωγός, ο οποίος τοποθετείται σε έναν ανακλαστήρα και στερεώνεται εκεί χρησιμοποιώντας μαλακό χάλυβα, που συνδέεται με τους ακροδέκτες της ανόδου και της καθόδου. Η όλη κατασκευή περικλείεται μέσα σε πλαστικό κάλυμα ([73]). Η δίοδος έχει μέγεθος περίπου  $0,25 \text{ mm}^2$ . Χρειάζεται ρεύμα περίπου ίσο με  $10 \text{ mA}$  για να λειτουργήσει σε ισχύ ίση με  $0,1 \text{ Watt}$  ([75]). Καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στην επαφή pn των δύο διαφορετικών υλικών, παράγεται φως. Όπως προαναφέραμε, το μήκος κύματος και το χρώμα του φωτός καθορίζονται από τη σύνθεση των υλικών, ενώ το σχήμα και το πλάτος της φωτεινής δέσμης, που εκπέμπεται, καθορίζεται από διάφορους παράγοντες όπως το σχήμα του ανακλαστήρα, το μέγεθος του τσιπ και το σχήμα του φακού. Εκτός από τα ορατά μήκη κύματος, οι LED μπορούν να εκπέμψουν υπέρυθρο φως με μήκος κύματος από  $830 \text{ nm}$  έως  $940 \text{ nm}$ , καθώς και υπεριώδες ([73]).



Σχήμα 4.2: Δίοδος φωτοεκπομπής (LED) ([73])

## 4.2 Ιστορία

Η πρώτη εμφάνιση των LED στην αγορά έγινε στα μέσα της δεκαετίας του 1960 ([72]). Αρχικά ήταν αποκλειστικά κόκκινου χρώματος και χρησιμοποιούνταν μόνο ως λαμπάκια ενδείξεων, αφού η φωτεινή ισχύς, που παρήγαγαν, ήταν πολύ μικρή για να μπορεί να φωτίσει ένα χώρο. Αντικατέστησαν τους λαμπτήρες πυρακτώσεως και νέον, που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα για φωτεινές ενδείξεις, γιατί σε σύγκριση με αυτούς είχαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, χαμηλότερη τάση λειτουργίας, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και δεν χρειάζονταν συχνή αντικατάσταση. Μέσα στη δεκαετία του 1970 άρχισαν να κατασκευάζονται και LED διαφορετικών χρωμάτων και συγκεκριμένα πράσινο, κίτρινο και πορτοκαλί. Το μπλε, το κυανό και το ιώδες εμφανίστηκαν αρκετά αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Από την άλλη μεριά, οι τεχνολογικές εξελίξεις της δεκαετίας του 1980 επέτρεψαν την κατασκευή LED πολύ μεγαλύτερης λαμπρότητας και άνοιξαν το δρόμο για τη χρήση τους σε εφαρμογές φωτισμού ([76]).

Αρχικά, η εκπομπή λευκού φωτός από λαμπτήρα LED ήταν δυνατή μόνο με την μίξη ενός κόκκινου, πράσινου και μπλε LED. Ωστόσο, το 1993 ο Shuji Nakamura, κατάφερε να



παράγει λευκό φως από ένα μπλε LED (με νιτρίδιο του γαλλίου), αφού το επικάλυψε με φώσφορο. Αυτή η διαδικασία ήταν λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με την ποσότητα φωτός που παράγονταν ([72]).

Έως το 2008 η τεχνολογία του λευκού φωτός είχε προχωρήσει τόσο πολύ, που η εταιρία Sentry Equipment Corporation ήταν σε θέση να φωταγωγήσει ολόκληρο το εργοστάσιό της, εσωτερικά και εξωτερικά, σχεδόν αποκλειστικά με LED. Αν και το αρχικό κόστος ήταν τρεις φορές μεγαλύτερο σε σχέση με τους συμβατικούς λαμπτήρες, θα είχαν οικονομική απόσβεση σε λιγότερο από δύο χρόνια, από την εξοικονόμηση ενέργειας και την μη αντικατάσταση των καμένων λαμπτήρων ([77]).

### 4.3 Πλεονεκτήματα των LED

**Απόδοση:** Οι λάμπες τεχνολογίας LED επιτυγχάνουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως ή φθορισμού ([73],[78]). Για να παράγει φως ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως, πρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από το νήμα του και να το θερμάνει σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πολύ χαμηλή απόδοση των λαμπτήρων, αφού πάνω από 98% της ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον ως θερμότητα. Για παράδειγμα, ένας λαμπτήρας 100W παράγει φωτεινή ροή 1700 lumen, δηλαδή περίπου 17lm/W ([79]). Στους λαμπτήρες φθορισμού, ατμοί υδραργύρου στο εσωτερικό του, παράγουν υπεριώδη ακτινοβολία. Το υπεριώδες φως στη συνέχεια απορροφάται από τη φωσφορούχο επίστρωση, παράγοντας ορατό φως. Αν και η θερμική ενέργεια που παράγεται στους λαμπτήρες φθορισμού είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, ωστόσο εξακολουθεί να χάνεται ενέργεια στη μετατροπή ορατού φωτός από υπεριώδες. Η απόδοση κατά μέσο όρο των σύγχρονων λαμπτήρων φθορισμού μικρών διατάξεων (Compact Fluorescent Lamps – CFL) είναι γύρω στα 50 – 67lm/W ([79]). Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε σχεδόν μονοχρωματικό φως με τρόπο άμεσο, που δεν συνοδεύεται από σημαντική εκπομπή θερμότητας προς το περιβάλλον. Οι LED, που είναι σήμερα διαθέσιμες στην αγορά, προσφέρουν φωτεινή απόδοση συγκρίσιμη με αυτή των λαμπτήρων CFL. Επιπλέον, καθώς η τεχνολογία των LED εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς, έχουν ήδη ανακοινωθεί από κάποιες εταιρείες λάμπες LED νέου τύπου, με αποδόσεις πάνω από 100lm/W ([72], [78]). Θα πρέπει πάντως να αναφερθεί ότι πολλές φορές, οι τιμές της φωτεινής απόδοσης, που αναφέρουν οι κατασκευαστές, δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα διότι υπολογίζονται για ιδανικές συνθήκες λειτουργίας ή αφορούν μόνο την

εκπομπή φωτός από τον ημιαγωγό και αγνοούν απώλειες στο φωτιστικό, στα ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης του λαμπτήρα, κ.λ.π. ([80]).

**Διάρκεια ζωής:** Οι LED συνήθως δεν καίγονται, αλλά τείνουν να μειώνουν σταδιακά το φως τους. Σαν χρόνος ζωής ορίζεται το διάστημα μέχρι να φτάσουν στο 70% της αρχικής τους φωτεινής ροής ([75]). Η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα LED κυμαίνεται από 30000-50000 ώρες, που αντιστοιχούν σε πάνω από 10 χρόνια. Κάποιοι κατασκευαστές δηλώνουν και μεγαλύτερες διάρκειες ζωής, που φτάνουν μέχρι τις 100000 ώρες ([72], [78]). Όμως η αγορά αντιμετωπίζει τα νούμερα αυτά με κάποια επιφύλαξη, καθώς θεωρείται ότι ισχύουν για εργαστηριακές και όχι για πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ([80], [81]). Σε κάθε περίπτωση πάντως η διάρκεια ζωής των LED είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των λαμπτήρων πυρακτώσεως (περίπου 1000 ώρες) και τουλάχιστον διπλάσια από των λαμπτήρων φθορισμού (10000-20000 ώρες) ([79]).

**Ανθεκτικότητα:** Οι λάμπες LED δεν σπάνε εύκολα, διότι δεν περιέχουν γυαλί. Αυτό τις κάνει εξαιρετικά ανθεκτικές σε κραδασμούς, δονήσεις και χτυπήματα ([78]).

**Ποιότητα φωτός:** Το φως που παράγουν οι LED είναι πολύ ανώτερο από τους παραδοσιακούς λαμπτήρες. Ειδικότερα, για τον φωτισμό δρόμων χρησιμοποιείται ακόμα το κίτρινο-πορτοκαλί φως των λαμπτήρων νατρίου που δεν επιτρέπει υψηλή ευκρίνεια. Αντιθέτως, το σταθερό λευκό φως των LED παρέχει μεγαλύτερη φωτεινότητα και απόδοση των χρωμάτων, ιδιαίτερα τις νυχτερινές ώρες, αφού μοιάζει περισσότερο σαν φυσικός φωτισμός ([50], [54], [82]). Σε αντίθεση με τους κοινούς λαμπτήρες, το φως των LED δεν αυξομειώνεται σε εναλλαγές της τάσης του δικτύου διότι οι λάμπες LED είναι εφοδιασμένες με ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις σταθεροποίησης, που εξασφαλίζουν σταθερή ροή ρεύματος από την ένωση pn ([72]). Επίσης, επειδή έχουν καλύτερη κατανομή του φωτός, είναι ιδανικά για εσωτερικά έργα φωτισμού ([54]).

**Φιλικά προς το περιβάλλον:** Κατ' αρχάς οι λάμπες LED παρέχουν μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας (από 50% ως 80%), αφού αφενός καταναλώνουν πολύ λιγότερη ηλεκτρική ισχύ από τους συμβατικούς λαμπτήρες και αφετέρου δεν έχουν μεγάλες απώλειες σε θερμότητα. Αυτό έχει πολύ ευεργετικά αποτελέσματα για το περιβάλλον, καθώς ελάττωση των αναγκών για ηλεκτρική ενέργεια σημαίνει λιγότερες ώρες λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, οι οποίες επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον με εκπομπές CO<sub>2</sub> και άλλων αέριων ρύπων, ή στην περίπτωση των πυρηνικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και με πυρηνικά απόβλητα. Έχει μάλιστα υπολογιστεί ότι η εξοικονόμηση ενέργειας, που επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση ενός μόνο λαμπτήρα πυρακτώσεως με λάμπα LED, μεταφράζεται σε μισό τόνο λιγότερο CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, στο σύνολο της

διάρκειας ζωής της LED ([83]). Επιπλέον, λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους, οι LED δεν χρειάζονται συχνή αντικατάσταση και έτσι μειώνεται ο συνολικός όγκος των απορριμάτων ([84]). Ένας τρίτος λόγος, που οι LED θεωρούνται ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον, είναι ότι, σε αντίθεση με λαμπτήρες άλλων τεχνολογιών, οι LED δεν περιέχουν ουσίες όπως γυαλί, ίνες υδραργύρου, μόλυβδο και άλλα τοξικά υλικά ([75], [85]).

**Εύκολη εγκατάσταση:** Στο εμπόριο υπάρχουν λάμπες LED τόσο για τροφοδοσία AC όσο και για τροφοδοσία DC ([86]-[88]) (μερικές φορές και με τα δύο) ([89]). Οι τελευταίες προσφέρονται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις, που η σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτροδότησης είναι δύσκολη, ασύμφορη ή ακόμη και ανέφικτη. Χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες λάμπες LED μπορεί κανείς πολύ εύκολα να στήσει ένα αυτόνομο σύστημα φωτισμού, που να τροφοδοτείται από μια εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως π.χ. μια απλή μπαταρία ή μια ηλιακή συστοιχία χωρίς την χρήση αντιστροφέα. Επίσης, επειδή οι λάμπες LED μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις (π.χ. 12 ή 24 V), εξασφαλίζουν την πλήρη ασφάλεια των καταναλωτών και μειώνουν τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας ([90]).

**Άμεση έναρξη:** Οι λάμπες LED έχουν πολύ μικρό χρόνο έναρξης, 60nsec έναντι 10msec ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως ([73]) και μπορούν να τεθούν σε λειτουργία σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (από -40 έως 185° C) ([75]).

Άλλα πλεονεκτήματα των LED, που αναφέρονται σε διάφορα τεχνικά φυλλάδια και ιστοσελίδες (π.χ. [72], [75], [91]), είναι τα εξής:

- Το μικρό μέγεθος και βάρος των στοιχείων παρέχει μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό καθώς επιτρέπει να συνδυάζονται πολλά από αυτά και να δημιουργούνται εξειδικευμένες λύσεις, απόλυτα προσαρμοσμένες στις ανάγκες της κάθε εφαρμογής.
- Σε αντίθεση με τους λαμπτήρες άλλων τεχνολογιών, οι LED μπορούν να κατασκευαστούν έτσι ώστε να παράγουν όλα τα δυνατά χρώματα του φάσματος. Έτσι δεν χρειάζεται να τοποθετούνται χρωματιστά φίλτρα, πράγμα που έχει άμεση επίπτωση τόσο στην ποιότητα του φωτισμού όσο και στην απόδοση των φωτιστικών σωμάτων.
- Επειδή οι LED δεν έχουν ballast, δεν έχουν προβλήματα παρεμβολών με τις ραδιοφωνικές ή τηλεοπτικές συχνότητες.
- Πολλές φορές τα φωτιστικά, ιδίως αυτά που βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους ή σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, λερώνονται από σκόνη, καπνό ή άλλους ρύπους. Όταν το φωτιστικό χρησιμοποιεί λαμπτήρες πυρακτώσεως ή φθορισμού, η υψηλή θερμοκρασία, που αναπτύσσεται από τους λαμπτήρες αυτούς κάνει τα σωματίδια των ρύπων να κολλάνε πάνω στην επιφάνεια του φωτιστικού με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να καθαριστούν.

Με την πάροδο του χρόνου, η συσσώρευση αυτή των ρύπων μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της απόδοσης του φωτιστικού, καθώς εμποδίζει το φως του λαμπτήρα να διαχυθεί ελεύθερα προς στο περιβάλλον. Με τη χρήση λαμπτήρων LED, που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 60° C), το πρόβλημα αυτό αποφεύγεται, καθώς οι ρύποι δεν καίγονται πάνω στην επιφάνεια του φωτιστικού και μπορούν να απομακρυνθούν με καθαρισμό.

#### 4.4 Μειονεκτήματα των LED

Ως μειονεκτήματα των λαμπτήρων LED (όσον αφορά τη σημερινή κατάσταση της τεχνολογίας φυσικά) αναφέρονται τα εξής ([72], [75], [79], [81], [91], [95]):

**Κόστος:** Το κόστος αγοράς των λαμπτήρων LED είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό των συμβατικών λαμπτήρων φωτισμού. Βεβαίως υπάρχει ο αντίλογος ότι μακροπρόθεσμα οι λαμπτήρες LED συμφέρουν καλύτερα επειδή καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και διαρκούν περισσότερο. Όμως το γεγονός είναι ότι η σχετικά υψηλή τιμή τους αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για πολλούς υποψήφιους αγοραστές. Παρεπιπτόντως θα πρέπει να αναφερθεί ότι επειδή οι λαμπτήρες LED δεν είναι τόσο διαδεδομένοι όσο άλλοι τύποι λαμπτήρων, μερικές φορές μπορεί να παρατηρηθεί μια σχετική δυσκολία εντοπισμού τους στην αγορά.

**Σταδιακή μείωση της παραγωγής φωτός:** Οι LED έχουν μια σταδιακή και μόνιμη μείωση της παραγωγής φωτός κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας τους. Η μείωση αυτή μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους ([92]), κυριότερος από τους οποίους είναι η ανάπτυξη θερμότητας στην ένωση pn ([93]). Ωστόσο αυτό συμβαίνει με πολύ αργό ρυθμό και δεν γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. Όπως ήδη προαναφέρθηκε, σε μια τυπική λάμπα LED, η φωτεινή ροή αναμένεται να έχει μειωθεί κατά 30% σε σχέση με την αρχική της τιμή μετά από 30000-50000 ώρες λειτουργίας,

**Προσαρμογή για λειτουργία στο δίκτυο:** Επειδή οι LED είναι κατά κύριο λόγο συσκευές χαμηλής τάσης DC, χρειάζονται σωστή μελέτη και καλά σχεδιασμένο κύκλωμα για να λειτουργήσουν αποδοτικά στο δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος ([94]).

**Κατευθυντική δέσμη φωτός:** Γενικά η δέσμη φωτός, που εκπέμπεται από λαμπτήρες LED, τείνει να είναι περισσότερο κατευθυντική απ' ό,τι στις άλλες τεχνολογίες φωτισμού. Αυτό σημαίνει ότι η δέσμη φωτός μάλλον εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο σημείο παρά διαχέεται ομοιόμορφα στο χώρο. Αν και σε ορισμένες εφαρμογές αυτό είναι επιθυμητό και αναφέρεται ως πλεονέκτημα της τεχνολογίας LED (π.χ. φωτιστική διακόσμηση, περιπτώσεις τοπικού φωτισμού όπως χειρουργεία, εργοστάσια, γραφεία, φωτισμός δρόμων κλπ), αποτελεί

μειονέκτημα σε περιπτώσεις γενικού φωτισμού, που χρειάζονται μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των lux στο χώρο.



Σχήμα 4.3: Φωτισμός γέφυρας με φωτιστικά LED

## 4.5 Εφαρμογές των LED

Οι LED, λόγω της περισσότερο κατευθυντικής δέσμης του φωτός, που δίνουν, αλλά και των υπολοίπων χαρακτηριστικών τους όπως η ποιότητα του φωτισμού, η ποικιλία των χρωμάτων, η χαμηλή κατανάλωση και η ευελιξία σχεδιασμού, μπορούν να αξιοποιηθούν σε ποικίλες εφαρμογές, που συνδυάζουν την απαίτηση της χρηστικότητας με αυτή της αισθητικής ([72], [75]). Για παράδειγμα, φωτιστικά με LED τοποθετούνται κάτω από τα ντουλάπια της κουζίνας για να φωτίζουν την επιφάνεια του πάγκου εργασίας ([98]), σε κλιμακοστάσια, σε διαδρόμους, σε κήπους, σε γκαράζ. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, οι LED προσφέρονται ιδιαίτερα για τοπικό φωτισμό χώρων εργασίας αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για γενικό φωτισμό εσωτερικών ή εξωτερικών χώρων, λόγω της υψηλής τους απόδοσης και της μεγάλης διάρκειας ζωής. Επιπλέον, λόγω της αδιάβροχης τεχνολογίας τους είναι πολύ κατάλληλα για εφαρμογές υποβρύχιου φωτισμού αλλά και για δημιουργία πολύχρωμων διακοσμητικών εφέ σε πισίνες, λιμνούλες, συντριβάνια και ενυδρεία ([72], [99], [100]). Μια άλλη πολύ συνηθισμένη εφαρμογή των LED είναι οι φωτεινοί πίνακες ανακοινώσεων που βλέπουμε συχνά σε δρόμους, κοινόχρηστους χώρους,

πλατείες ή μεγάλης κλίμακας βιομηχανικά έργα. Ακόμη υπάρχουν αμέτρητες εφαρμογές για τοπικό φωτισμό σε συνέδρια, εκδηλώσεις, μουσικές και θεατρικές σκηνές και άλλους χώρους διασκέδασης ([79]). Όσον αφορά τον οδικό φωτισμό, που αποτελεί και το κύριο θέμα της παρούσας εργασίας, πολλοί πιστεύουν ότι οι LED θα αποτελέσουν το μέλλον για το φωτισμό των δρόμων και των χώρων στάθμευσης (parking) ([101]-[104]). Η άποψη αυτή αναφέρεται τόσο σε ιστοσελίδες κατασκευαστών όσο και σε διάφορα διαδικτυακά φόρουμ ανταλλαγής απόψεων. Χαρακτηριστικό μάλιστα είναι το γεγονός ότι αν κανείς δώσει στη γνωστή μηχανή αναζήτησης Google τις λέξεις “street lights future” θα δει σχεδόν αποκλειστικά ιστοσελίδες, που αναφέρονται στις LED. Πολλές μάλιστα από τις ιστοσελίδες αυτές παρουσιάζουν λύσεις, που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (κυρίως φωτοβολταϊκά και/ή ανεμογεννήτριες). Πραγματικά, οι LED είναι σχεδόν η μοναδική λύση, που προσφέρει τέτοια ευκολία σύνδεσης με τις πηγές αυτές, αφού οι LED μπορούν να τροφοδοτηθούν με συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης. Φωτιστικά δρόμου με λαμπτήρες LED και τροφοδοσία από φωτοβολταϊκά μπορούν να αποτελέσουν μια πρώτης τάξεως λύση σε απομακρυσμένες περιοχές, που η σύνδεση με το δίκτυο της ΔΕΗ είναι δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνολογία των LED εφαρμόζεται με επιτυχία και σε άλλους χώρους, εκτός του φωτισμού. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις λάμπες LED υπεριωδών ακτίνων (UV-LED) που χρησιμοποιούνται για αποστείρωση του νερού και την απολύμανση των συσκευών ([72]).

#### 4.6 Ηλιακά φώτα δρόμου με LED

Τα ηλιακά φώτα δρόμου κυκλοφορούν στην αγορά εδώ και αρκετό καιρό ([105]). Αρχικά σχεδιάστηκαν για χρήση σε λιγότερο ανεπτυγμένες ή σε απομονωμένες περιοχές καθώς και σε μέρη όπου η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο είτε ήταν δύσκολη είτε είχε διακοπεί λόγω ανθρωπογενών ή φυσικών καταστροφών. Σήμερα όμως, χάρη στην εξέλιξη της τεχνολογίας, η υλοποίηση έργων οδικού φωτισμού με χρήση ηλιακής ενέργειας είναι εφικτή σε οποιοδήποτε σχεδόν μέρος του κόσμου. Τα φώτα δρόμου, που τροφοδοτούνται από τον ήλιο, μπορούν να εγκατασταθούν γρήγορα και απλά και προσφέρουν μια προοπτική αρκετών ετών αξιόπιστης λειτουργίας με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης. Στην εποχή μας, που χαρακτηρίζεται από αυξημένη ευαισθησία σε θέματα περιβάλλοντος, οι συμβατικοί τρόποι ηλεκτροφωτισμού των δρόμων θεωρούνται δικαίως προβληματικοί, διότι καταναλώνουν τεράστια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, με μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Από την άλλη μεριά, ο επαρκής φωτισμός των δρόμων θεωρείται πολύ σημαντικός, για την ασφάλεια των πολιτών και την αποφυγή των

τροχαίων ατυχημάτων. Για το λόγο αυτό, οι αρχές του κάθε τόπου δείχνουν μεγάλο ενδιαφέρον για τεχνολογίες, που επιτυγχάνουν το επιθυμητό φωτιστικό αποτέλεσμα και ταυτόχρονα είναι οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια η χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συνδυασμό με λαμπτήρες LED υψηλής απόδοσης, μεγάλης διάρκειας ζωής και εξαιρετικής ποιότητας φωτισμού, δείχνει να είναι η πιο υποσχόμενη επιλογή, καθώς εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό όλα τα παραπάνω επιθυμητά χαρακτηριστικά. Θα πρέπει ωστόσο να τονιστεί ότι για να είναι αποδοτικό ένα τέτοιο σύστημα, χρειάζεται να έχει σχεδιαστεί σωστά, με βάση τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής. Θα πρέπει δηλαδή να προηγηθεί μια σχολαστική μελέτη, που θα λάβει υπόψη τις λάμπες που θα χρησιμοποιηθούν, το περιβάλλον και το χώρο που θα φωτιστεί, τις μπαταρίες, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που θα ελέγχουν τη φόρτιση, καθώς και τις ανάγκες για εφεδρικές πηγές που θα εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ σε περιπτώσεις παρατεταμένης έλλειψης ηλιοφάνειας.

Μέχρι σήμερα, αρκετές εταιρίες έχουν εισάγει στην αγορά ηλιακά φωτιστικά δρόμου με λαμπτήρες LED. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των LED αναπτύχθηκαν διεξοδικά στην προηγούμενη ενότητα. Εδώ απλώς θα συνοψίσουμε τα κυριότερα οφέλη, που προκύπτουν όταν οι LED συνδυάζονται κατάλληλα με φωτοβολταϊκά συστήματα και δημιουργούν μονάδες οδικού φωτισμού υψηλής ποιότητας, τροφοδοτούμενες με ηλιακή ενέργεια.

- Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.
- Μειωμένο κόστος συντήρησης, καθαρισμού και αντικατάστασης των λαμπτήρων
- Μείωση των καλωδιώσεων.
- Λειτουργία του φωτισμού ακόμα και σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος
- Καλύτερο και φυσικότερο φωτιστικό αποτέλεσμα
- Σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη

Επιπλέον, για λόγους πληρέστερης παρουσίασης, παραθέτουμε έναν πίνακα από την ιστοσελίδα της εταιρείας Lighting Orient Co., Ltd ([96]), όπου συγκρίνονται οι λάμπες LED οδικού φωτισμού της εταιρείας με τους κλασσικούς λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον ηλεκτροφωτισμό των δρόμων.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση λαμπτήρων LED οδικού φωτισμού με λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης

Orient LED Street Lights VS. HPS Street Lights		
Items	High Pressure Sodium	Orient LED Street Light
Photometric Performance	Bad	Excellent
Radiator Performance	Bad	Excellent
Electric Performance	Electric Shock Easy( High Voltage)	Safe (Low Voltage)
Working Life	Short (5,000h)	Quite Long (> 50,000h)
Working Voltage Range	Narrow ( $\pm 7\%$ )	Wide( $\pm 20\%$ )
Power Consumption	Quite High	Quite Low
Startup Speed	Quite Slow( Over 10minutes)	Rapid (2s)
Strobe	Yes( Alternating Current Drive)	No( Direct Current Drive)
Optical Efficiency	Low	High
Color Index/ Distinguish Feature	Bad, Ra< 50(The Color Of Object Is Faith, Boring, Hypnosis)	Good, Ra>80(The Color Of Object Is Fresh, Veritable And Comfortable)
Color Temperature	Quite Low ( Yellow Or Amber , Uncomfortable)	Ideal Color Temperature ( Comfortable)
Bad Glare	Strong Glare (Dazzle)	No Harmful Glare
Light Pollution	Strong	No
Heating	Serious (>300°C)	Cold Light (<60°C)
Lampshade Turn Dark	Easy ( Absorb Dust)	No ( Static Proof)
Lamp Aging Turn Yellow	In A Short Time	No
Shockproof Performance	Bad(Fragile )	Good (No Filament Nor Glass)
Environment Pollution	Contains Lead Element Etc.	No
Maintenance Cost	High	Quite Low
Product Cubage	Big	Small (Slim Appearance)
Cost-Effective	Low	High
Integrated Performance	Bad	Excellent

Τα στοιχεία που παρατέθηκαν στο κεφάλαιο αυτό δείχνουν ξεκάθαρα ότι δικαιολογημένα η τεχνολογία των LED θεωρείται από πολλούς ότι θα αποτελέσει το μέλλον στις εφαρμογές οδικού φωτισμού (σχ. 4.4).





Σχήμα 4.4: Λαμπτήρες LED για οδικό φωτισμό ([97])

## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ”

#### 5.1 Χρησιμοποιούμενα φωτιστικά

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά οι υπολογισμοί που απαιτούνται για τη μελέτη και τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ηλεκτροδότησης για μια εγκατάσταση οδικού φωτισμού με λάμπες LED. Πιο συγκεκριμένα, οι υπολογισμοί της παρούσας εργασίας βασίστηκαν στις σειρές φωτιστικών δρόμου SpeedStar και CitySoul LED της εταιρείας Philips ([54]). Πρόκειται για φωτιστικά τελευταίας τεχνολογίας που, σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία, σχεδιάστηκαν για να βοηθήσουν στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής στις πόλεις καθώς μπορούν να εξασφαλίσουν τις συνθήκες φωτισμού που απαιτούνται για μια άνετη και ασφαλή χρήση του οδικού δικτύου από οδηγούς και πεζούς, καταναλώνοντας μέχρι και 70% λιγότερη ενέργεια από τα συνηθισμένα φωτιστικά νατρίου ([50]). Επιλέχτηκαν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους (και κυρίως την ονομαστική τιμή της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής) μετά από μια σύντομη έρευνα στο διαδίκτυο και σύγκριση με αντίστοιχα προϊόντα άλλων μεγάλων κατασκευαστών.

Η σειρά SpeedStar περιλαμβάνει φωτιστικά LED για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών οδικού φωτισμού, από δρόμους μέσα σε κατοικημένες περιοχές μέχρι αυτοκινητοδρόμους υψηλής ταχύτητας. Κατά τη σχεδιάσή τους έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας και προστασίας του περιβάλλοντος ([50]). Από την άλλη μεριά, τα φωτιστικά CitySoul LED προορίζονται κυρίως για δρόμους μέσα σε πόλεις και συνδυάζουν τα προηγμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της σειράς CitySoul ([51]) με την υψηλή απόδοση της τεχνολογίας LED. Αν και είναι αρκετά καινούργια, έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία σε διάφορες πόλεις της Ευρώπης όπως η Μασσαλία, το Ρότερνταμ, η Φλωρεντία και το Βαλαντολίντ ([50], [131]).

Όλα τα φωτιστικά SpeedStar και CitySoul LED λειτουργούν με τροφοδοσία 220-240V AC (50-60Hz). Τα μοντέλα της κάθε σειράς περιλαμβάνουν διάφορες εκδόσεις ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των LED, την κατανομή της φωτεινής ροής, την ηλεκτρική κατανάλωση κλπ ([132], [52]). Αφού εξετάστηκαν αρκετές εναλλακτικές λύσεις,

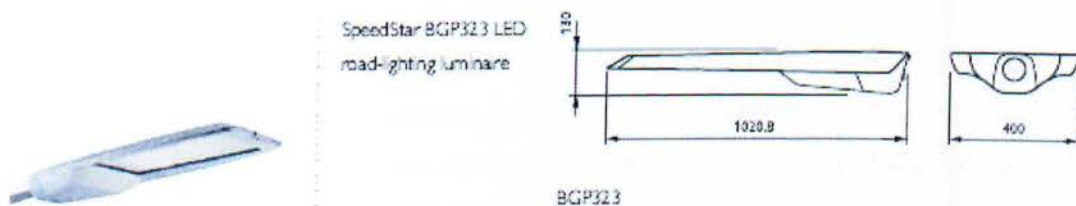
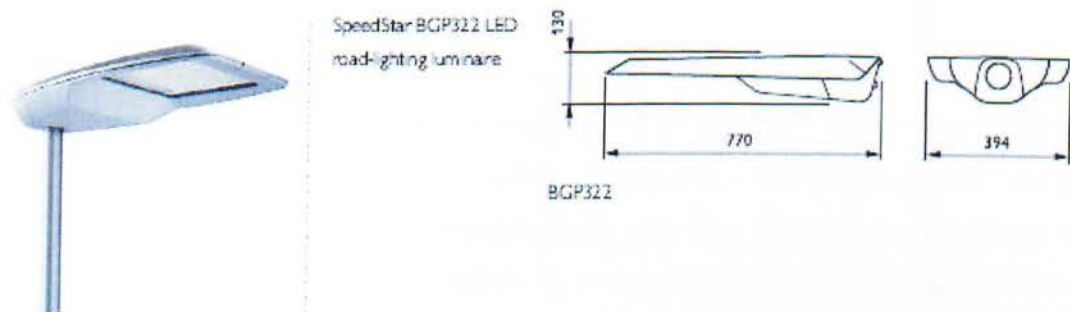
βρέθηκε ότι μια καλή επιλογή για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι το μοντέλο SpeedStar BGP322 48×GRN-1S/740 DM που έχει 48 LED και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να εξασφαλίζει βέλτιστη ενεργειακή απόδοση<sup>1</sup>. Στις επόμενες ενότητες 5.2-5.6 περιγράφεται αναλυτικά η μελέτη μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης για ένα σύστημα οδικού φωτισμού βασισμένο στο παραπάνω φωτιστικό. Για λόγους σύγκρισης έχουν συμπεριληφθεί στη μελέτη και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί για δύο άλλα μοντέλα, τα CitySoul LED BGP 431 με 84 LED και Mini CitySoul LED BGP 430 με 56 LED. Και τα τρία αυτά μοντέλα είναι κατάλληλα κυρίως για εφαρμογές οδικού φωτισμού με σχετικά μέτριες απαιτήσεις (π.χ. συνοικιακοί δρόμοι). Προκειμένου να γίνει μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη του όλου θέματος, έγιναν υπολογισμοί και για το πολύ ισχυρότερο SpeedStar BGP323 160×GRN-1S/740 DM με 160 LED, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και σε δρόμους υψηλής ταχύτητας. Όπως θα δούμε, στην περίπτωση τέτοιων μεγάλης ισχύος φωτιστικών, η λύση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος παρουσιάζει αρκετά προβλήματα και για το λόγο αυτό είναι προτιμότερος ένας συνδυασμός φωτοβολταϊκής ενέργειας και τροφοδοσίας από το δίκτυο της ΔΕΗ (διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα).

Η μορφή και οι διαστάσεις των παραπάνω φωτιστικών φαίνονται στα σχήματα 5.1 - 5.3 ([53], [54]) ενώ στον πίνακα 5.1 δίνεται η φωτεινή ροή (σε lm) και η ηλεκτρική κατανάλωση καθενός από αυτά. Οι τιμές αυτές πάρθηκαν από το πρόγραμμα Dialux, με το οποίο έγιναν όλοι οι φωτοτεχνικοί υπολογισμοί της παρούσας εργασίας (βλ. κεφ. 6) καθώς και από τα τεχνικά φυλλάδια ([52], [53], [132]-[134]) και τον κατάλογο προϊόντων ([54]) της κατασκευάστριας εταιρείας

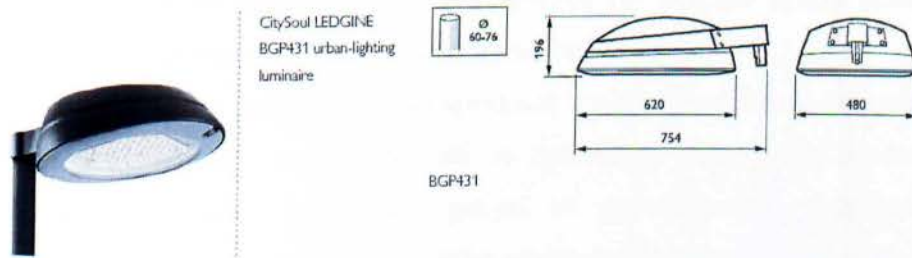
Πίνακας 5.1: Φωτεινή ροή και ηλεκτρική κατανάλωση των χρησιμοποιούμενων φωτιστικών

Μοντέλο	Φωτεινή ροή (lm)	Ηλεκτρική κατανάλωση (W)
BGP 322 (48 LED)	5040	57
BGP 431 (84 LED)	8820	106
BGP 430 (56 LED)	5880	73
BGP 323 (160 LED)	16800	192

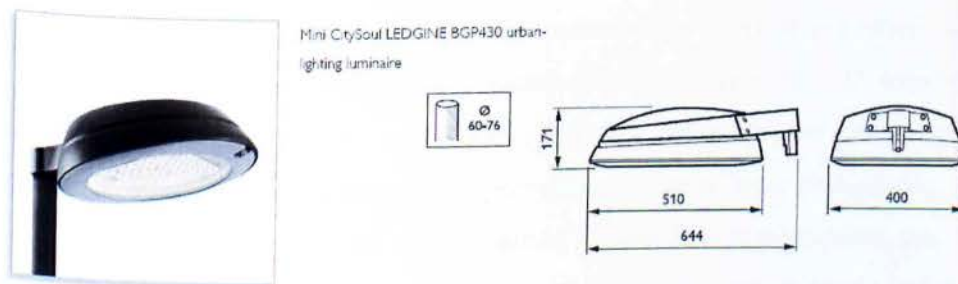
<sup>1</sup> Αυτό δηλώνει ο κωδικός GRN (“GreenLine”) στο όνομα του μοντέλου. Άλλες δυνατές επιλογές θα ήταν CFT (“Comfort Line”) για πιο άνετο φωτισμό ή ECO (“Economy Line”) για μικρότερο κόστος αγοράς. Επειδή στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα η διαθέσιμη από τον ήλιο ενέργεια είναι γενικά περιορισμένη, προτιμήθηκε η λύση που μας παρέχει τα περισσότερα lm ανά Watt.



Σχήμα 5.1: Τα φωτιστικά δρόμων SpeedStar BGP 322 και BGP 323



Σχήμα 5.2: Το φωτιστικό CitySoul LED BGP431



Σχήμα 5.3: Το φωτιστικό Mini CitySoul LED BGP430

## 5.2 Υπολογισμοί ηλιακής ακτινοβολίας

Μια βασική παράμετρος για το σχεδιασμό ενός οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το ποσό ενέργειας που μπορεί κανείς να πάρει από την ηλιακή ακτινοβολία στον τόπο εγκατάστασης του συγκεκριμένου συστήματος. Από το ποσό αυτό και την απόδοση των χρησιμοποιούμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων υπολογίζεται ο αριθμός των πλαισίων που απαιτείται για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες της εφαρμογής και η συνολική επιφάνεια που τα πλαίσια αυτά καταλαμβάνουν. Αν δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, η επιφάνεια αυτή μπορεί να προσδιοριστεί χονδρικά από απλούς εμπειρικούς κανόνες, που χρησιμοποιούνται συχνά από τους επαγγελματίες του χώρου (βλ. π.χ. τις ιστοσελίδες ([57], [58])). Στην παρούσα όμως εργασία προτιμήθηκε να γίνει ένας πιο ακριβής υπολογισμός, ώστε να πάρουμε μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για τις πραγματικές ανάγκες και τα προβλήματα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος οδικού φωτισμού.

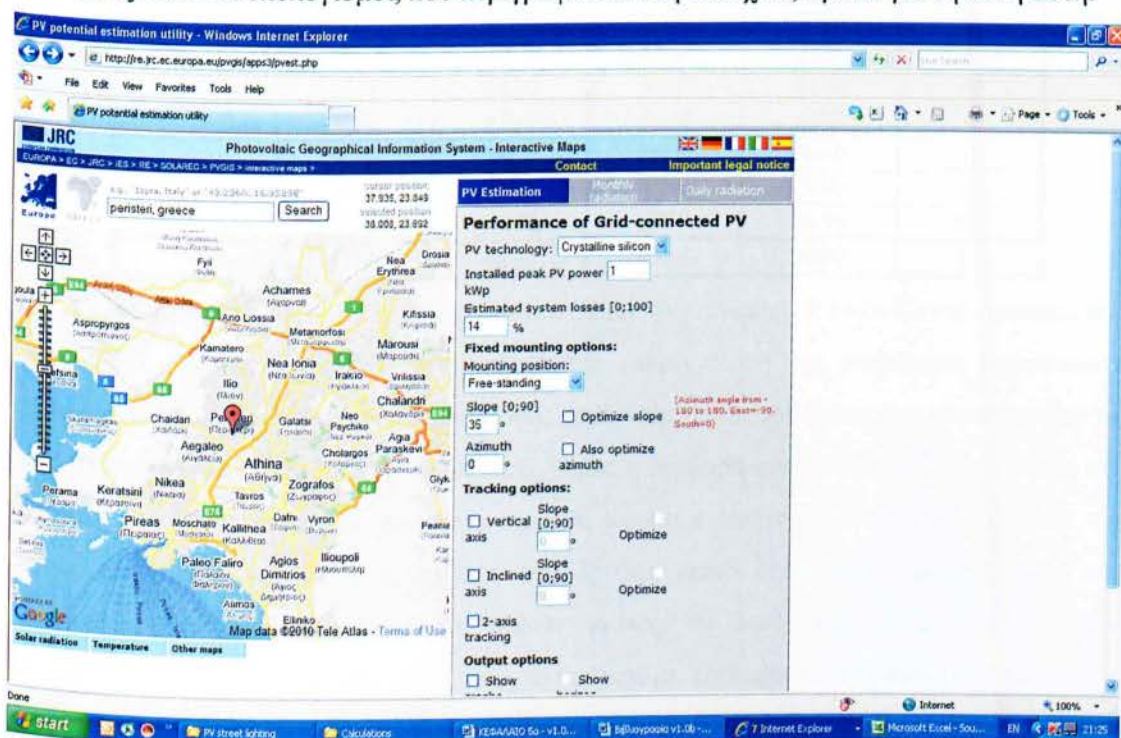
Ένας τρόπος για να προσδιοριστεί η ενέργεια που απορροφούν οι ηλιακές κυψέλες είναι να χρησιμοποιηθούν πίνακες με μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο συγκεκριμένο τόπο και μαθηματικοί τύποι που υπολογίζουν την ενέργεια ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μια τέτοια μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί π.χ. στην εργασία ([55]). Επειδή όμως στην παρούσα εργασία δεν υπήρχαν άμεσα διαθέσιμοι τέτοιοι πίνακες, αναζητήθηκαν εναλλακτικές λύσεις στο διαδίκτυο.

Η καλύτερη λύση που βρέθηκε ήταν το λογισμικό PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), που έχει αναπτυχθεί από το ερευνητικό κέντρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης JRC (Joint Research Center) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεύθερα από οποιονδήποτε μέσω της ιστοσελίδας <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php>. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα σε συνδυασμό με γεωγραφικές πληροφορίες και μετεωρολογικά δεδομένα των τελευταίων ετών για να υπολογίζει την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια ( $W/m^2$ ) για οποιονδήποτε τόπο, χρονική στιγμή, κλίση και προσανατολισμό. Ο ακριβής τρόπος υπολογισμού περιγράφεται στην ιστοσελίδα ([56]). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται κατά καιρούς με πραγματικές μετρήσεις και οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι μικρές.

Η κεντρική ιστοσελίδα του προγράμματος (σχήμα 5.4) περιλαμβάνει μια σειρά από εργαλεία που επιτρέπουν στους χρήστες να κάνουν διάφορους υπολογισμούς χρήσιμους στις μελέτες φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο από τα εργαλεία αυτά. Το πρώτο εργαλείο υπολογίζει την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) ανά 15 min για μια τυπική μέρα κάποιου μήνα που επιλέγει ο

χρήστης. Ο προσανατολισμός και η κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης μπορούν να επιλεγούν ελεύθερα από το χρήστη. Το δεύτερο εργαλείο ολοκληρώνει τις τιμές ισχύος και υπολογίζει την πυκνότητα της συνολικής ενέργειας ( $\text{Wh/m}^2$ ) που δέχεται ανά ημέρα, κατά μέσο όρο, μια επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό, για το μήνα που επιλέγει ο χρήστης. Η κλίση της επιφάνειας μπορεί και πάλι να επιλεγεί ελεύθερα. Επιπλέον το εργαλείο μπορεί να μας βρεί τη βέλτιστη κλίση της επιφάνειας (δηλαδή εκείνη που δέχεται την περισσότερη ακτινοβολία) ανά μήνα και συνολικά για το έτος.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα θα τοποθετηθεί κοντά στην Αθήνα και συγκεκριμένα στο Περιστερί. Δίνοντας στο πρόγραμμα το όνομα της περιοχής (Περιστερί), βρήκε από τη βάση δεδομένων του τις συντεταγμένες  $38^{\circ}0'27''$  βόρεια,  $23^{\circ}41'29''$  ανατολικά και 58 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Όλοι οι υπολογισμοί, που περιγράφονται στη συνέχεια, έγιναν για τη θέση αυτή.



Σχήμα 5.4: Η ιστοσελίδα του προγράμματος PVGIS

Στον πίνακα 5.2 φαίνονται οι ημερήσιες τιμές πυκνότητας ενέργειας ( $\text{Wh/m}^2$ ) και η βέλτιστη κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης που υπολόγισε το πρόγραμμα για κάθε μήνα ξεχωριστά και συνολικά για το έτος. Όλες οι τιμές του πίνακα αφορούν νότιο προσανατολισμό της επιφάνειας πρόσπτωσης, όπως απαιτεί το εργαλείο υπολογισμού<sup>2</sup>. Στην πρώτη στήλη του πίνακα ( $H_h$ ), αναγράφονται οι τιμές της πυκνότητας ενέργειας για οριζόντια

<sup>2</sup> Παρακάτω θα παραθέσουμε υπολογισμούς, που επιβεβαιώνουν ότι πράγματι ο προσανατολισμός αυτός δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

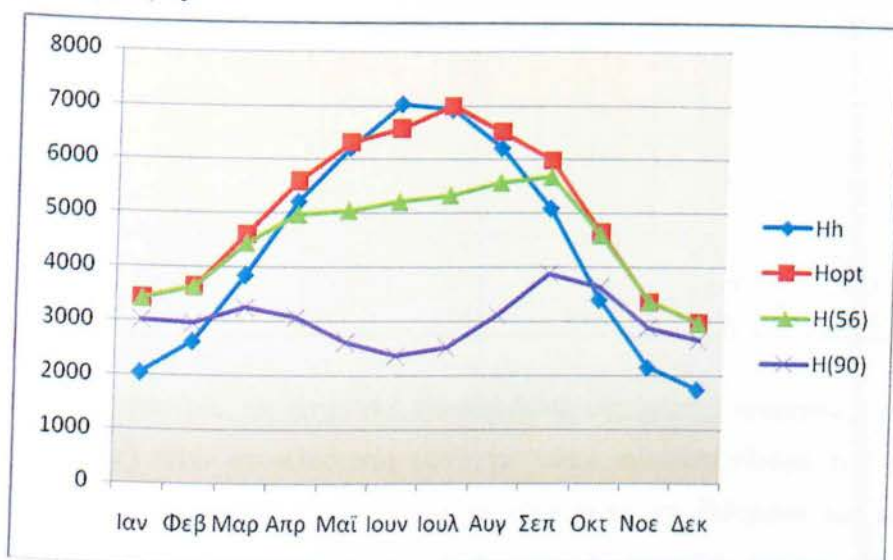
επιφάνεια πρόσπτωσης (κλίση  $0^\circ$ ). Στη δεύτερη στήλη ( $H_{opt}$ ) αναγράφονται οι τιμές που αντιστοιχούν στη βέλτιστη κλίση του κάθε μήνα, η οποία αναφέρεται στην τελευταία στήλη ( $I_{opt}$ ). Στην τρίτη στήλη, φαίνονται οι τιμές της πυκνότητας ενέργειας για κλίση  $56^\circ$ , που είναι ο μέσος όρος των τιμών βέλτιστης κλίσης κατά τους μήνες χαμηλής ηλιοφάνειας (Νοέμβριο έως Φεβρουάριο). Τέλος, στην τέταρτη στήλη, έχουν υπολογιστεί για λόγους σύγκρισης οι τιμές της πυκνότητας ενέργειας για κατακόρυφη επιφάνεια πρόσπτωσης (κλίση  $90^\circ$ ).

Πίνακας 5.2: Μηνιαίες και ετήσιες μέσες τιμές της ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας ( $Wh/m^2$ ) και βέλτιστη κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης για το Περιστερί

	$H_h$	$H_{opt}$	$H(56)$	$H(90)$	$I_{opt}$
Ιαν	2050	3420	3420	3010	59
Φεβ	2630	3640	3630	2960	50
Μαρ	3860	4610	4450	3250	39
Απρ	5220	5600	4980	3070	25
Μαΐ	6220	6320	5050	2610	13
Ιουν	7030	6580	5220	2360	6
Ιουλ	6930	6990	5340	2520	9
Αυγ	6220	6520	5580	3130	20
Σεπ	5100	5990	5690	3890	36
Οκτ	3410	4640	4600	3640	48
Νοε	2160	3360	3360	2890	56
Δεκ	1750	2970	2970	2650	60
<b>Έτος</b>	<b>4390</b>	<b>4890</b>	<b>4530</b>	<b>3000</b>	<b>31</b>

Τα δεδομένα των τεσσάρων πρώτων στηλών του πίνακα 5.2 εικονίζονται γραφικά στο σχήμα 5.5. Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιώντας μικρή κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης παίρνουμε πολύ περισσότερη ενέργεια, ιδίως κατά τους μήνες του έτους που χαρακτηρίζονται από έντονη ηλιοφάνεια (άνοιξη, καλοκαίρι). Όμως η διαφορά ανάμεσα στην ελάχιστη και στη μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορούμε να πάρουμε ανά ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους είναι πολύ μεγάλη (της τάξεως του 350%). Αυτό δημιουργεί μια δυσκολία στο σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς, αν θελήσουμε να εκμεταλλευτούμε πλήρως τα ποσά ενέργειας που παίρνουμε το καλοκαίρι, τότε, για να τροφοδοτήσουμε τα ίδια φορτία το χειμώνα, θα χρειαστούμε εφεδρική πηγή (π.χ. ανεμογεννήτρια ή σύνδεση με το δίκτυο της ΔΕΗ). Από την άλλη μεριά, αν θελήσουμε να έχουμε πλήρη αυτονομία, τότε θα πρέπει να τοποθετήσουμε αρκετά φωτοβολταϊκά πλαίσια ώστε να μπορούν να καλυφθούν πλήρως οι ενεργειακές ανάγκες των φορτίων κατά τους μήνες με τη μικρότερη ηλιοφάνεια. Αυτό όμως σημαίνει ότι κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου θα εκμεταλλευόμαστε ένα μικρό μόνο μέρος από την ενέργεια που μπορούν να μας δώσουν τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Για μεγάλες κλίσεις της επιφάνειας πρόσπτωσης, τα ημερήσια ποσά ενέργειας που παίρνουμε κατά τη διάρκεια του έτους παρουσιάζουν πολύ μικρότερες

διακυμάνσεις από μήνα σε μήνα. Όμως, στην περίπτωση αυτή, τους περισσότερους μήνες του χρόνου παίρνουμε πολύ λιγότερη ενέργεια από όση θα παίρναμε με μικρή κλίση. Μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες οι μεγάλες κλίσεις της επιφάνειας πρόσπτωσης δίνουν περισσότερη ενέργεια από τις μικρές.



Σχήμα 5.5: Γραφική απεικόνιση των δεδομένων του πίνακα 5.2

Στον πίνακα 5.3 γίνεται σύγκριση διαφορετικών κλίσεων και προσανατολισμών τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών επιφανειών. Συγκεκριμένα εμφανίζονται οι ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ενέργειας ( $\text{Wh/m}^2$ ) για κάθε μήνα, για τους προσανατολισμούς  $0^\circ$  (νότια - S),  $-45^\circ$  (νοτιοανατολικά - SE) και  $+45^\circ$  (νοτιοδυτικά - SW) και για τις κλίσεις  $90^\circ$  (κατακόρυφα, μια αντιπροσωπευτική περίπτωση μεγάλης κλίσης) και  $56^\circ$  (μια περίπτωση μεσαίας κλίσης που, όπως είδαμε προηγουμένως, είναι η βέλτιστη κλίση των χειμερινών μηνών για τοποθέτηση με νότιο προσανατολισμό). Τα αποτελέσματα παριστάνονται και γραφικά στο σχήμα 5.6. Συγκρίνοντας με τον πίνακα 5.2 και το σχ. 5.5 βλέπουμε ότι γενικά την περισσότερη ενέργεια δέχονται επιφάνειες με μικρή κλίση και νότιο προσανατολισμό. Αν όμως τοποθετήσουμε τα φωτοβολταϊκά με μεγάλη κλίση, τότε ο νοτιοανατολικός ή ο νοτιοδυτικός προσανατολισμός μας δίνουν λίγο καλύτερα αποτελέσματα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι στον πίνακα 5.3 και στο σχ. 5.6 ο νοτιοανατολικός και ο νοτιοδυτικός προσανατολισμός δίνουν τα ίδια νούμερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι νοτιοανατολικές επιφάνειες δέχονται περισσότερο ήλιο το πρωί ενώ οι νοτιοδυτικές το απόγευμα, με αποτέλεσμα η συνολική πρόσληψη ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας να είναι περίπου η ίδια.



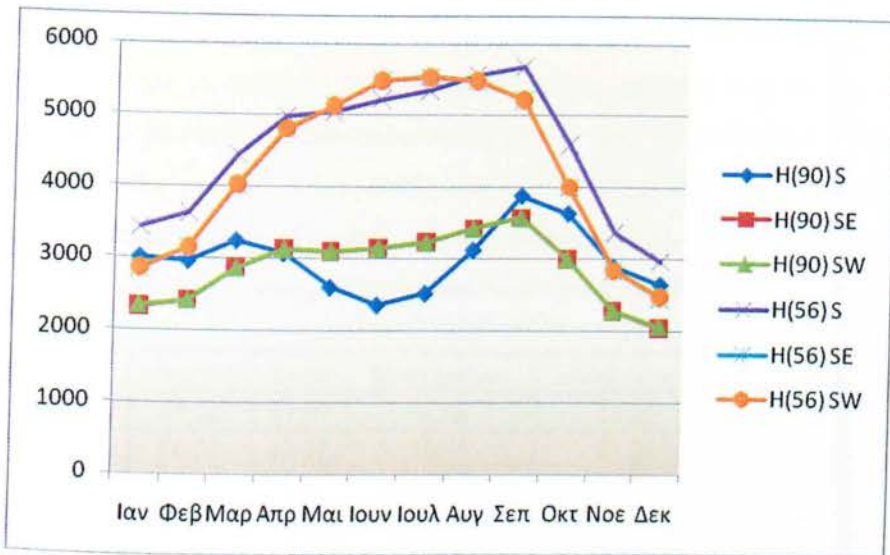
Πίνακας 5.3: Ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ενέργειας ( $Wh/m^2$ ) για διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς

	$H(90) S$	$H(90) SE$	$H(90) SW$	$H(56) S$	$H(56) SE$	$H(56) SW$
Ιαν	3012	2330	2348	3424	2844	2858
Φεβ	2964	2417	2417	3629	3145	3145
Μαρ	3247	2869	2869	4445	4034	4034
Απρ	3071	3135	3135	4984	4805	4805
Μαι	2604	3100	3100	5046	5136	5136
Ιουν	2362	3147	3147	5222	5487	5487
Ιουλ	2522	3230	3224	5344	5544	5539
Αυγ	3125	3424	3424	5576	5482	5482
Σεπ	3886	3574	3574	5687	5215	5215
Οκτ	3637	2997	2997	4599	4004	4004
Νοε	2891	2277	2277	3359	2838	2838
Δεκ	2650	2043	2065	2967	2460	2478

Όπως αναφέραμε, το εργαλείο υπολογισμού της μέσης ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας ( $Wh/m^2$ ) δίνει αποτελέσματα μόνο για νότιο προσανατολισμό της επιφάνειας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό, τα δεδομένα του πίνακα 5.3 υπολογίστηκαν προσεγγιστικά από τις τιμές της πυκνότητας ισχύος ( $W/m^2$ ) ανά δεκαπεντάλεπτο για μια τυπική μέρα του κάθε μήνα. Οι τιμές αυτές πάρθηκαν χρησιμοποιώντας το πρώτο από τα προαναφερθέντα εργαλεία του προγράμματος PVGIS. Πιο συγκεκριμένα, η πυκνότητα ενέργειας για μια ημέρα υπολογίστηκε από τον τύπο

$$H = (G_1 + G_2 + \dots + G_N) \cdot t$$

όπου  $G_1, G_2, \dots, G_N$  είναι οι τιμές της πυκνότητας ισχύος ανά δεκαπεντάλεπτο σε  $W/m^2$ , όπως δίνονται από το εργαλείο του PVGIS και  $t=0.25h$  (ο χρόνος των 15min εκφρασμένος σε ώρες). Οι πλήρεις πίνακες με τις τιμές της πυκνότητας ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στο παράρτημα 1.



Σχήμα 5.6: Γραφική απεικόνιση των δεδομένων του πίνακα 5.3

### 5.3 Προσδιορισμός ενεργειακών αναγκών

Οι ενεργειακές ανάγκες της εφαρμογής που εξετάζονται στην παρούσα εργασία εξαρτώνται από το πόση ισχύ καταναλώνουν τα φώτα που θα χρησιμοποιήσουμε και πόση ώρα θέλουμε να είναι αναμένα. Η ηλεκτρική κατανάλωση καθεμιάς από τις λάμπες που μας ενδιαφέρουν δίνεται στον πίνακα 5.1. Όσο για το χρόνο λειτουργίας, θεωρήσαμε ότι τα φώτα θα ανάβουν μισή ώρα μετά τη δύση του ήλιου και θα σβήνουν μισή ώρα πριν την ανατολή. Επομένως ο χρόνος λειτουργίας τους σε κάθε εικοσιτετράωρο θα είναι κατά μία ώρα λιγότερος από τη συνολική διάρκεια της νύχτας.

Η ώρα που ανατέλλει και δύει ο ήλιος κάθε μέρα μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας ένα σχετικά απλό αλγόριθμο ([59]). Στην παρούσα όμως εργασία μας αρκούσε να γνωρίζουμε ένα αντιπροσωπευτικό νούμερο για τη διάρκεια της νύχτας κάθε μήνα<sup>3</sup>. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν κάποιες προσεγγιστικές ώρες ανατολής και δύσης του ήλιου, που πάρθηκαν από τις τιμές ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ανά δεκαπεντάλεπτο για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα όπως τις υπολογίζει το πρόγραμμα PVGIS (βλ. πίνακες Α1 έως Α6 στο παράρτημα 1). Πιο συγκεκριμένα, ως αντιπροσωπευτική ώρα ανατολής του ήλιου κάθε μήνα θεωρήθηκε η χρονική στιγμή λήξης του τελευταίου δεκαπενταλέπτου, για το οποίο το πρόγραμμα μας δίνει μηδενική τιμή ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίστοιχα, ως

<sup>3</sup> Υπενθυμίζεται ότι τα στοιχεία που έχουμε για την ηλιακή ακτινοβολία αφορούν το ποσό ενέργειας που πέφτει σε μια επιφάνεια σε μια αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα. Επομένως αυτό που χρειαζόμαστε είναι ένα αντίστοιχο αντιπροσωπευτικό νούμερο για τις ενεργειακές ανάγκες της εφαρμογής ανά εικοσιτετράωρο κάθε μήνα, ώστε να δούμε πώς μπορούμε να τις καλύψουμε με τη διαθέσιμη ενέργεια.

αντιπροσωπευτική ώρα δύσης του ήλιου θεωρήθηκε η χρονική στιγμή λήξης του πρώτου δεκαπενταλέπτου, για το οποίο το πρόγραμμα μας δίνει μηδενική τιμή ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Με βάση τις αντιπροσωπευτικές αυτές τιμές υπολογίστηκε η διάρκεια της μέρας και της νύχτας για κάθε μήνα, καθώς και οι αντίστοιχες ώρες λειτουργίας του οδικού φωτισμού ανά εικοσιτετράωρο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Υπολογισμός χρόνου λειτουργίας φωτιστικών (σε h) ανά εικοσιτετράωρο για μια τυπική μέρα του κάθε μήνα

	Ανατολή	Δύση	Ώρες ημέρας	Ώρες νύχτας	Ώρες λειτ. φωτ.
Ιαν	07:22	17:07	9.75	14.25	13.25
Φεβ	06:52	17:37	10.75	13.25	12.25
Μαρ	06:07	18:22	12.25	11.75	10.75
Απρ	05:37	18:52	13.25	10.75	9.75
Μαι	05:07	19:22	14.25	9.75	8.75
Ιουν	04:52	19:37	14.75	9.25	8.25
Ιουλ	04:52	19:37	14.75	9.25	8.25
Αυγ	05:22	19:07	13.75	10.25	9.25
Σεπτ	05:52	18:37	12.75	11.25	10.25
Οκτ	06:37	17:52	11.25	12.75	11.75
Νοε	07:07	17:22	10.25	13.75	12.75
Δεκ	07:22	17:07	9.75	14.25	13.25

Πολλαπλασιάζοντας τις ώρες λειτουργίας που φαίνονται στον πίνακα 5.4 με την ισχύ της αντίστοιχης λάμπας (πίνακας 5.1) μπορούμε να βρούμε την ενεργειακή κατανάλωση (Wh) ανά εικοσιτετράωρο για καθένα από τα 4 φωτιστικά που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.1. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Αντιπροσωπευτικές τιμές της ανά εικοσιτετράωρο κατανάλωσης ενέργειας (Wh) κάθε φωτιστικού για κάθε μήνα του έτους

	BGP 322 48 x LED	BGP431 84 x LED	BGP 430 56 x LED	BGP 323 160 x LED
Ιαν	755.25	1404.5	967.25	2544
Φεβ	698.25	1298.5	894.25	2352
Μαρ	612.75	1139.5	784.75	2064
Απρ	555.75	1033.5	711.75	1872
Μαι	498.75	927.5	638.75	1680
Ιουν	470.25	874.5	602.25	1584
Ιουλ	470.25	874.5	602.25	1584
Αυγ	527.25	980.5	675.25	1776
Σεπτ	584.25	1086.5	748.25	1968
Οκτ	669.75	1245.5	857.75	2256
Νοε	726.75	1351.5	930.75	2448
Δεκ	755.25	1404.5	967.25	2544

## 5.4 Υπολογισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στην ενότητα αυτή υπολογίζουμε τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτούνται για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του κάθε φωτιστικού, όπως αυτές προσδιορίστηκαν στον πίνακα 5.5. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τα ημερήσια ποσά ενέργειας ανά  $m^2$  που υπολογίσαμε στην ενότητα 5.3 και την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όπως αυτή δίνεται από τους κατασκευαστές. Πολλαπλασιάζοντας τις δύο αυτές τιμές μπορούμε να βρούμε πόση ηλεκτρική ενέργεια μας δίνει 1  $m^2$  φωτοβολταϊκού πλαισίου ανά ημέρα, για κάθε μήνα του έτους. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις καταναλώσεις των φωτιστικών από τον πίνακα 5.5, μπορούμε να βρούμε με μια απλή διαίρεση πόσα  $m^2$  χρειαζόμαστε για να καλύψουμε τις ανάγκες του κάθε φωτιστικού για ένα εικοσιτετράωρο κάθε μήνα. Τέλος, γνωρίζοντας τις διαστάσεις του κάθε πλαισίου από τα φυλλάδια των κατασκευαστών, μπορούμε να βρούμε σε πόσα πλαίσια αντιστοιχούν αυτά τα  $m^2$ .

Είναι προφανές ότι η παραπάνω μεθοδολογία προϋποθέτει να έχουμε επιλέξει το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, που θα χρησιμοποιήσουμε. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μια έρευνα στο διαδίκτυο και συγκεντρώθηκαν φυλλάδια με τεχνικά χαρακτηριστικά από διάφορους κατασκευαστές. Μελετώντας τα φυλλάδια αυτά διαπιστώθηκε ότι η σύγκριση των διαφόρων πλαισίων δεν είναι εύκολη υπόθεση. Πρώτον διότι χρειάζεται να λάβουμε υπόψη περισσότερες από μια παραμέτρους και δεύτερον διότι πολλές φορές οι τιμές που δίνουν διαφορετικοί κατασκευαστές δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες μεταξύ τους καθώς αφορούν διαφορετικές συνθήκες ([106]).

Η απόδοση των πλαισίων, δηλαδή το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, είναι οπωσδήποτε ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του φωτοβολταϊκού συστήματος. Δεν είναι όμως το μόνο, καθώς η υψηλή απόδοση δεν αποτελεί πάντα την καλύτερη επιλογή ([40], [107]). Για παράδειγμα, η τιμή των φωτοβολταϊκών αυξάνει σημαντικά με την απόδοση. Αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε πλαίσια με τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση τότε το κόστος αγοράς του συστήματος ενδέχεται να είναι υπερβολικά μεγάλο σε σχέση με τα οφέλη που αναμένεται να έχουμε από τη χρήση του. Αντίθετα, αν δεχτούμε να χρησιμοποιήσουμε πλαίσια με λίγο χαμηλότερη απόδοση τότε μπορεί να βρούμε κάποια πιο οικονομική λύση, που να καθιστά την όλη επένδυση πολύ πιο συμφέρουσα. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα πρέπει να γίνεται μετά από προσεκτική μελέτη που θα λαμβάνει υπόψη τις συνολικές ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής.

φωτοβολταϊκού<sup>4</sup> και αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή της αγοράς ([40]). Με τα σημερινά δεδομένα της αγοράς, το κόστος αυτό είναι γύρω στα 4 ευρώ/Wp ανάλογα με την ποσότητα, τη μάρκα και τον προμηθευτή. Επειδή όμως το κόστος αυτό μειώνεται σημαντικά όταν πρόκειται για μεγάλες ποσότητες ([109]), θεωρήσαμε ως ρεαλιστική τιμή για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας τα 2.5 ευρώ/Wp κατά μέσο όρο.

(γ) **Διαστάσεις:** Όπως προαναφέραμε, οι ενεργειακές ανάγκες της εφαρμογής σε συνδυασμό με την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μας προσδιορίζουν τη συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών που θα χρειαστούμε. Φυσικά, η επιφάνεια που τελικά θα εγκαταστήσουμε θα είναι μεγαλύτερη, αφού θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ακέραιο αριθμό πλαισίων (π.χ αν βρούμε ότι χρειαζόμαστε  $2.5 \text{ m}^2$  και κάθε πλαίσιο έχει επιφάνεια  $1.5 \text{ m}^2$ , θα αναγκαστούμε να τοποθετήσουμε 2 πλαίσια, δηλαδή  $0.5 \text{ m}^2$  περισσότερο από όσο χρειαζόμαστε). Για να αποφευχθεί η τοποθέτηση περιττών κυψελών και η δέσμευση του αντίστοιχου χώρου (με ό,τι κόστος αυτά συνεπάγονται) θα πρέπει οι διαστάσεις των πλαισίων να επιλεγούν έτσι ώστε η παραπάνω επιφάνεια να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

Στο παράρτημα 2 παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες, που δείχνουν την απόδοση, την ισχύ και τις διαστάσεις για διάφορα αντιπροσωπευτικά μοντέλα φωτοβολταϊκών πλαισίων που κυκλοφορούν στην αγορά. Παρατηρώντας τους πίνακες διαπιστώνουμε ότι (α) για πλαίσια της ίδιας τεχνολογίας (ίδιος κατασκευαστής και ίδια σειρά μοντέλων) η απόδοση αυξάνει με την ισχύ (άρα και με το κόστος) και (β) τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια έχουν γενικά λίγο καλύτερη απόδοση από τα πολυκρυσταλλικά. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας επιλέξαμε να μελετήσουμε το μοντέλο με την υψηλότερη απόδοση από κάθε κατασκευαστή. Τα μοντέλα αυτά είναι το NU-185 της Sharp (απόδοση 14.1%), το P185M της Conergy (απόδοση 14.5%) και το μοντέλο 185 Wp από τη σειρά SF 160-24M της Solarfun (απόδοση 14.7%). Αξίζει να σημειωθεί ότι και τα τρία μοντέλα είναι μονοκρυσταλλικά και έχουν την ίδια ισχύ 185 Wp (άρα και το ίδιο ενδεικτικό κόστος πλαισίου  $2.5 \times 185 = 462.5$  Ευρώ).

Για να βρούμε την ηλεκτρική ενέργεια που θα πάρουμε από ένα  $\text{m}^2$  φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ένα εικοσιτετράωρο πολλαπλασιάζουμε την ενέργεια ανά  $\text{m}^2$  της ηλιακής ακτινοβολίας επί την απόδοση του πλαισίου. Το αποτέλεσμα για τα τρία μοντέλα που προαναφέραμε δίνεται στον πίνακα 5.6, όπου οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας αντιστοιχούν σε κλίση πλαισίου  $56^\circ$  και νότιο προσανατολισμό.

<sup>4</sup> Η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού εκφράζεται συνήθως σε Wp (Watt peak) και δηλώνει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ (σε Watt) που μπορεί να δώσει το φωτοβολταϊκό όταν λειτουργεί σε συγκεκριμένες πρότυπες συνθήκες.

Πίνακας 5.6: Ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που παίρνουμε από ένα  $m^2$  φωτοβολταϊκού πλαισίου. Οι τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας έχουν παρθεί από τον πίνακα 5.2

Μήνας	Ηλιακή Ενέργεια (Wh/m <sup>2</sup> )	Ηλεκτρική ενέργεια (Wh/m <sup>2</sup> )		
		Sharp NU-185	Conergy P185M	Solarfun SF 160-24M
Ιαν	3420	482.22	495.90	502.74
Φεβ	3630	511.83	526.35	533.61
Μαρ	4450	627.45	645.25	654.15
Απρ	4980	702.18	722.10	732.06
Μαϊ	5050	712.05	732.25	742.35
Ιουν	5220	736.02	756.90	767.34
Ιουλ	5340	752.94	774.30	784.98
Αυγ	5580	786.78	809.10	820.26
Σεπ	5690	802.29	825.05	836.43
Οκτ	4600	648.60	667.00	676.20
Νοε	3360	473.76	487.20	493.92
Δεκ	2970	418.77	430.65	436.59

Πίνακας 5.7: Διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια (Wh) ανά  $m^2$  φωτοβολταϊκού πλαισίου μετά την αφαίρεση των απωλειών

Μήνας	Ηλεκτρική ενέργεια (Wh/m <sup>2</sup> ) μετά την αφαίρεση των απωλειών		
	Sharp NU-185	Conergy P185M	Solarfun SF 160-24M
Ιαν	368.90	379.36	384.60
Φεβ	391.55	402.66	408.21
Μαρ	480.00	493.62	500.42
Απρ	537.17	552.41	560.03
Μαϊ	544.72	560.17	567.90
Ιουν	563.06	579.03	587.02
Ιουλ	576.00	592.34	600.51
Αυγ	601.89	618.96	627.50
Σεπ	613.75	631.16	639.87
Οκτ	496.18	510.26	517.29
Νοε	362.43	372.71	377.85
Δεκ	320.36	329.45	333.99

Η ενέργεια όμως αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρη για φωτισμό καθώς υπάρχουν οι απώλειες φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών και οι απώλειες του inverter που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Οι απώλειες φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών είναι της τάξης του 15% ενώ ο συντελεστής απόδοσης ενός συνηθισμένου

inverter είναι της τάξης του 90% ([61]). Επομένως για να λάβουμε υπόψη όλες τις απώλειες θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε τις τιμές ενέργειας του πίνακα 5.6 επί  $0.85 \cdot 0.9 = 0.765$ . Το αποτέλεσμα δίνεται στον πίνακα 5.7. Στη συνέχεια, διαιρώντας τις Wh που καταναλώνει ανά εικοσιτετράωρο το κάθε φωτιστικό (πίνακας 5.5) με τις τιμές του πίνακα 5.7 μπορούμε να βρούμε πόσα  $m^2$  φωτοβολταϊκού πλαισίου χρειαζόμαστε για να καλύψουμε τις ημερήσιες ανάγκες του κάθε φωτιστικού ανά μήνα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στον πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8: Απαιτούμενα  $m^2$  φωτοβολταϊκού πλαισίου για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κάθε φωτιστικού ανά μήνα

	<b>BGP322</b> 48 x LED			<b>BGP431</b> 84 x LED		
	Sharp	Conergy	Solarfun	Sharp	Conergy	Solarfun
Ιαν	2.05	1.99	1.96	3.81	3.70	3.65
Φεβ	1.78	1.73	1.71	3.32	3.22	3.18
Μαρ	1.28	1.24	1.22	2.37	2.31	2.28
Απρ	1.03	1.01	0.99	1.92	1.87	1.85
Μαι	0.92	0.89	0.88	1.70	1.66	1.63
Ιουν	0.84	0.81	0.80	1.55	1.51	1.49
Ιουλ	0.82	0.79	0.78	1.52	1.48	1.46
Αυγ	0.88	0.85	0.84	1.63	1.58	1.56
Σεπτ	0.95	0.93	0.91	1.77	1.72	1.70
Οκτ	1.35	1.31	1.29	2.51	2.44	2.41
Νοε	2.01	1.95	1.92	3.73	3.63	3.58
Δεκ	2.36	2.29	2.26	4.38	4.26	4.21

	<b>BGP430</b> 56 x LED			<b>BGP323</b> 160 x LED		
	Sharp	Conergy	Solarfun	Sharp	Conergy	Solarfun
Ιαν	2.62	2.55	2.51	6.90	6.71	6.61
Φεβ	2.28	2.22	2.19	6.01	5.84	5.76
Μαρ	1.63	1.59	1.57	4.30	4.18	4.12
Απρ	1.33	1.29	1.27	3.48	3.39	3.34
Μαι	1.17	1.14	1.12	3.08	3.00	2.96
Ιουν	1.07	1.04	1.03	2.81	2.74	2.70
Ιουλ	1.05	1.02	1.00	2.75	2.67	2.64
Αυγ	1.12	1.09	1.08	2.95	2.87	2.83
Σεπτ	1.22	1.19	1.17	3.21	3.12	3.08
Οκτ	1.73	1.68	1.66	4.55	4.42	4.36
Νοε	2.57	2.50	2.46	6.75	6.57	6.48
Δεκ	3.02	2.94	2.90	7.94	7.72	7.62

Τέλος, διαιρώντας τις τιμές απαιτούμενης επιφάνειας από τον πίνακα 5.8 με το εμβαδό του κάθε πλαισίου ( $1.31 m^2$  για το μοντέλο της Sharp και  $1.28 m^2$  για τα μοντέλα της Conergy και

της Solarfun) βρίσκουμε τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτείται για να καλυφθούν πλήρως οι ανάγκες του κάθε φωτιστικού ανά μήνα (πίνακας 5.9).

Πίνακας 5.9: Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων που αντιστοιχούν στις ανάγκες του κάθε φωτιστικού ανά μήνα

	<b>BGP322</b> 48 x LED			<b>BGP431</b> 84 x LED		
	<b>Sharp</b>	<b>Conergy</b>	<b>Solarfun</b>	<b>Sharp</b>	<b>Conergy</b>	<b>Solarfun</b>
<i>Ιαν</i>	1.56	1.55	1.53	2.91	2.90	2.86
<i>Φεβ</i>	1.36	1.35	1.34	2.53	2.53	2.49
<i>Μαρ</i>	0.98	0.97	0.95	1.81	1.81	1.78
<i>Απρ</i>	0.79	0.79	0.77	1.47	1.47	1.45
<i>Μαι</i>	0.70	0.70	0.69	1.30	1.30	1.28
<i>Ιουν</i>	0.64	0.63	0.63	1.19	1.18	1.17
<i>Ιουλ</i>	0.63	0.62	0.61	1.16	1.16	1.14
<i>Αυγ</i>	0.67	0.66	0.66	1.24	1.24	1.22
<i>Σεπτ</i>	0.73	0.73	0.71	1.35	1.35	1.33
<i>Οκτ</i>	1.03	1.02	1.01	1.92	1.91	1.89
<i>Νοε</i>	1.53	1.52	1.50	2.85	2.84	2.80
<i>Δεκ</i>	1.80	1.79	1.77	3.35	3.34	3.29

	<b>BGP430</b> 56 x LED			<b>BGP323</b> 160 x LED		
	<b>Sharp</b>	<b>Conergy</b>	<b>Solarfun</b>	<b>Sharp</b>	<b>Conergy</b>	<b>Solarfun</b>
<i>Ιαν</i>	2.00	2.00	1.97	5.26	5.25	5.18
<i>Φεβ</i>	1.74	1.74	1.72	4.59	4.58	4.51
<i>Μαρ</i>	1.25	1.25	1.23	3.28	3.28	3.23
<i>Απρ</i>	1.01	1.01	1.00	2.66	2.65	2.62
<i>Μαι</i>	0.90	0.89	0.88	2.35	2.35	2.32
<i>Ιουν</i>	0.82	0.81	0.80	2.15	2.14	2.11
<i>Ιουλ</i>	0.80	0.80	0.79	2.10	2.09	2.07
<i>Αυγ</i>	0.86	0.85	0.84	2.25	2.25	2.22
<i>Σεπτ</i>	0.93	0.93	0.92	2.45	2.44	2.41
<i>Οκτ</i>	1.32	1.32	1.30	3.47	3.46	3.42
<i>Νοε</i>	1.96	1.96	1.93	5.16	5.14	5.07
<i>Δεκ</i>	2.30	2.30	2.27	6.06	6.05	5.97

Από τους παραπάνω πίνακες βλέπουμε ότι τα τρία φωτοβολταϊκά δίνουν περίπου τα ίδια αποτελέσματα. Ειδικότερα, στον πίνακα 5-9 παρατηρούμε τα εξής:

(α) Ακόμη και για την πιο μικρή λάμπα BGP 322 με 48 LED, ένα μόνο φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν αρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του φωτισμού για ένα εικοσιτετράωρο, εκτός από τους καλοκαιρινούς μήνες που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ηλιοφάνεια κατά τις ώρες της ημέρας και ταυτόχρονα οι ανάγκες του συστήματος είναι λιγότερες λόγω της μικρότερης διάρκειας της νύχτας.



(β) Δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια αρκούν για να καλύψουν τις ανάγκες της πιο μικρής λάμπας μόνο (BGP322 με 48 LED). Η BGP 430 (56 LED) χρειάζεται 3 πλαίσια, η BGP 431 (84 LED) χρειάζεται 4 πλαίσια ενώ η BGP 323 (160 LED) χρειάζεται 6 πλαίσια αν χρησιμοποιηθεί το φωτοβολταϊκό Solarfun και 7 πλαίσια, αν χρησιμοποιηθεί το Sharp ή το Conergy.

(γ) Στις περισσότερες περιπτώσεις (BGP431, BGP430 και BGP323 με Sharp ή Conergy) ένα από τα πλαίσια χρειάζεται ουσιαστικά μόνο για ένα μήνα το χρόνο, το Δεκέμβριο. Όλους τους άλλους μήνες οι ανάγκες του φωτισμού μπορούν να καλυφθούν και με ένα πλαίσιο λιγότερο.

(δ) Αν τοποθετήσουμε αριθμό πλαισίων, που να μας εξασφαλίζουν πλήρη αυτονομία του συστήματος τότε τα μισά από αυτά δεν θα είναι πραγματικά απαραίτητα για μεγάλο τμήμα του έτους. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την προηγούμενη παρατήρηση (γ) σημαίνει ότι για να εξασφαλίσουμε πλήρη αυτονομία του συστήματος ένα μεγάλο μέρος της επένδυσης θα πρέπει να μένει αναξιοποίητο. Σε μια πραγματική εφαρμογή θα πρέπει να εξεταστεί σοβαρά το κατά πόσο η αυτόνομη λειτουργία είναι απολύτως απαραίτητη και αν υπάρχει δυνατότητα να παίρνει το σύστημα βοηθητική ισχύ από άλλες πηγές, όποτε τη χρειάζεται.

Φυσικά η τοποθέτηση τριών ή περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων επιφάνειας  $1.3 \text{ m}^2$  σε μια κολόνα φωτισμού δεν είναι απλή υπόθεση. Από μια έρευνα στο διαδίκτυο βρέθηκε ότι οι ηλιακές κολόνες οδικού φωτισμού που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν ένα και σε σπάνιες περιπτώσεις δύο πλαίσια όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες του σχ. 5.7 ([63]). Επομένως ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα που χρησιμοποιεί τέτοιου είδους κολόνες μπορεί να λειτουργήσει μόνο με λάμπες χαμηλής κατανάλωσης (και χαμηλής φωτεινής ροής), όπως η BGP 322.

Σε περιπτώσεις που οι απαιτήσεις φωτισμού είναι μεγαλύτερες θα πρέπει να αναζητηθούν άλλες λύσεις. Μια δυνατότητα θα ήταν να τοποθετηθούν δίπλα σε κάθε κολόνα φωτισμού μια ή δύο άλλες κολόνες στις οποίες θα στηρίζονταν τα επιπλέον φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αλλά κάτι τέτοιο δεν είναι απλό καθώς πέρα από το κόστος της προμήθειας και τοποθέτησης των πρόσθετων κολονών χρειάζεται και επιπλέον χώρο στο πεζοδρόμιο, ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ελάχιστος ή και ανύπαρκτος. Μια άλλη λύση θα ήταν η τοποθέτηση περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων κατακόρυφα, γύρω-γύρω από τον ιστό της κολόνας. Όμως η κλίση και ο προσανατολισμός των πλαισίων αυτών αναγκαστικά δεν θα ήταν βέλτιστος, με αποτέλεσμα να παίρνουμε λιγότερη ενέργεια από καθένα από αυτά. Έτσι και πάλι είναι αμφίβολο αν θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε

αρκετά πλαίσια γύρω από μια κολόνα έτσι ώστε να καλύψουμε πλήρως τις ανάγκες του φωτισμού. Επιπλέον η λύση αυτή θα απαιτούσε κολόνες στιβαρής κατασκευής που να μπορούν να στηρίζουν όλα αυτά τα πλαίσια. Η εγκατάσταση τέτοιων κολονών σε ένα πεζοδρόμιο μέσα στην πόλη ενδεχομένως θα παρουσίαζε σημαντικές δυσκολίες, τόσο λόγω έλλειψης χώρου όσο και για λόγους αισθητικής. Μια τρίτη ιδέα θα ήταν η δέσμευση κάποιου ξεχωριστού χώρου (π.χ. κάποιας γειτονικής ταράτσας) για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όμως κάτι τέτοιο προϋποθέτει να υπάρχουν τέτοιοι χώροι κατά μήκος του δρόμου και να μπορούν να διατεθούν για το σκοπό αυτό, κάτι που δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ισχύει γενικά. Επιπλέον η λύση αυτή θα απαιτούσε καταβολή ενοικίου που θα ανέβαζε το κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Για όλους τους παραπάνω λόγους αποφασίστηκε ότι για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα θα βασιστεί στη λάμπα BGP 322 και θα αφορά εκείνες τις εφαρμογές οδικού φωτισμού που οι ανάγκες τους μπορούν να καλυφθούν με τη λάμπα αυτή. Αναλυτική φωτοτεχνική μελέτη για μια τέτοια εφαρμογή υπάρχει στο κεφάλαιο 6.



Σχήμα 5.7: Παραδείγματα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κολόνες ηλιακού φωτισμού

Επιπλέον, για λόγους πληρέστερης παρουσίασης του όλου θέματος, αποφασίστηκε να διερευνηθεί και η περίπτωση εγκατάστασης ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού

συστήματος που θα μπορεί να καλύπτει μεγαλύτερες εφαρμογές με χρήση της πιο ισχυρής λάμπας BGP 323. Σε ένα τέτοιο σύστημα όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα βρίσκονται σε έναν ειδικό χώρο (φωτοβολταϊκό πάρκο) και θα συνδέονται με το δίκτυο της ΔΕΗ. Μετά από συζητήσεις με καθηγητές του Τμήματος Ηλεκτρολογίας βρέθηκε ότι ο καλύτερος τρόπος για τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι να μη χρησιμοποιεί συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγουν τα φωτοβολταϊκά κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά να τη διοχετεύει κατευθείαν στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία του φωτισμού θα λαμβάνεται από τη ΔΕΗ. Τα πλεονεκτήματα αυτής της λύσης είναι:

(α) Αποφεύγεται το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης συσσωρευτών και ρυθμιστών φόρτισης.

(β) Εξοικονομείται ενέργεια, καθώς δεν υπάρχουν οι απώλειες των συσσωρευτών.

(γ) Η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συμβάλλει στην κάλυψη των αυξημένων αναγκών του δικτύου ηλεκτροδότησης κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ τα φώτα καταναλώνουν νυχτερινό ρεύμα που είναι γενικά φτηνότερο.

(δ) Εξασφαλίζεται η πλήρης κάλυψη των αναγκών του οδικού φωτισμού.

Σε αντίθεση με το αυτόνομο σύστημα, που θεωρήσαμε ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται με κλίση  $56^\circ$  ώστε να παίρνουμε περισσότερη ενέργεια κατά τους χειμερινούς μήνες, στο διασυνδεδεμένο σύστημα είναι καλύτερα να χρησιμοποιηθεί εκείνη η κλίση που μεγιστοποιεί την ενέργεια που παράγεται συνολικά κατά τη διάρκεια του έτους. Όπως είδαμε στον πίνακα 5.2, η κλίση αυτή είναι  $31^\circ$ . Στον πίνακα 5.10 βλέπουμε τον υπολογισμό της μέσης ενέργειας ανά ημέρα που δίνει στη ΔΕΗ ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο Sharp (μια ενδεικτική περίπτωση). Στην πρώτη στήλη του πίνακα αναγράφονται οι μέσες ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ενέργειας ( $\text{Wh/m}^2$ ) της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, όπως τις υπολόγισε το πρόγραμμα PVGIS για κλίση  $31^\circ$ . Στη δεύτερη στήλη του πίνακα φαίνονται οι αντίστοιχες τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά  $\text{m}^2$  πλαισίου, που προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τις τιμές της πρώτης στήλης επί την απόδοση του πλαισίου (14.1%). Στην τρίτη στήλη δίνεται η ενέργεια που παράγεται από ένα πλαίσιο ανά ημέρα που υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις τιμές της δεύτερης στήλης επί την επιφάνεια του πλαισίου ( $1.31 \text{ m}^2$ ). Τέλος, στην τέταρτη στήλη εμφανίζονται οι τιμές της ενέργειας που αποδίδονται στη ΔΕΗ ανά ημέρα (η παραγόμενη ενέργεια ανά ημέρα επί το συντελεστή απόδοσης του inverter που, όπως αναφέραμε παραπάνω, είναι της τάξης του 90%). Στον πίνακα 5.11 βλέπουμε τη μέση ενέργεια που αποδίδεται στη ΔΕΗ από 2,3,4,5 ή 6 πλαίσια. Αφαιρώντας από τις τιμές αυτές την ημερήσια κατανάλωση της λάμπας BGP 323 (πίνακας

5.5) βρίσκουμε τη διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια που αποδίδεται στο δίκτυο και σε αυτήν που λαμβάνεται από αυτό κατά μέσο όρο μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που αντιστοιχούν σε κάθε κολόνα (πίνακας 5.12).

Πίνακας 5.10: Ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που αποδίδεται στο δίκτυο της ΔΕΗ από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο Sharp κατά μέσο όρο ανά ημέρα

	Πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας (Wh/m <sup>2</sup> )	Παραγόμενη ηλεκ- τρική ενέργεια (Wh) ανά m <sup>2</sup> φωτοβολταϊκού πλαίσιου	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (Wh) ανά πλαίσιο	Ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που αποδίδεται στη ΔΕΗ ανά πλαίσιο
Ιαν	3080	434.28	568.91	512.02
Φεβ	3480	490.68	642.79	578.51
Μαρ	4570	644.37	844.12	759.71
Απρ	5570	785.37	1028.83	925.95
Μαϊ	6080	857.28	1123.04	1010.73
Ιουν	6580	927.78	1215.39	1093.85
Ιουλ	6620	933.42	1222.78	1100.50
Αυγ	6440	908.04	1189.53	1070.58
Σεπ	5980	843.18	1104.57	994.11
Οκτ	4470	630.27	825.65	743.09
Νοε	3100	437.1	572.60	515.34
Δεκ	2660	375.06	491.33	442.20

Πίνακας 5.11: Ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που αποδίδεται στο δίκτυο της ΔΕΗ ανά ημέρα ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων

	Αριθμός Φωτοβολταϊκών Πλαισίων				
	2	3	4	5	6
Ιαν	1024.03	1536.05	2048.06	2560.08	3072.10
Φεβ	1157.02	1735.54	2314.05	2892.56	3471.07
Μαρ	1519.42	2279.14	3038.85	3798.56	4558.27
Απρ	1851.90	2777.85	3703.80	4629.76	5555.71
Μαϊ	2021.47	3032.20	4042.93	5053.67	6064.40
Ιουν	2187.71	3281.56	4375.41	5469.26	6563.12
Ιουλ	2201.00	3301.51	4402.01	5502.51	6603.01
Αυγ	2141.16	3211.74	4282.32	5352.90	6423.47
Σεπ	1988.22	2982.33	3976.44	4970.55	5964.66
Οκτ	1486.18	2229.26	2972.35	3715.44	4458.53
Νοε	1030.68	1546.02	2061.36	2576.70	3092.05
Δεκ	884.39	1326.59	1768.78	2210.98	2653.17

Πίνακας 5.12: Διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια (Wh) που αποδίδεται στη ΔΕΗ ανά ημέρα και σε αυτή που καταναλώνεται, ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που αντιστοιχούν σε κάθε φωτιστικό

	Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά φωτιστικό				
	2	3	4	5	6
Ιαν	-1519.97	-1007.95	-495.94	16.08	528.1
Φεβ	-1194.98	-616.46	-37.95	540.56	1119.07
Μαρ	-544.58	215.14	974.85	1734.56	2494.27
Απρ	-20.1	905.85	1831.8	2757.76	3683.71
Μαϊ	341.47	1352.2	2362.93	3373.67	4384.4
Ιουν	603.71	1697.56	2791.41	3885.26	4979.12
Ιουλ	617	1717.51	2818.01	3918.51	5019.01
Αυγ	365.16	1435.74	2506.32	3576.9	4647.47
Σεπ	20.22	1014.33	2008.44	3002.55	3996.66
Οκτ	-769.82	-26.74	716.35	1459.44	2202.53
Νοε	-1417.32	-901.98	-386.64	128.7	644.05
Δεκ	-1659.61	-1217.41	-775.22	-333.02	109.17
<b>Ετήσια διαφορά ενέργειας</b>	-5178.82	4567.79	14314.36	24060.97	33807.56

Παρατηρούμε ότι για να αποδίδουμε στη ΔΕΗ περισσότερη ενέργεια από όση παίρνουμε στη διάρκεια του έτους θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τουλάχιστον 3 φωτοβολταϊκά πλαίσια ανά κολόνα. Φυσικά για τον ακριβή υπολογισμό του οικονομικού οφέλους και την αξιολόγηση της συνολικής επένδυσης θα πρέπει κανείς να γνωρίζει την τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας στη ΔΕΗ.

## 5.5 Συσσωρευτές

Σε ένα ηλιακό σύστημα οδικού φωτισμού η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Για να μπορέσει να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχουν κάποιοι συσσωρευτές (μπαταρίες) που θα δέχονται την ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και θα την αποθηκεύουν μέχρι τη στιγμή που θα χρειαστεί να καταναλωθεί στους λαμπτήρες.

Όπως είναι γνωστό, οι συσσωρευτές αποτελούν ηλεκτροχημικές διατάξεις που αποθηκεύουν χημική ενέργεια και την αποδίδουν ως ηλεκτρική. Υπάρχουν πολλά

διαφορετικά είδη συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται ευρύτατα τόσο στη βιομηχανία όσο και στην καθημερινή ζωή. Γενικά οι συσσωρευτές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους πρωτεύοντες (primary) και τους δευτερεύοντες (secondary). Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι οι πρωτεύοντες συσσωρευτές είναι μόνο μιας χρήσεως (δεν μπορούν να επαναφορτιστούν) ενώ οι δευτερεύοντες μπορούν να χρησιμοποιούνται ξανά και ξανά. Είναι προφανές ότι στα φωτοβολταϊκά συστήματα ενδιαφερόμαστε μόνο για επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές (δευτερεύοντος τύπου) και μάλιστα με μεγάλη διάρκεια ζωής και απεριόριστο αριθμό επαναφορτίσεων ([112]).

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να έχουν οι συσσωρευτές που προορίζονται για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η δυνατότητα «βαθιάς εκφόρτισης». Αυτό σημαίνει ότι κατά την εκφόρτιση θα πρέπει ο συσσωρευτής να μπορεί να αποδώσει σημαντικό ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας (τυπικά της τάξης του 50% αλλά σε ειδικές περιπτώσεις μέχρι και 80%) χωρίς να υποστεί βλάβη ([110]). Ο λόγος που αυτό είναι απαραίτητο είναι ότι σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, σημαντικό μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας χρειάζεται να καταναλωθεί τη νύχτα ή σε συνθήκες μικρής ηλιοφάνειας που δεν υπάρχει δυνατότητα επαναφόρτισης του συσσωρευτή από τον ήλιο.

Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να δώσει ένας συσσωρευτής εκφράζεται συνήθως με τη χωρητικότητά του (capacity), η οποία μετριέται σε αμπερώρια (Ah). Η τιμή της χωρητικότητας ισούται με το ρεύμα που δίνει ο συσσωρευτής (σε A) επί το χρονικό διάστημα (σε h) που διαρκεί η εκφόρτισή του. Γενικά η χωρητικότητα εξαρτάται από το ρυθμό εκφόρτισης. Σε αργή εκφόρτιση ένας συσσωρευτής μπορεί να μας δώσει περισσότερα Ah απ' όσα θα μας δώσει σε γρήγορη εκφόρτιση ([110]). Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές σημειώνουν μαζί με τη χωρητικότητα του συσσωρευτή και τον αντίστοιχο χρόνο εκφόρτισης. Μια συνηθισμένη πρακτική είναι να δίνεται η χωρητικότητα για χρόνο εκφόρτισης 20 h (που σημειώνεται C/20). Για παράδειγμα, ένας συσσωρευτής με χωρητικότητα 100 Ah υπολογισμένη για ρυθμό εκφόρτισης C/20 μπορεί να δίνει σταθερό ρεύμα 5 A επί 20 h. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι η θερμοκρασία<sup>5</sup>, το βάθος εκφόρτισης, η κατάσταση των υλικών, η ηλικία, το ιστορικό χρήσης (κακή χρήση του συσσωρευτή μειώνει τη χωρητικότητα) κλπ.

Η απόδοση ενός συσσωρευτή είναι το ποσό της ενέργειας που δίνει κατά την εκφόρτιση προς το ποσό της ενέργειας που παίρνει κατά τη φόρτιση. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά διάφοροι τύποι συσσωρευτών μολύβδου-

<sup>5</sup> Οι τιμές χωρητικότητας που αναγράφονται στους συσσωρευτές αφορούν συνήθως θερμοκρασία 25° C.

οξέος<sup>6</sup> που έχουν απόδοση της τάξης του 90% ή και παραπάνω. Άλλες τεχνολογίες όπως νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) ή νικελίου-σιδήρου (Ni-Fe) μπορεί να παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως μεγάλη διάρκεια ζωής ή μικρό ποσοστό αυτοεκφόρτισης<sup>7</sup> αλλά η απόδοσή τους είναι της τάξης του 60-70% ενώ έχουν και άλλα σοβαρά μειονεκτήματα όπως υψηλό κόστος, δυσκολία προσαρμογής στα τυποποιημένα επίπεδα τάσης και ρεύματος και μεγαλύτερη επικινδυνότητα για το περιβάλλον ([111]).

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά στα κυριότερα είδη συσσωρευτών μολύβδου που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στις ιστοσελίδες ([110]-[111]) και στην εργασία ([112]). Γενικά οι συσσωρευτές χωρίζονται σε ανοιχτού τύπου και κλειστού τύπου. Οι ανοιχτού τύπου είναι συνήθως οικονομικότεροι αλλά χρειάζονται συντήρηση (προσθήκη νερού) κατά τακτά χρονικά διαστήματα. Αντίθετα, οι συσσωρευτές κλειστού τύπου δεν χρειάζονται καμμία φροντίδα από τη στιγμή που θα εγκατασταθούν. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των συσσωρευτών είναι το υλικό κατασκευής των πλακών. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι συσσωρευτές έχουν πλάκες μολύβδου-αντιμονίου ή μολύβδου-ασβεστίου. Το αντιμόνιο δίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μεγαλύτερη αντοχή σε χτυπήματα και κραδασμούς αλλά οι συσσωρευτές αυτοί παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες υγρών και υψηλότερους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης. Για παράδειγμα, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης σε μια παλιά μπαταρία μολύβδου-αντιμονίου μπορεί να φτάσει το 1% ανά ημέρα ενώ σε μια αντίστοιχα παλιά μπαταρία μολύβδου-ασβεστίου τύπου AGM (Absorbed Glass Mat) ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι 2% ανά εβδομάδα. Ας σημειωθεί επίσης ότι σε μια καινούργια μπαταρία AGM ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι της τάξης του 1-2% ανά μήνα. Οι μπαταρίες AGM όπως και οι μπαταρίες τύπου gel είναι συσσωρευτές κλειστού τύπου ειδικής κατασκευής, που εξασφαλίζει ότι αποκλείεται να συμβεί διαρροή οξέως ακόμη και αν η μπαταρία σπάσει. Μεταξύ των δύο αυτών τύπων οι μπαταρίες τύπου gel είναι λιγότερο ανθεκτικές σε φόρτιση με υψηλότερη τάση ή ταχύτερο ρυθμό από το κανονικό. Επιπλέον, σε θερμά κλίματα παρουσιάζουν μεγάλη απώλεια υγρών με αποτέλεσμα να καταστρέφονται σε σύντομο χρονικό διάστημα (2-4 έτη). Για όλους τους παραπάνω λόγους θεωρούμε ότι οι μπαταρίες τύπου AGM είναι μια καλή επιλογή για το είδος της εφαρμογής που μας ενδιαφέρει. Φυσικά σε μια πραγματική εγκατάσταση ενδέχεται τελικά να προτιμηθεί κάποια άλλη τεχνολογία

<sup>6</sup> Αναφέρονται συχνά και ως συσσωρευτές μολύβδου, για λόγους συντομίας.

<sup>7</sup> Η αυτοεκφόρτιση (self-discharge) είναι η σταδιακή απώλεια της αποθηκευμένης ενέργειας με την πάροδο του χρόνου όταν ο συσσωρευτής δεν χρησιμοποιείται.

(π.χ. για λόγους κόστους) αν βρεθεί ότι τα τυχόν μειονεκτήματα της άλλης τεχνολογίας δεν αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά το συγκεκριμένο σύστημα.

Όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών, το μόνο που μπορεί να πει κανείς είναι ότι δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια, καθώς εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες που ποικίλλουν από εγκατάσταση σε εγκατάσταση. Για το λόγο αυτό και τα νούμερα που δίνουν οι διάφοροι κατασκευαστές ή εμπορικοί αντιπρόσωποι διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Μια χονδρική εκτίμηση είναι τα 5-10 έτη υπό την προϋπόθεση ότι θα αποφεύγεται η κακή χρήση των συσσωρευτών και θα χρησιμοποιείται ο κατάλληλος ρυθμιστής φόρτισης.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών που θα χρειαστούν για το πρόβλημα που μελετάμε στην παρούσα εργασία. Στον παρακάτω πίνακα 5.13 βλέπουμε κάποια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των τριών φωτοβολταϊκών πλαισίων που ξεχωρίσαμε στην προηγούμενη ενότητα 5.4.

Πίνακας 5.13: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών που ξεχωρίσαμε

	Sharp	Conergy	Solarfun
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	30.2 V	45.3 V	45.3 V
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως	8.54 A	5.23 A	5.23 A
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος	24.0 V	36.1 V	36.1 V
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος	7.71 A	5.12 A	5.12 A

Παρατηρώντας τα επίπεδα τάσεως που δίνουν τα τρία φωτοβολταϊκά βλέπουμε ότι μια καλή επιλογή για την τάση των συσσωρευτών είναι τα 24 V για το μοντέλο της Sharp και τα 36 V για τα μοντέλα της Conergy και της Solarfun. Για να πετύχουμε τις τάσεις αυτές πρέπει να συνδέσουμε σε σειρά δύο ή τρεις συσσωρευτές 12V αντίστοιχα. Η ακριβής προσαρμογή της εξόδου του φωτοβολταϊκού στην είσοδο του συσσωρευτή θα γίνει από το ρυθμιστή φόρτισης. Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας των συσσωρευτών θα χρησιμοποιήσουμε την κατανάλωση των φορτίων, που όπως προαναφέραμε είναι 57 W για τη λάμπα BGP322 με 48 LED. Λαμβάνοντας υπόψη και το συντελεστή απόδοσης 90% του inverter βρίσκουμε ότι οι συσσωρευτές θα πρέπει να μπορούν να παρέχουν μια ισχύ

$$P = 57 / 0.9 = 63 \text{ W}$$

Στην περίπτωση των συσσωρευτών 24 V η ισχύς αυτή αντιστοιχεί σε ρεύμα

$$I = 63 / 24 = 2.625 \text{ A}$$

ενώ στην περίπτωση των συσσωρευτών 36 V αντιστοιχεί σε ρεύμα

$$I = 63 / 36 = 1.75 \text{ A}$$



Από τον πίνακα 5.4 βλέπουμε ότι η μέγιστη διάρκεια λειτουργίας των λαμπτήρων (και επομένως ο μέγιστος χρόνος, που θα πρέπει οι συσσωρευτές να παρέχουν το παραπάνω ρεύμα) είναι 13.25h. Επομένως η ελάχιστη απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών θα είναι

$$2.625 * 13.25 = 34.781 \text{ Ah}$$

για τους συσσωρευτές 24 V και

$$1.75 * 13.25 = 23.187 \text{ Ah}$$

για τους συσσωρευτές 36 V. Για να εξασφαλίσουμε ότι ο βαθμός εκφόρτισης του συσσωρευτή δεν θα είναι πάνω από 50%, οι τιμές αυτές θα πρέπει να διπλασιαστούν. Επομένως οι χωρητικότητες που θα χρειαστούμε θα είναι 69.562 Ah για τους συσσωρευτές 24 V και 46.374 Ah για τους συσσωρευτές 36 V. Κάποιες κοντινές επιλογές από τις συνηθισμένες τιμές που κυκλοφορούν στο εμπόριο (π.χ. [113]) είναι 70 Ah και 50 Ah, αντίστοιχα. Φυσικά, όπως αναφέραμε, το σύστημα των 24 V απαιτεί δύο συσσωρευτές 70 Ah σε σειρά ενώ εκείνο των 36 V απαιτεί τρεις συσσωρευτές 50 Ah σε σειρά. Έτσι, το φωτοβολταϊκό της Sharp δείχνει να αποτελεί πιο οικονομική λύση.

## 5.6 Άλλες απαιτούμενες μονάδες

### 5.6.1 Ρυθμιστής φόρτισης

Ο ρυθμιστής φόρτισης ([114]) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που παρεμβάλλεται μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των συσσωρευτών και ελέγχει τη διαδικασία φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμιστής παρακολουθεί το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και διακόπτει το ρεύμα όταν διαπιστώσει ότι αυτή έχει φορτιστεί πλήρως. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της φόρτισης ο ρυθμιστής ρυθμίζει τις τιμές της τάσης και του ρεύματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ισχύος ή να αποφεύγονται καταστάσεις υπερφόρτισης που θα μπορούσαν να προκαλέσουν δραστική μείωση του χρόνου ζωής ή και άμεση καταστροφή των μπαταριών. Ακόμη ο ρυθμιστής φόρτισης ξαναρχίζει αυτόματα τη διαδικασία φόρτισης όταν διαπιστώσει ότι η τάση της έχει πέσει κάτω από τα επίπεδα που αντιστοιχούν σε πλήρη φόρτιση. Τέλος, πολλοί ρυθμιστές έχουν τη δυνατότητα να αποκόπτουν τα φορτία όταν διαπιστώσουν ότι η φόρτιση της μπαταρίας έχει πέσει κάτω από κάποιο επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η πλήρης αποφόρτιση της μπαταρίας που θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφή της.

Οι συνηθισμένοι ρυθμιστές φόρτισης χρησιμοποιούν τεχνικές PWM (Pulse Width Modulation, διαμόρφωση εύρους παλμών) για τη ρύθμιση της τάσης. Κάποιοι σύγχρονοι

ρυθμιστές χρησιμοποιούν παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking – MPPT) ([116]). Πρόκειται για μια τεχνική που ρυθμίζει την τάση και το ρεύμα έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή η μπαταρία να παίρνει τη μέγιστη δυνατή ισχύ από το φωτοβολταϊκό.

Σε πολλούς ρυθμιστές υψηλής ποιότητας η διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας εκτελείται σε τρία στάδια ([110], [115]). Στο πρώτο στάδιο (μαζική φόρτιση, bulk) ο ρυθμιστής διοχετεύει στην μπαταρία το μέγιστο ρεύμα που μπορεί αυτή να δεχτεί με ασφάλεια μέχρι η φόρτισή της να φτάσει στο 80-90%. Στο στάδιο αυτό η τάση που εφαρμόζεται στη μπαταρία είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τάση κανονικής λειτουργίας. Στο δεύτερο στάδιο (απορόφηση, absorption) η τάση παραμένει στα ίδια υψηλά επίπεδα ενώ το ρεύμα μειώνεται σταδιακά. Τέλος στο τρίτο στάδιο (κατάσταση επιπλέοντος φορτίου, float charge) η τάση πέφτει στα επίπεδα κανονικής λειτουργίας και η μπαταρία τραβάει ένα μικρό ρεύμα που σκοπό έχει να συντηρεί τη φόρτιση.

Για την επιλογή του ρυθμιστή φόρτισης, εκτός από την τάση των συσσωρευτών θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη και το ρεύμα που δίνουν τα φωτοβολταϊκά, το οποίο δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα του ρυθμιστή. Έτσι, για την εφαρμογή της παρούσας εργασίας βλέπουμε από τον πίνακα 5.13 ότι θα χρειαστούμε ρυθμιστή φόρτισης 10-12 A. Από μια σύντομη έρευνα στο διαδίκτυο διαπιστώσαμε ότι στην ελληνική αγορά μπορεί κανείς να βρει μεγάλη ποικιλία ρυθμιστών φόρτισης 24V, 10 ή 12A (π.χ. [117], [118]) με ενδεικτικό κόστος 25-35 € για ονομαστικό ρεύμα 10A και 50-65 € για ονομαστικό ρεύμα 12 A. Αντίθετα, η αντίστοιχη αναζήτηση για ρυθμιστές φόρτισης 36V τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό μας εμφάνισε πολύ λίγα μοντέλα (π.χ. [119]-[120]) που είχαν μεγάλο ονομαστικό ρεύμα (20A και πάνω) και κόστιζαν κάποιες εκατοντάδες ευρώ. Έτσι για άλλη μια φορά φαίνεται ότι το φωτοβολταϊκό της Sharp αποτελεί πιο οικονομική λύση.

### 5.6.2 Αντιστροφέας

Όπως προαναφέραμε (ενότητα 5.1), τα φωτιστικά που χρησιμοποιούμε λειτουργούν με τάση AC. Επομένως, για να τα τροφοδοτήσουμε από τους συσσωρευτές του φωτοβολταϊκού συστήματος θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε έναν αντιστροφέα (inverter) που θα μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές είναι οι αντιστροφείς «καθαρού ημιτόνου» (true sine wave) και οι αντιστροφείς «τροποποιημένου ημιτόνου» (modified sine wave) ([121], [122]). Οι αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου έχουν χαμηλότερο κόστος αλλά η τάση που παράγουν περιέχει πολλές αρμονικές (είναι κάτι ανάμεσα σε ημίτονο και

τετραγωνικό παλμό). Αν και οι περισσότερες οικιακές εφαρμογές μπορούν να λειτουργήσουν με την τάση αυτή χωρίς πρόβλημα, ορισμένες ηλεκτρονικές συσκευές ενδέχεται να παρουσιάσουν δυσλειτουργίες ([123]). Επιπλέον οι αρμονικές μπορεί να προκαλέσουν αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και φθορά του εξοπλισμού λόγω υπερθέρμανσης, ιδίως σε περιπτώσεις επαγωγικών φορτίων (συσκευές που έχουν κινητήρες, τροφοδοτικά με μετασχηματιστές κλπ) ([124]). Από την άλλη μεριά, οι αντιστροφείς καθαρού ημιτόνου δεν έχουν κανένα από τα παραπάνω μειονεκτήματα αλλά κοστίζουν αρκετά περισσότερο. Ενδεικτικά, ένας αντιστροφέας 300W τροποποιημένου ημιτόνου μπορεί να κοστίζει 50€ ενώ ένας αντιστροφέας καθαρού ημιτόνου με την ίδια ισχύ μπορεί να κοστίζει 200€ ([122]). Γενικά πάντως η δαπάνη για την προμήθεια ενός καλού αντιστροφέα θεωρείται ότι είναι μια επένδυση που αποδίδει σε βάθος χρόνου μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας, της καλύτερης προστασίας των συσκευών και της ομαλότερης λειτουργίας του δικτύου ([123]).

Οι καλής ποιότητας αντιστροφείς περιλαμβάνουν διατάξεις προστασίας που διακόπτουν τη λειτουργία του αντιστροφέα σε περίπτωση παρατεταμένης υπερφόρτωσης ή εκφόρτισης της μπαταρίας. Άλλες προστασίες αφορούν συστήματα αποφυγής υπερθέρμανσης και αυτόματης διαχείρισης (ξεκίνημα/σταμάτημα) του αντιστροφέα ανάλογα με την παρουσία ή την απουσία φορτίων ([61], [121]) ώστε να εξοικονομείται ενέργεια. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι πολλοί αντιστροφείς έχουν και είσοδο AC που τους επιτρέπει να λειτουργούν ως φορτιστές για τις μπαταρίες χρησιμοποιώντας ενέργεια από το δίκτυο ηλεκτροδότησης ή από αυτόνομες γεννήτριες.

Η απόδοση ενός αντιστροφέα εξαρτάται γενικά από το φορτίο. Επειδή ο αντιστροφέας καταναλώνει πάντα κάποια μικρή ισχύ για τη λειτουργία του, η απόδοσή του πέφτει σημαντικά όταν τροφοδοτεί φορτία πολύ μικρότερα από το ονομαστικό. Για παράδειγμα, ένας αντιστροφέας με ονομαστική ισχύ 2500 W και κατανάλωση 20 W θα έχει απόδοση της τάξης του 50% αν χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ένα φορτίο 40W. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι ότι ένας αντιστροφέας θα έχει την καλύτερη δυνατή απόδοση όταν χρησιμοποιείται περίπου στα 2/3 της μέγιστης ισχύος του ([123]).

Στην αγορά διατίθεται μεγάλη ποικιλία αντιστροφέων για τιμές ισχύος από 50W έως 10KW ([122], [125]-[127]). Η συνεχής τάση εισόδου (η τάση των μπαταριών) είναι συνήθως 12, 24 ή 48V. Έτσι, για άλλη μια φορά βλέπουμε ότι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο της Sharp είναι πιο κατάλληλο για την εφαρμογή μας, καθώς μπορεί να συνδεθεί πιο εύκολα με τους συνηθισμένους αντιστροφείς της αγοράς.

Σε μια εφαρμογή οδικού φωτισμού υπάρχουν γενικά δύο δυνατότητες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν αντιστροφέα μικρής ισχύος (π.χ. 80-100W) για κάθε φωτιστικό ή

ένας αντιστροφέας μεγαλύτερης ισχύος που θα τροφοδοτεί μια ολόκληρη ομάδα φωτιστικών. Η πρώτη λύση έχει το πλεονέκτημα ότι χρειάζεται λιγότερες καλωδιώσεις ειδικά όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι μπαταρίες και ο ρυθμιστής φόρτισης του κάθε φωτιστικού τοποθετούνται πάνω ή δίπλα στην κολόνα. Από την άλλη μεριά, ένας αντιστροφέας μεγαλύτερης ισχύος (π.χ. 2-3KW), μπορεί να είναι ανώτερης ποιότητας και να παρέχει υψηλότερη απόδοση και καλύτερη προστασία του εξοπλισμού.

Από μια μικρή έρευνα στο διαδίκτυο και κάποιες συνομιλίες με ειδικούς του χώρου καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι μια καλή επιλογή θα ήταν οι αντιστροφείς καθαρού ημιτόνου της σειράς Sunny Island της εταιρείας SMA και πιο συγκεκριμένα ένα από τα μοντέλα 2224 (ονομαστική ισχύς εξόδου 2200 W) ή 3324 (ονομαστική ισχύς εξόδου 3300 W) που λειτουργούν με μπαταρίες 24V. Σύμφωνα με τα τεχνικά φυλλάδια της εταιρείας ([128]-[129]), οι παραπάνω τιμές ισχύος αφορούν λειτουργία σε θερμοκρασία 25° C. Στους 45° C η ονομαστική ισχύς πέφτει στα 1600 W για το μοντέλο 2224 και στα 2300 W για το 3324. Βέβαια σε ένα αυτόνομο σύστημα οδικού φωτισμού η θερμοκρασία δεν αναμένεται να αποτελέσει πρόβλημα καθώς τα φορτία θα δουλεύουν μόνο κατά τις νυχτερινές ώρες. Ενδεικτικές τιμές κόστους είναι 2000€ για το 2224 και 2500€ για το 3324 ([127]).

Με δεδομένο ότι η κατανάλωση του BGP322 με 48 LED είναι 57W βλέπουμε ότι το 2224 μπορεί να τροφοδοτήσει μέχρι 39 φωτιστικά ενώ το 3324 μπορεί να τροφοδοτήσει μέχρι 58 φωτιστικά. Αν θέλουμε να μη φορτώνουμε τους αντιστροφείς περισσότερο από το 70% των δυνατοτήτων τους ώστε να μην τους αναγκάζουμε να λειτουργούν στα όριά τους θα πρέπει να υπολογίσουμε ισχύ  $2200 * 0.70 = 1540$  W για το 2224 και  $3300 * 0.70 = 2310$  W για το 3324. Οι τιμές αυτές καλύπτουν φορτίο 27 φωτιστικών με το 2224 και 40 φωτιστικών με το 3324. Άρα το κόστος του αντιστροφέα ανά φωτιστικό μπορεί να είναι  $2000/27 = 74€$  για το 2224 και  $2500/40 = 62.5€$  για το 3324. Λαμβάνοντας υπόψη τα εξαιρετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά και την υψηλή αξιοπιστία των συγκεκριμένων αντιστροφέων είναι φανερό ότι η λύση αυτή είναι πάρα πολύ συμφέρουσα.

Στην περίπτωση του διασυνδεδεμένου συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο Sunny Boy της εταιρείας SMA, που είναι πιο κατάλληλο για εφαρμογές συνδεδεμένες με το κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η ονομαστική ισχύς εξόδου του αντιστροφέα αυτού είναι 3800 W και το κόστος του είναι περίπου 1800€. Το 70% της ονομαστικής ισχύος είναι 2660W, που αντιστοιχεί σε φορτίο 13 φωτιστικών BGP323. Επομένως το κόστος του αντιστροφέα ανά φωτιστικό ανέρχεται σε  $1800/13 = 138.4€$ .

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΜΕΛΕΤΗ ΟΔΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ”

#### 6.1 Γενικά

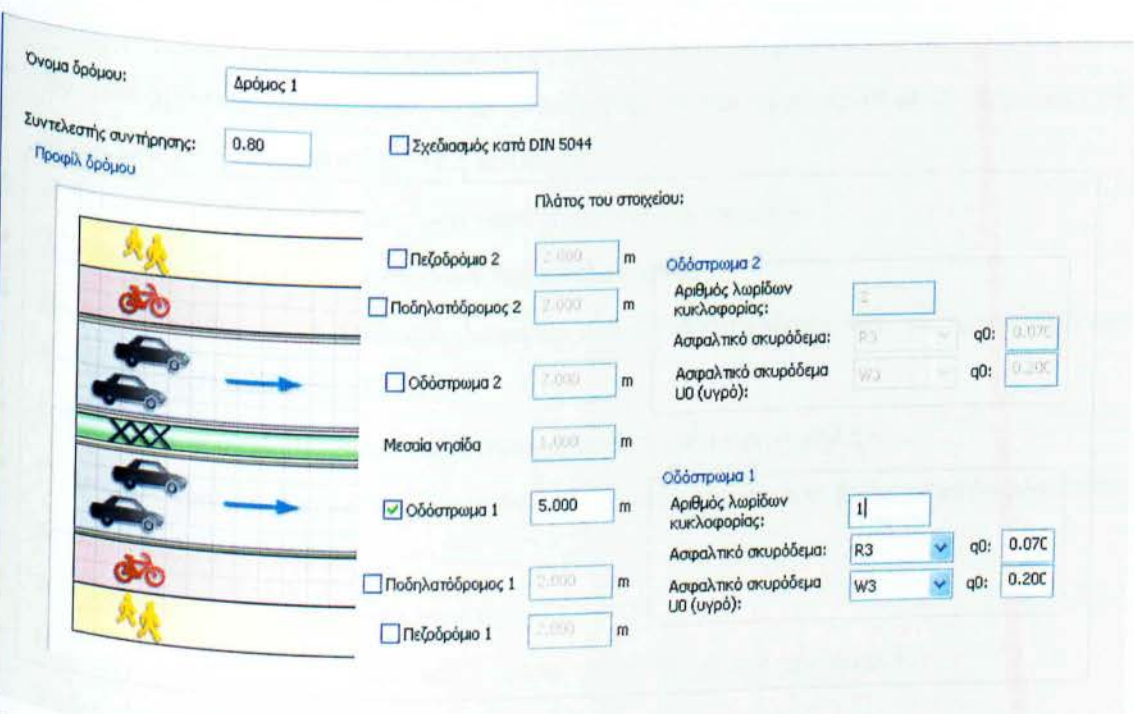
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά οι μελέτες φωτισμού για δύο εφαρμογές βασισμένες στα φωτιστικά Greenline της σειράς Speedstar της Philips που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μια εφαρμογή αφορά ένα συνοικιακό δρόμο με σχετικά χαμηλές απαιτήσεις φωτισμού που μπορούν να καλυφθούν με το μοντέλο BGP322 με 48 LED. Η δεύτερη εφαρμογή χρησιμοποιεί το BGP 323 με 160 LED και αφορά μεγάλους δρόμους με υψηλές απαιτήσεις φωτισμού. Όπως εξηγήσαμε στην ενότητα 5.4, η απαιτούμενη ενέργεια για την πρώτη εφαρμογή μπορεί να παρέχεται από ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με δύο πλαίσια σε κάθε κολόνα φωτισμού ενώ στην περίπτωση της δεύτερης εφαρμογής είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα φωτοβολταϊκό πάρκο συνδεδεμένο με το δίκτυο της ΔΕΗ.

Όλοι οι υπολογισμοί της μελέτης έγιναν με το πρόγραμμα Dialux, το οποίο είναι δωρεάν διαθέσιμο από το διαδίκτυο ([64]). Πρόκειται για ένα αρκετά ισχυρό πακέτο λογισμικού για γενικές μελέτες φωτισμού εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου. Ειδικά για την περίπτωση του οδικού φωτισμού παρέχει μια σειρά από χρήσιμα εργαλεία, που καθοδηγούν το χρήστη βήμα προς βήμα και τον βοηθούν να εκτελέσει τη μελέτη που θέλει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Μια πολύ χρήσιμη λειτουργία του προγράμματος είναι η δυνατότητα να δοκιμάζει αυτόματα διάφορους συνδυασμούς από παραμέτρους και να παρουσιάζει στο χρήστη μόνο εκείνους που οδηγούν σε αποδεκτές λύσεις, σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένα κριτήρια σχεδιασμού. Επιπλέον το Dialux διατηρεί βάσεις δεδομένων με τα τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων φωτιστικών για να μπορεί να τα χρησιμοποιεί κατά τους υπολογισμούς. Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα στην παρούσα εργασία χρειάστηκε να φορτωθούν κάποια αρχεία από την ιστοσελίδα της Philips, ώστε να ενημερωθεί η βάση δεδομένων με τα χαρακτηριστικά των φωτιστικών της συγκεκριμένης εταιρείας. Η διαδικασία αυτή ήταν ιδιαίτερα απλή και δεν παρουσίασε κανένα πρόβλημα.

Στις μελέτες οδικού φωτισμού το Dialux παρέχει πλήρη υποστήριξη για τις κατηγορίες φωτισμού που ορίζει η τυποποίηση CEN13201. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε την ίδια τυποποίηση. Η επιλογή της κατηγορίας φωτισμού μπορεί να γίνει είτε άμεσα από το χρήστη είτε από το πρόγραμμα, αφού ο χρήστης κληθεί να συμπληρώσει ένα ερωτηματολόγιο που αφορά τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στο συγκεκριμένο δρόμο. Δοκιμάσαμε να δώσουμε διάφορες απαντήσεις στο πρόγραμμα και παρατηρήσαμε πώς το πρόγραμμα άλλαζε κάθε φορά την κατηγορία φωτισμού. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τους χειρισμούς που κάναμε και τα αποτελέσματα που πήραμε από το πρόγραμμα στις δύο εφαρμογές που μελετήσαμε.

## 6.2 Μελέτη φωτισμού για μικρό δρόμο (περίπτωση αυτόνομου φ/β συστήματος)

Το πρώτο βήμα σε μια μελέτη φωτισμού με το Dialux είναι ο ορισμός των βασικών χαρακτηριστικών του δρόμου (σχήμα 6.1). Όπως βλέπουμε, για τη συγκεκριμένη μελέτη επιλέξαμε δρόμο με ένα οδόστρωμα πλάτους 5m, που έχει μία λωρίδα κυκλοφορίας και δεν έχει πεζοδρόμιο.



Σχήμα 6.1: Τα βασικά χαρακτηριστικά του δρόμου που χρησιμοποιήσαμε για τη μελέτη

Στη συνέχεια το πρόγραμμα μας ζητάει να επιλέξουμε την κατηγορία φωτισμού (σχήμα 6.2). Εδώ έχουμε δύο δυνατότητες. Μπορούμε είτε να επιλέξουμε μια κοινή

κατηγορία φωτισμού για όλα τα «πεδία αξιολόγησης» (οδόστρωμα, πεζοδρόμια) είτε να χρησιμοποιήσουμε ξεχωριστή κατηγορία για το καθένα. Εμείς επιλέξαμε την πρώτη περίπτωση (αφού ο δρόμος μας έχει μόνο οδόστρωμα) και ζητήσαμε να προσδιορίσουμε την κατηγορία φωτισμού μέσα από το ερωτηματολόγιο. Οι απαντήσεις που δώσαμε ήταν οι εξής:

Χρησιμοποιήστε ένα και μοναδικό πεδίο αξιολόγησης για όλα τα στοιχεία.

Κατηγορία φωτισμού για αυτό το πεδίο αξιολόγησης:

Μεμονωμένα πεδία αξιολόγησης:	Κοινά πεδία αξιολόγησης:	Κατηγορίες φωτισμού για μεμονωμένα πεδία αξιολόγησης:	Κατηγορίες φωτισμού για κοινά πεδία αξιολόγησης:
<input type="checkbox"/> Πεζοδρόμιο 2	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>
<input type="checkbox"/> Ποδηλατόδρομος 2	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>
<input type="checkbox"/> Οδόστρωμα 2	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="ME1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>	<input type="text" value="ME1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>
<input type="checkbox"/> Πρασά υγείας	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="CE2"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>	<input type="text" value="ME1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>
<input type="checkbox"/> Οδόστρωμα 1	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="ME1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>	<input type="text" value="ME1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>
<input type="checkbox"/> Ποδηλατόδρομος 1	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>
<input type="checkbox"/> Πεζοδρόμιο 1	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>	<input type="text" value="S1"/> <input type="button" value="Επιλογή"/>

Σχήμα 6.2: Επιλογή κατηγορίας φωτισμού

- Η συνήθης ταχύτητα του βασικού χρήστη του δρόμου είναι μεσαία (30-60 km/h)
- Βασικοί χρήστες του δρόμου είναι αυτοκινούμενα και αργά κινούμενα οχήματα (<40 km/h) ενώ επιτρέπονται ποδηλάτες και πεζοί.
- Η βασική καιρική κατάσταση είναι «στεγνός» και όχι «υγρός»
- Δεν υπάρχουν μέτρα για περιορισμό της κυκλοφορίας
- Ο δρόμος συνδέεται με άλλους δρόμους με απλές διασταυρώσεις και υπάρχουν πάνω από 3 τέτοιες διασταυρώσεις ανά km.
- Η δυσκολία πλοήγησης χαρακτηρίζεται «κανονική» και όχι «υψηλή».
- Ο αριθμός των οχημάτων που περνούν από κάποιο σημείο του δρόμου κάθε μέρα είναι μεταξύ 15000 και 25000.
- Δεν υπάρχει κάποια ζώνη σύγκρουσης
- Η πολυπλοκότητα του οπτικού πεδίου είναι «υψηλή» και όχι «κανονική»
- Υπάρχουν σταθμευμένα οχήματα στην άκρη του οδοστρώματος
- Υψηλή στάθμη φωτεινότητας περιβάλλοντος (ενδοαστική περιοχή)
- Η ροή κυκλοφορίας για ποδηλάτες και πεζούς είναι «κανονική» και όχι «υψηλή»

Με βάση τις παραπάνω απαντήσεις, το πρόγραμμα αποφάσισε ότι η κατηγορία φωτισμού είναι ME3c. Κατά συνέπεια, οι απαιτήσεις του σχεδιασμού είναι τα ελάχιστα όρια, που ορίζουν για τα διάφορα φωτοτεχνικά μεγέθη οι διεθνείς κανονισμοί στη συγκεκριμένη κατηγορία. Τα όρια αυτά αναφέρθηκαν ήδη στο κεφάλαιο 3 και εμφανίζονται στην οθόνη του προγράμματος, που εικονίζεται στο σχήμα 6.3.

Παράμετροι	Οριακή τιμή	Μονάδα	Βάση
<input checked="" type="checkbox"/> Lm	1.0	cd/m <sup>2</sup>	(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> U0	0.4		(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> U1	0.5		(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> TI	15	%	(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> SR	0.5		(Ένταση φωτισμού)

Σχήμα 6.3: Τα κριτήρια σχεδιασμού για την κατηγορία φωτισμού ME3c

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του φωτιστικού, όπου επιλέξαμε το BGP322 με 48 LED (σχήμα 6.4).

Προσθήκη του φωτιστικού στην επιλογή



Philips BGP322 48xGRN-1S/740 DM Κατάλογος

Προσοχή: Οι συγκρίσεις για περισσότερους κατασκευαστές δεν είναι δυνατές!  
Γι' αυτό πρέπει να συγκρίνονται μόνο φωτιστικά του ίδιου τύπου.

Εκπομπή φωτός 1

Λάμπες: GRN-1S/740

Ρεύμα φωτός: 5040 lm

Επιλεγμένα φωτιστικά

1. Philips BGP322 48xGRN-1S/740 DM

Σχήμα 6.4: Επιλογή φωτιστικού



Στη συνέχεια το πρόγραμμα εμφανίζει τις διάφορες παραμέτρους σχεδιασμού και μας ζητάει να καθορίσουμε ποιές από αυτές θα έχουν σταθερές τιμές και ποιές θα μπορούν να μεταβάλλονται προκειμένου να βρεθεί η καλύτερη δυνατή λύση (σχ. 6.5).

Παράμετροι, που μπορούν να μεταβληθούν για τη βελτιστοποίηση:

Παράμετροι	Ελάχιστο	Μέγιστο	Εύρος βήματος	Μονάδα
<input checked="" type="checkbox"/> Απόσταση ιστών (καλόνες)	10.000	50.000	1.000	m
<input checked="" type="checkbox"/> Ύψος σημείου φωτός	6.000	10.000	0.500	m
<input checked="" type="checkbox"/> Προεξοχή φωτεινού σημείου	-2.000	1.000	0.500	m
<input checked="" type="checkbox"/> Κλίση	0	15	5	°

Αριθμός των συνδυασμών που θα ελεγχθούν: 10332

Σταθεροί παράμετροι για τη βελτιστοποίηση

Απόσταση ιστών:  m

Ύψος φωτεινού σημείου:  m


Προεξοχή φωτεινού σημείου:  m

Κλίση:  °

Απόσταση καλόνια-οδόστρωμα:  m

Μήκος βραχίονα:  m

Τύπος διάταξης



Σταθερή απόσταση ιστός-οδόστρωμα

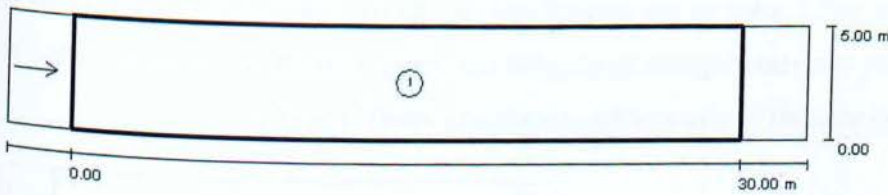
Σταθερό μήκος βραχίονα

Σχήμα 6.5: Επιλογή παραμέτρων σχεδιασμού

Όπως βλέπουμε, ζητήσαμε να μεταβάλλονται όλες οι παράμετροι ως εξής: Η απόσταση των ιστών από 10m έως 50m με βήμα 1m, το ύψος του φωτεινού σημείου από 6m έως 10m με βήμα 0.5m, την προεξοχή του φωτεινού σημείου από -2m έως 1m με βήμα 0.5m και την κλίση του φωτιστικού από 0° έως 15° με βήμα 5°. Επίσης από την οθόνη αυτή μπορούμε να επιλέξουμε τον τύπο της διάταξης των φωτιστικών σωμάτων.

Αρχικά υποθέσαμε ότι τα φωτιστικά είναι από την κάτω μεριά του δρόμου (μονόπλευρη διάταξη). Το πρόγραμμα έκανε τους υπολογισμούς για όλους τους συνδυασμούς των μεταβλητών παραμέτρων και έβγαλε ότι η χειρότερη αποδεκτή συνθήκη φωτισμού, την οποία και επιλέξαμε είναι: 30m απόσταση, 6m ύψος, 1m προεξοχή και 0° κλίση. Το πρόγραμμα προχώρησε σε λεπτομερή υπολογισμό όλων των μεγεθών, όπως φαίνεται στις αμέσως επόμενες σελίδες. Πρώτα βλέπουμε τη σελίδα με τα φωτοτεχνικά αποτελέσματα, που δείχνει ότι όλες οι απαιτήσεις του σχεδιασμού πληρούνται.

**Δρόμος 1 / Φωτοτεχνικά αποτελέσματα**



Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Κλίμακα 1:258

**Κατάλογος πεδίων αξιολόγησης**

- 1 Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1  
 Μήκος: 30.000 m, Πλάτος: 5.000 m  
 Κάναβος: 10 x 3 Σημεία  
 Αντίστοιχα στοιχεία δρόμου: Οδόστρωμα 1.  
 Ασφαλτικό σκυρόδεμα: R3, q0: 0.070  
 Επιλεγμένη κατηγορία φωτισμού: ΜΕ3c

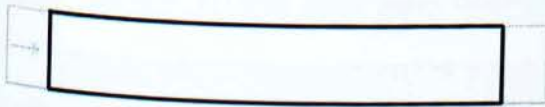
(Εκπληρούνται όλες οι φωτομετρικές απαιτήσεις.)

Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:  
 Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία:  
 Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:

$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	U1	TI [%]	SR
1.0	0.5	0.5	15	0.5
≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.5	≤ 15	≥ 0.5
✓	✓	✓	✓	✓

Στη συνέχεια βλέπουμε την κατανομή της έντασης φωτισμού (lx) πάνω στο οδόστρωμα σε μορφή πίνακα τιμών και σε διάγραμμα αποχρώσεων του γκρι.

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 / Πίνακας (E)**



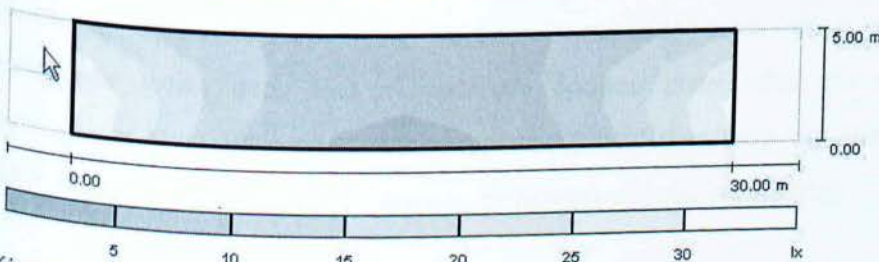
4.167	20	16	11	7.98	6.41	6.41	7.98	11	16	20
2.500	28	19	12	7.68	5.81	5.81	7.68	12	19	28
0.833	26	18	10	6.00	4.39	4.39	6.00	10	18	26
m	1.500	4.500	7.500	10.500	13.500	16.500	19.500	22.500	25.500	28.500

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Lux.

Κάναβος: 10 x 3 Σημεία

$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
13	4.39	28	0.331	0.159

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 / Αποχρώσεις γκρι (E)**



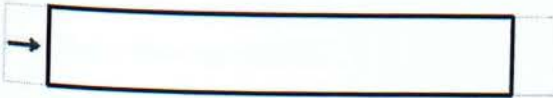
Κλίμακα 1 : 258

Κάναβος: 10 x 3 Σημεία

$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
13	4.39	28	0.331	0.159

Τέλος δίνεται η κατανομή λαμπρότητας ( $cd/m^2$ ) που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής που βρίσκεται στο κέντρο του δρόμου και σε ύψος 1.5m, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Παρατίθεται πίνακας τιμών και διάγραμμα αποχρώσεων του γκρι.

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 / Παρατηρητής 1 / Πίνακας (L)**



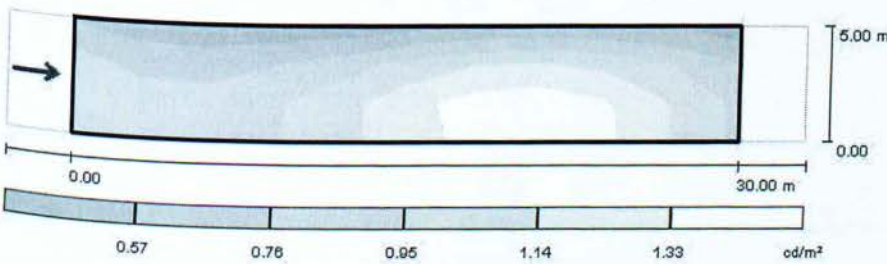
4.167	0.62	0.52	0.56	0.61	0.67	0.82	0.87	0.88	0.78	0.69
2.500	0.89	0.79	0.85	0.98	1.16	1.38	1.46	1.43	1.26	1.02
0.833	0.87	0.80	0.87	0.99	1.17	1.34	1.45	1.47	1.25	1.02
m	1.500	4.500	7.500	10.500	13.500	16.500	19.500	22.500	25.500	28.500

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Candela/m<sup>2</sup>.

Κάναβος: 10 x 3 Σημεία  
 Θέση του παρατηρητή: (-60.000 m, 2.500 m, 1.500 m)  
 Ασφαλικό σκυρόδεμα: R3, q0: 0.070

	$L_m$ [ $cd/m^2$ ]	U0	U1	TI [%]
Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:	1.0	0.5	0.5	15
Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία ME3c:	$\geq 1.0$	$\geq 0.4$	$\geq 0.5$	$\leq 15$
Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:	✓	✓	✓	✓

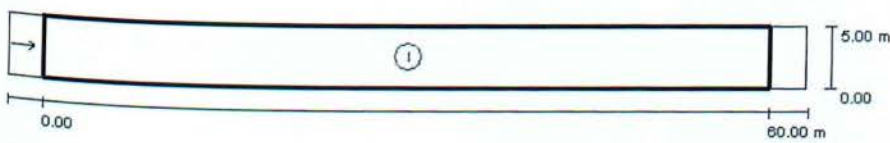
**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 / Παρατηρητής 1 / Αποχρώσεις γκρι (L)**



Κλίμακα 1 : 258

Για λόγους σύγκρισης επαναλάβαμε τους υπολογισμούς για τον ίδιο δρόμο, θεωρώντας ότι τα φωτιστικά τοποθετούνται και από τις δύο μεριές του δρόμου, μετατοπισμένα (αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη). Τη φορά αυτή το πρόγραμμα έβγαλε ότι οι χειρότερες αποδεκτές συνθήκες φωτισμού παρατηρούνται όταν η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ιστών στην ίδια πλευρά του δρόμου είναι 60m και οι τιμές των άλλων παραμέτρων είναι ίδιες όπως προηγουμένως (ύψος φωτεινού σημείου 6m, προεξοχή 1m, κλίση 0°). Τα αναλυτικά αποτελέσματα φαίνονται αμέσως παρακάτω.

**Δρόμος 1 / Φωτοτεχνικά αποτελέσματα**



Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Κλίμακα 1:472

**Κατάλογος πεδίων αξιολόγησης**

- 1 Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1
- Μήκος: 60.000 m, Πλάτος: 5.000 m
- Κάναβος: 20 x 3 Σημεία
- Αντίστοιχα στοιχεία δρόμου: Οδόστρωμα 1.
- Ασφαλτικό σκυρόδεμα: R3, q0: 0.070
- Επιλεγμένη κατηγορία φωτισμού: ME3c

(Εκπληρούνται όλες οι φωτομετρικές απαιτήσεις.)

Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:  
 Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία:  
 Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:

$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	U1	TI [%]	SR
1.0	0.5	0.5	15	0.5
≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.5	≤ 15	≥ 0.5
✓	✓	✓	✓	✓

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 / Πίνακας (Ε)**



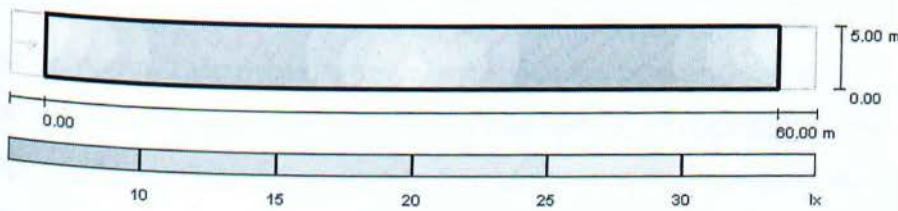
4.167	26	17	10	6.42	<u>5.13</u>	5.67	7.56	11	16	20
2.500	<u>28</u>	19	12	7.68	5.81	5.81	7.68	12	19	<u>28</u>
0.833	20	16	11	7.56	5.67	<u>5.13</u>	6.42	10	17	26
m	1.500	4.500	7.500	10.500	13.500	16.500	19.500	22.500	25.500	28.500
4.167	20	16	11	7.56	5.67	<u>5.13</u>	6.42	10	17	26
2.500	<u>28</u>	19	12	7.68	5.81	5.81	7.68	12	19	<u>28</u>
0.833	26	17	10	6.42	<u>5.13</u>	5.67	7.56	11	16	20
m	31.500	34.500	37.500	40.500	43.500	46.500	49.500	52.500	55.500	58.500

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Lux.

Κάναβος: 20 x 3 Σημεία

$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
13	5.13	28	0.388	0.187

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 / Αποχρώσεις γκρι (E)**



Κλίμακα 1 : 472

Κάναβος: 20 x 3 Σημεία

$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
13	5.13	28	0.388	0.187

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 / Παρατηρητής 1 / Πίνακας (L)**



4.167	0.74	0.57	0.53	0.55	0.62	0.78	0.85	0.88	0.81	0.75
2.500	0.89	0.79	0.85	0.98	1.16	1.38	1.46	1.43	1.26	1.02
0.833	0.75	0.75	0.90	1.05	1.22	1.37	1.47	1.47	1.22	0.96
m	1.500	4.500	7.500	10.500	13.500	16.500	19.500	22.500	25.500	28.500
4.167	0.76	0.77	0.91	1.06	1.23	1.38	1.47	1.47	1.22	0.96
2.500	0.89	0.79	0.85	0.98	1.16	1.38	1.46	1.43	1.26	1.02
0.833	0.74	0.57	0.54	0.57	0.64	0.80	0.87	0.89	0.81	0.75
m	31.500	34.500	37.500	40.500	43.500	46.500	49.500	52.500	55.500	58.500

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Candela/m<sup>2</sup>.

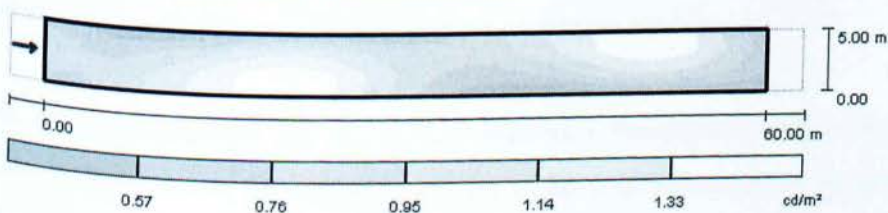
Κάναβος: 20 x 3 Σημεία

Θέση του παρατηρητή: (-60.000 m, 2.500 m, 1.500 m)

Ασφαλτικό σκυρόδεμα: R3, q0: 0.070

	$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	UI	TI [%]
Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:	1.0	0.5	0.5	15
Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία ΜΕ3c:	≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.5	≤ 15
Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:	✓	✓	✓	✓

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 / Παρατηρητής 1 / Αποχρώσεις γκρι (L)**



Κλίμακα 1 : 472

Παρατηρούμε ότι οι δύο τρόποι διάταξης των φωτιστικών δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Ειδικότερα, ο συντελεστής διαμήκους ομοιομορφίας ( $U_1$ ) είναι ο ίδιος και στις δυο περιπτώσεις, που σημαίνει ότι η κατανομή της λαμπρότητας κατά μήκος του δρόμου παρουσιάζει τις ίδιες αυξομειώσεις. Επιπλέον και οι δύο διατάξεις απαιτούν τον ίδιο αριθμό φωτιστικών σωμάτων.

### 6.3 Μελέτη φωτισμού για δρόμο με δύο ρεύματα και νησίδα (περίπτωση διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος)

Ως παράδειγμα εφαρμογής υψηλών απαιτήσεων παρουσιάζουμε ένα δρόμο διπλής κατεύθυνσης, με δύο λωρίδες κυκλοφορίας σε κάθε ρεύμα και νησίδα στη μέση (σχ. 6-6).

Όνομα δρόμου:

Συντελεστής συντήρησης:   Σχεδιασμός κατά DIN 5044

Προφίλ δρόμου

Πλάτος του στοιχείου:	Πλάτος (m)	Παραμέτρους
<input type="checkbox"/> Πεζοδρόμιο 2	<input type="text" value="2.000"/> m	Οδόστρωμα 2 Αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας: <input type="text" value="2"/> Ασφαλικό σκυρόδεμα: <input type="text" value="R3"/> αφ: <input type="text" value="0.07C"/> Ασφαλικό σκυρόδεμα U0 (υγρό): <input type="text" value="W3"/> αφ: <input type="text" value="0.20C"/>
<input type="checkbox"/> Ποδηλατόδρομος 2	<input type="text" value="2.000"/> m	
<input checked="" type="checkbox"/> Οδόστρωμα 2	<input type="text" value="7.000"/> m	Οδόστρωμα 1 Αριθμός λωρίδων κυκλοφορίας: <input type="text" value="2"/> Ασφαλικό σκυρόδεμα: <input type="text" value="R3"/> αφ: <input type="text" value="0.07C"/> Ασφαλικό σκυρόδεμα U0 (υγρό): <input type="text" value="W3"/> αφ: <input type="text" value="0.20C"/>
Μεσαία νησίδα	<input type="text" value="1.000"/> m	
<input checked="" type="checkbox"/> Οδόστρωμα 1	<input type="text" value="7.000"/> m	
<input type="checkbox"/> Ποδηλατόδρομος 1	<input type="text" value="2.000"/> m	
<input type="checkbox"/> Πεζοδρόμιο 1	<input type="text" value="2.000"/> m	

Σχήμα 6.6: Τα χαρακτηριστικά του δρόμου για το δεύτερο παράδειγμα

Για τον προσδιορισμό της κατηγορίας φωτισμού θεωρήσαμε ότι οι συνθήκες κυκλοφορίας είναι οι ίδιες και στα δύο ρεύματα και για το λόγο αυτό επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια κατηγορία φωτισμού για όλα τα πεδία αξιολόγησης (τα δύο οδοστρώματα και τη μεσαία νησίδα). Για να προσδιορίσουμε την κατηγορία αυτή συμπληρώσαμε το ερωτηματολόγιο του προγράμματος ως εξής:

- Η συνήθης ταχύτητα του βασικού χρήστη του δρόμου είναι υψηλή (>60 km/h)
- Εκτός από το βασικό χρήστη του δρόμου επιτρέπονται επίσης και τα αργά κινούμενα οχήματα (<40km/h). Όχι όμως οι ποδηλάτες και οι πεζοί.
- Η βασική καιρική κατάσταση είναι «στεγνός» και όχι «υγρός»
- Ο δρόμος συνδέεται με άλλους δρόμους με απλές διασταυρώσεις και υπάρχουν πάνω από 3 τέτοιες διασταυρώσεις ανά km.
- Πάνω από 25000 οχήματα περνούν από κάποιο σημείο του δρόμου κάθε μέρα.
- Δεν υπάρχει κάποια ζώνη σύγκρουσης
- Η πολυπλοκότητα του οπτικού πεδίου είναι «υψηλή» και όχι «κανονική»
- Η δυσκολία πλοήγησης χαρακτηρίζεται «κανονική» και όχι «υψηλή».
- Υψηλή στάθμη φωτεινότητας περιβάλλοντος (ενδοαστική περιοχή)

Από τις πληροφορίες αυτές το πρόγραμμα υπολόγισε ότι η απαιτούμενη κατηγορία φωτισμού είναι η ME3a. Οι αντίστοιχες απαιτήσεις σχεδιασμού φαίνονται στο σχ. 6-7.

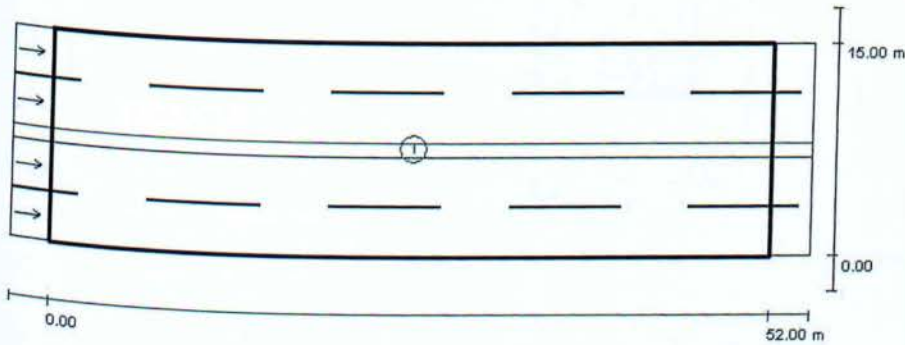
Παράμετροι	Οριακή τιμή	Μονάδα	Βάση
<input checked="" type="checkbox"/> Lm	1.0	cd/m <sup>2</sup>	(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> U0	0.4		(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> U1	0.7		(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> TI	15	%	(Πυκνότητα φωτεινότητας)
<input checked="" type="checkbox"/> SR	0.5		(Ένταση φωτισμού)

Σχήμα 6.7: Οι απαιτήσεις σχεδιασμού για την κατηγορία ME3a

Στην οθόνη επιλογής φωτιστικού (σχ. 6-4) διαλέξαμε το μοντέλο BGP323 160×GRN-1S/740 DM. Η επιλογή των υπολοίπων παραμέτρων σχεδιασμού έγινε όπως στο προηγούμενο παράδειγμα (σχ. 6-5). Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του προγράμματος, η μονόπλευρη διάταξη των φωτιστικών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί διότι δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της κατηγορίας ME3a για δρόμο αυτού του πλάτους. Με αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη οι χειρότερες αποδεκτές συνθήκες φωτισμού παρατηρούνται όταν η απόσταση μεταξύ των ιστών είναι 52m, το ύψος του φωτεινού σημείου είναι 10m, η προεξοχή -2m και η κλίση 15°. Η απλή αμφίπλευρη διάταξη μας δίνει τα ίδια αποδεκτά αποτελέσματα, αλλά εμφανίζει χειρότερο ποσοστό για την παράμετρο TI. Επομένως η αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη είναι πιο συμφέρουσα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα

αναλυτικά αποτελέσματα των υπολογισμών για την αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη έχουν ως εξής.

**Δρόμος 1 / Φωτοτεχνικά αποτελέσματα**



Συντελεστής συντήρησης: 0.80

Κλίμακα 1:415

**Κατάλογος πεδίων αξιολόγησης**

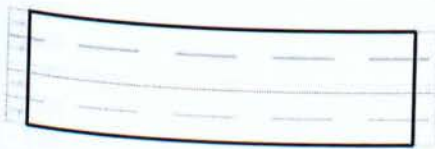
- 1 Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 & Οδόστρωμα 2  
 Μήκος: 52.000 m, Πλάτος: 15.000 m  
 Κάναβος: 18 x 15 Σημεία  
 Αντίστοιχα στοιχεία δρόμου: Οδόστρωμα 1, Μεσαία νησίδα 1, Οδόστρωμα 2.  
 Ασφαλτικό σκυρόδεμα: R3, q0: 0.070  
 Επιλεγμένη κατηγορία φωτισμού: ΜΕ3α

(Εκπληρούνται όλες οι φωτομετρικές απαιτήσεις.)

Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:  
 Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία:  
 Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:

$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	U1	TI [%]	SR
1.3	0.6	0.7	11	0.6
≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.7	≤ 15	≥ 0.5
✓	✓	✓	✓	✓

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 & Οδόστρωμα 2 / Πίνακας (Ε)**



14.500	35	31	25	19	15	12	10	9.20	8.83	8.83	9.20	10	12	15	19	25	31	35
13.500	35	31	25	20	17	14	12	11	10	10	11	12	14	17	20	25	31	35
12.500	33	30	25	21	17	15	13	12	12	12	13	15	17	21	25	30	33	
11.500	31	28	24	21	18	16	14	13	13	13	14	16	18	21	24	28	31	
10.500	28	26	23	20	18	16	15	15	14	14	15	15	16	18	20	23	26	28
9.500	25	24	22	20	18	17	16	16	16	16	16	16	17	18	20	22	24	25
8.500	23	22	20	19	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	19	20	22	23
7.500	20	20	19	18	18	18	19	20	20	20	20	19	18	18	18	19	20	20
6.500	18	18	18	18	18	19	20	22	23	23	22	20	19	18	18	18	18	18
5.500	16	16	16	17	18	20	22	24	25	25	24	22	20	18	17	16	16	16
4.500	14	15	15	16	18	20	23	26	28	28	26	23	20	18	16	15	15	14
3.500	13	13	14	16	18	21	24	28	31	31	28	24	21	19	16	14	13	13
2.500	12	12	13	15	17	21	25	30	33	33	30	25	21	17	15	13	12	12
1.500	10	11	12	14	17	20	25	31	35	35	31	25	20	17	14	12	11	10
0.500	8.83	9.20	10	12	15	19	25	31	35	35	31	25	19	15	12	10	9.20	8.83
m	1.444	4.333	7.222	10.111	13.000	15.889	18.778	21.667	24.556	27.444	30.333	33.222	36.111	39.000	41.889	44.778	47.667	50.556

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Lux.

Κάναβος: 18 x 15 Σημεία

$E_{n1}$  [lx]  
19

$E_{n1min}$  [lx]  
8.83

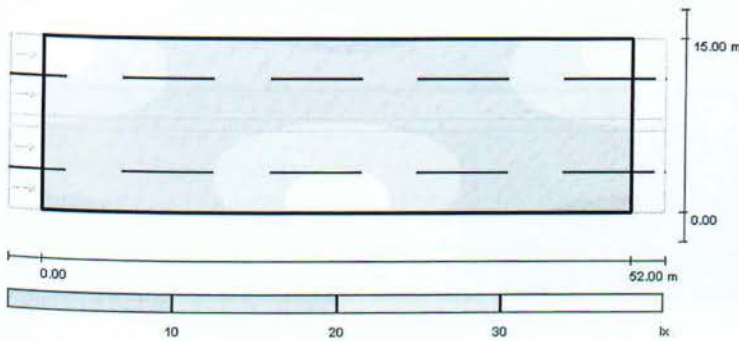
$E_{n1max}$  [lx]  
35

$E_{n1min} / E_{n1max}$   
0.457

$E_{n1min} / E_{n1max}$   
0.251



**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Αποχρώσεις γκρι (E)**

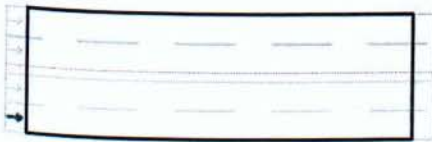


Κλίμακα 1 : 415

Κάναβος: 18 x 15 Σημεία

$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$
19	8.83	35	0.457	0.251

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Παρατηρητής 1 / Πίνακας (L)**



14.500	1.14	1.01	0.84	0.80	0.82	0.90	1.02	1.18	1.44	1.67	1.82	1.94	1.97	1.97	1.80	1.62	1.45	1.29
13.500	1.16	1.08	0.96	0.99	1.09	1.27	1.46	1.66	1.82	1.95	2.06	2.08	1.99	1.92	1.71	1.62	1.49	1.34
12.500	1.20	1.18	1.16	1.28	1.44	1.58	1.77	1.85	1.93	1.98	1.96	1.92	1.81	1.76	1.69	1.58	1.47	1.38
11.500	1.23	1.29	1.34	1.49	1.64	1.69	1.74	1.74	1.66	1.69	1.65	1.62	1.61	1.60	1.47	1.45	1.37	1.32
10.500	1.28	1.39	1.43	1.50	1.55	1.51	1.47	1.41	1.40	1.38	1.39	1.43	1.41	1.44	1.33	1.29	1.24	1.22
9.500	1.23	1.28	1.33	1.32	1.29	1.29	1.23	1.22	1.20	1.20	1.25	1.25	1.23	1.29	1.20	1.13	1.13	1.12
8.500	1.12	1.17	1.17	1.17	1.15	1.16	1.12	1.09	1.11	1.12	1.15	1.14	1.13	1.15	1.09	1.01	1.02	1.03
7.500	1.02	1.07	1.07	1.13	1.11	1.07	1.04	1.05	1.06	1.08	1.09	1.08	1.06	1.06	0.98	0.93	0.93	0.94
6.500	0.96	1.03	1.05	1.08	1.08	1.07	1.05	1.05	1.06	1.09	1.09	1.04	1.03	1.01	0.93	0.89	0.89	0.90
5.500	0.94	0.99	1.03	1.08	1.13	1.11	1.05	1.09	1.09	1.11	1.09	1.02	1.00	0.99	0.91	0.89	0.86	0.88
4.500	0.93	1.01	1.08	1.15	1.20	1.19	1.13	1.16	1.14	1.14	1.12	1.03	0.99	0.97	0.91	0.93	0.89	0.90
3.500	1.00	1.09	1.17	1.23	1.34	1.30	1.26	1.26	1.21	1.17	1.15	1.06	1.00	0.98	0.94	0.95	0.93	0.94
2.500	1.08	1.18	1.31	1.39	1.47	1.42	1.46	1.36	1.28	1.22	1.19	1.05	0.99	0.97	0.99	1.01	1.01	1.04
1.500	1.26	1.35	1.46	1.55	1.58	1.51	1.54	1.45	1.31	1.26	1.22	1.08	1.03	1.02	1.03	1.07	1.11	1.18
0.500	1.47	1.57	1.65	1.68	1.71	1.60	1.57	1.46	1.33	1.28	1.23	1.10	1.07	1.11	1.16	1.16	1.21	1.30
m	1.444	4.333	7.222	10.111	13.000	15.889	18.778	21.667	24.556	27.444	30.333	33.222	36.111	39.000	41.889	44.778	47.667	50.556

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Candela/m<sup>2</sup>.

Κάναβος: 18 x 15 Σημεία  
 Θέση του παρατηρητή: (-60.000 m, 1.750 m, 1.500 m)  
 Ασφαλτικό ακυρόδεμα: R3, q0: 0.070

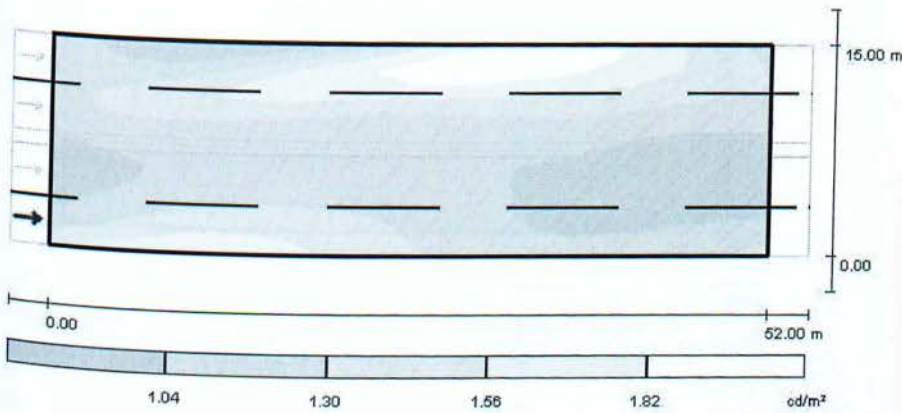
Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:

Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία ME3a:

Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:

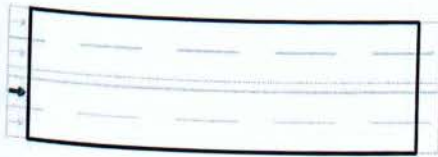
$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	U1	Π [%]
1.3	0.6	0.7	11
≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.7	≤ 15
✓	✓	✓	✓

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Παρατηρητής 1 / Αποχρώσεις γκρι (L)**



Κλίμακα 1 : 415

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Παρατηρητής 2 / Πίνακας (L)**



14.500	1.18	1.07	0.92	0.95	1.02	1.17	1.30	1.45	1.60	1.74	1.84	1.92	1.93	1.92	1.77	1.61	1.47	1.33
13.500	1.24	1.21	1.14	1.23	1.35	1.47	1.62	1.70	1.78	1.87	1.90	1.91	1.84	1.82	1.64	1.62	1.51	1.38
12.500	1.32	1.36	1.32	1.43	1.50	1.55	1.61	1.64	1.60	1.67	1.73	1.68	1.68	1.67	1.56	1.57	1.46	1.37
11.500	1.34	1.35	1.36	1.38	1.42	1.37	1.38	1.36	1.37	1.38	1.42	1.46	1.49	1.52	1.41	1.39	1.33	1.28
10.500	1.23	1.25	1.23	1.20	1.19	1.20	1.20	1.17	1.16	1.17	1.26	1.30	1.30	1.36	1.28	1.22	1.22	1.18
9.500	1.13	1.14	1.11	1.10	1.13	1.10	1.07	1.03	1.03	1.10	1.14	1.15	1.17	1.21	1.16	1.07	1.10	1.09
8.500	1.06	1.07	1.07	1.08	1.07	1.01	0.98	0.99	1.00	1.03	1.08	1.07	1.09	1.09	1.06	0.98	0.99	1.01
7.500	1.00	1.03	1.04	1.05	1.04	1.00	0.98	0.97	0.99	1.03	1.05	1.05	1.05	1.04	0.97	0.93	0.94	0.95
6.500	0.96	1.02	1.03	1.07	1.08	1.04	0.98	1.01	1.02	1.06	1.06	1.02	1.02	1.02	0.95	0.92	0.90	0.92
5.500	0.98	1.05	1.07	1.11	1.14	1.11	1.04	1.08	1.08	1.11	1.09	1.03	1.02	1.00	0.94	0.94	0.91	0.93
4.500	1.05	1.12	1.17	1.19	1.28	1.23	1.16	1.18	1.15	1.14	1.12	1.07	1.04	1.02	0.98	0.99	0.94	0.98
3.500	1.15	1.26	1.32	1.35	1.43	1.35	1.32	1.28	1.24	1.19	1.18	1.10	1.04	1.02	1.05	1.07	1.04	1.05
2.500	1.38	1.44	1.50	1.55	1.58	1.49	1.52	1.41	1.32	1.27	1.26	1.15	1.11	1.10	1.10	1.14	1.16	1.20
1.500	1.65	1.73	1.76	1.73	1.73	1.58	1.60	1.50	1.36	1.33	1.31	1.20	1.21	1.24	1.27	1.26	1.30	1.37
0.500	1.72	1.82	1.84	1.85	1.86	1.73	1.61	1.48	1.35	1.32	1.29	1.15	1.16	1.24	1.29	1.36	1.44	1.52
m	1.444	4.333	7.222	10.111	13.000	15.889	18.778	21.667	24.556	27.444	30.333	33.222	36.111	39.000	41.889	44.778	47.667	50.556

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Candela/m<sup>2</sup>.

Κάναβος: 18 x 15 Σημεία  
Θέση του παρατηρητή: (-60.000 m, 5.250 m, 1.500 m)  
Ασφαλτικό σκυρόδεμα: R3, q0: 0.070

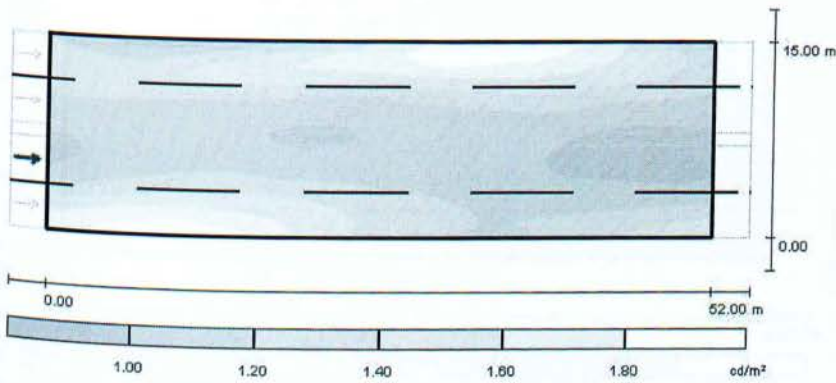
Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:

Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία ΜΕ3α:

Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:

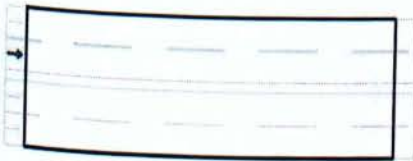
$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	U1	TI [%]
1.3	0.7	0.8	9
≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.7	≤ 15
✓	✓	✓	✓

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Παρατηρητής 2 / Αποχρώσεις γκρι (L)**



Κλίμακα 1 : 415

**Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Παρατηρητής 3 / Πίνακας (L)**



14.500	1.28	1.25	1.12	1.16	1.27	1.34	1.40	1.48	1.58	1.67	1.72	1.78	1.80	1.79	1.70	1.60	1.49	1.36
13.500	1.35	1.34	1.22	1.25	1.31	1.34	1.39	1.38	1.44	1.54	1.63	1.64	1.68	1.68	1.56	1.59	1.49	1.35
12.500	1.30	1.29	1.21	1.16	1.15	1.15	1.19	1.20	1.25	1.30	1.37	1.45	1.51	1.56	1.48	1.50	1.40	1.31
11.500	1.20	1.19	1.11	1.06	1.04	1.04	1.09	1.06	1.07	1.11	1.23	1.30	1.33	1.41	1.35	1.32	1.27	1.23
10.500	1.13	1.12	1.07	1.04	1.03	0.99	0.99	0.95	0.99	1.04	1.12	1.16	1.19	1.28	1.22	1.15	1.18	1.14
9.500	1.11	1.09	1.03	1.02	1.00	0.94	0.94	0.91	0.93	0.99	1.05	1.07	1.11	1.14	1.12	1.04	1.08	1.08
8.500	1.06	1.06	1.02	1.02	1.02	0.95	0.92	0.90	0.92	0.97	1.01	1.03	1.07	1.08	1.04	0.98	1.01	1.02
7.500	1.05	1.06	1.06	1.05	1.04	0.97	0.93	0.94	0.95	1.00	1.03	1.03	1.04	1.03	1.00	0.97	0.96	0.98
6.500	1.06	1.10	1.09	1.10	1.11	1.07	0.99	1.00	1.02	1.05	1.07	1.05	1.06	1.05	0.99	0.98	0.97	0.98
5.500	1.16	1.19	1.20	1.19	1.25	1.18	1.09	1.11	1.10	1.11	1.11	1.07	1.09	1.08	1.05	1.02	0.99	1.03
4.500	1.30	1.33	1.37	1.36	1.40	1.30	1.25	1.24	1.20	1.18	1.19	1.15	1.12	1.11	1.12	1.15	1.09	1.09
3.500	1.63	1.58	1.57	1.57	1.58	1.45	1.43	1.35	1.30	1.28	1.29	1.28	1.23	1.23	1.23	1.25	1.24	1.25
2.500	1.90	1.93	1.88	1.78	1.73	1.58	1.58	1.47	1.40	1.37	1.38	1.30	1.35	1.40	1.42	1.41	1.42	1.46
1.500	1.95	2.05	2.05	1.97	1.90	1.70	1.62	1.50	1.35	1.32	1.32	1.23	1.32	1.41	1.46	1.54	1.62	1.68
0.500	1.65	1.82	1.93	1.97	1.97	1.80	1.62	1.46	1.30	1.23	1.17	1.05	1.09	1.19	1.29	1.40	1.52	1.63
m	1.444	4.333	7.222	10.111	13.000	15.889	18.778	21.667	24.556	27.444	30.333	33.222	36.111	39.000	41.889	44.778	47.667	50.556

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Candela/m<sup>2</sup>.

Κάναβος: 18 x 15 Σημεία  
Θέση του παρατηρητή: (-60.000 m, 9.750 m, 1.500 m)  
Ασφαλτικό ακυρόδεμα: R3, q0: 0.070

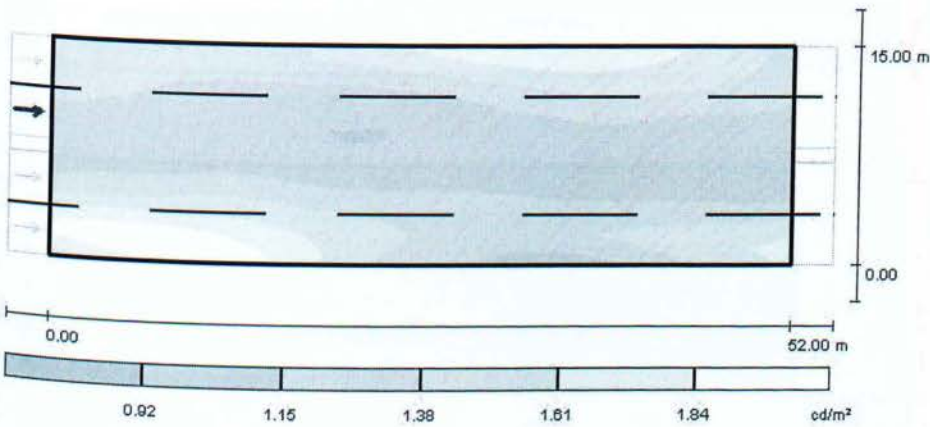
Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:

Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία ΜΕ3α:

Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:

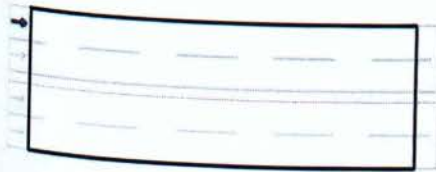
$L_m$ [cd/m <sup>2</sup> ]	U0	U1	Π [%]
1.3	0.7	0.8	9
≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.7	≤ 15
✓	✓	✓	✓

Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Παρατηρητής 3 / Αποχρώσεις γκρι (L)



Κλίμακα 1 : 415

Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδοστρώμα 1 & Οδοστρώμα 2 / Παρατηρητής 4 / Πίνακας (L)



14.500	1.29	1.25	1.11	1.09	1.14	1.18	1.22	1.23	1.32	1.43	1.54	1.62	1.66	1.69	1.59	1.57	1.46	1.32
13.500	1.26	1.22	1.08	1.03	1.03	1.04	1.07	1.11	1.19	1.26	1.35	1.46	1.55	1.57	1.51	1.54	1.45	1.31
12.500	1.22	1.19	1.04	0.98	0.96	0.98	1.00	1.00	1.03	1.10	1.20	1.32	1.39	1.48	1.42	1.45	1.36	1.28
11.500	1.18	1.15	1.05	1.00	0.97	0.92	0.94	0.91	0.95	1.02	1.11	1.19	1.24	1.35	1.31	1.26	1.26	1.21
10.500	1.14	1.11	1.03	0.99	0.96	0.89	0.92	0.87	0.88	0.95	1.05	1.10	1.16	1.21	1.20	1.14	1.16	1.15
9.500	1.12	1.10	1.04	1.01	0.98	0.91	0.88	0.85	0.88	0.94	1.00	1.03	1.10	1.12	1.11	1.04	1.09	1.08
8.500	1.12	1.10	1.06	1.04	1.02	0.92	0.89	0.87	0.89	0.95	1.02	1.03	1.06	1.07	1.06	1.01	1.03	1.05
7.500	1.13	1.14	1.11	1.09	1.08	1.00	0.95	0.93	0.95	1.00	1.05	1.06	1.09	1.07	1.03	1.02	1.02	1.03
6.500	1.22	1.23	1.20	1.18	1.19	1.12	1.03	1.04	1.04	1.07	1.10	1.08	1.09	1.12	1.08	1.05	1.02	1.06
5.500	1.36	1.34	1.35	1.31	1.35	1.24	1.17	1.16	1.14	1.16	1.18	1.17	1.17	1.15	1.16	1.15	1.11	1.10
4.500	1.70	1.59	1.54	1.51	1.50	1.36	1.34	1.28	1.25	1.26	1.29	1.32	1.29	1.29	1.30	1.29	1.25	1.25
3.500	2.03	2.00	1.83	1.74	1.67	1.50	1.45	1.36	1.33	1.34	1.38	1.38	1.43	1.49	1.51	1.48	1.45	1.46
2.500	2.14	2.24	2.14	1.99	1.87	1.62	1.58	1.45	1.34	1.31	1.34	1.30	1.43	1.53	1.58	1.67	1.72	1.69
1.500	1.86	2.06	2.16	2.12	2.06	1.82	1.63	1.47	1.31	1.24	1.21	1.12	1.21	1.34	1.45	1.60	1.72	1.80
0.500	1.32	1.61	1.86	1.96	1.98	1.84	1.63	1.44	1.27	1.18	1.08	0.92	0.94	1.01	1.15	1.28	1.44	1.59
m	1.444	4.333	7.222	10.111	13.000	15.889	18.778	21.667	24.556	27.444	30.333	33.222	36.111	39.000	41.889	44.778	47.667	50.556

Προσοχή: Οι συντεταγμένες αναφέρονται στην παραπάνω εικόνα. Τιμές σε Candela/m².

Κάναβος: 18 x 15 Σημεία  
Θέση του παρατηρητή (-60.000 m, 13.250 m, 1.500 m)  
Ασφαλικό ακυρόδεμα: R3, φθ 0.070

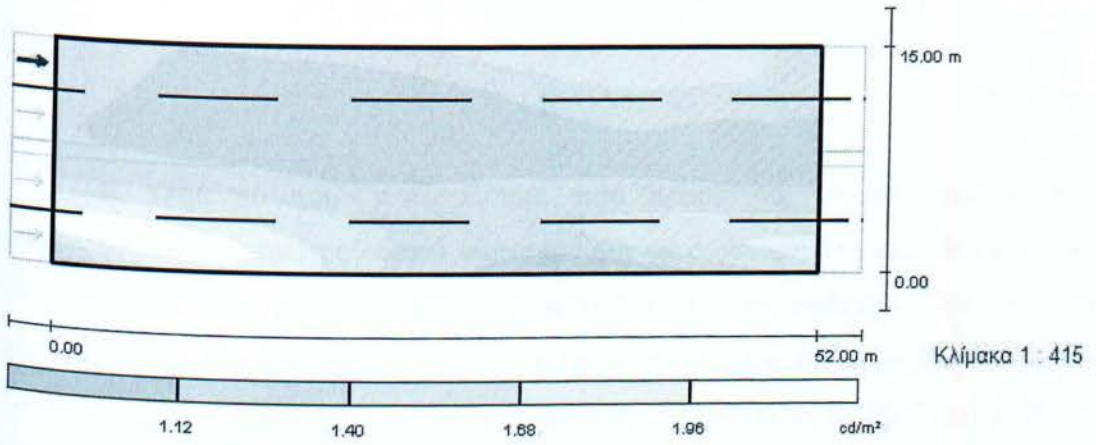
Πραγματικές τιμές σύμφωνα με τον υπολογισμό:

Ονομαστικές τιμές σύμφωνα με την κατηγορία ΜΕ3α:

Εκπληρείται/δεν εκπληρείται:

$L_m$ [cd/m²]	U0	U1	Τι [%]
1.3	0.7	0.7	11
≥ 1.0	≥ 0.4	≥ 0.7	≤ 15
✓	✓	✓	✓

Δρόμος 1 / Πεδίο αξιολόγησης Οδόστρωμα 1 & Οδόστρωμα 2 / Παρατηρητής 4 /  
Αποχρώσεις γκρι (L)



## 7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ”

Στο κεφάλαιο αυτό υπολογίζουμε κατά προσέγγιση το συνολικό κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος οδικού φωτισμού για τα συγκεκριμένα παραδείγματα δρόμων που εξετάσαμε στο κεφάλαιο 6. Μετά από έρευνα στο διαδίκτυο και τηλεφωνικής επικοινωνίας με την αντιπροσωπεία της Philips στην Ελλάδα βρήκαμε ότι ένα ενδεικτικό κόστος για τα φωτιστικά της σειράς Speedstar είναι 3000€ για το BGP322 και 3500€ για το BGP323 μαζί με την κολόνα, συμπεριλαμβάνοντας και τα έξοδα εγκατάστασης.

Όσον αφορά το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, στην ενότητα 5.4 υπολογίσαμε ότι για κάθε κολόνα χρειαζόμαστε 2 πλαίσια με ενδεικτικό κόστος 462.5 € το καθένα. Επομένως το κόστος ανά κολόνα θα είναι  $2 * 462.5 = 925$  €. Επιπλέον, όπως είδαμε στην ενότητα 5.5, κάθε φωτιστικό θα χρειαστεί 2 συσσωρευτές 12V, 70AH (υποθέτοντας ότι χρησιμοποιούμε τη λύση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια των 24V που όπως είδαμε είναι προτιμότερη από πολλές απόψεις). Από ιστοσελίδες εμπόρων που δραστηριοποιούνται στην ελληνική αγορά (π.χ. [113]) βρήκαμε ότι μια ενδεικτική τιμή για κάθε τέτοιο συσσωρευτή είναι τα 110€. Συνεπώς για τους 2 συσσωρευτές θα χρειαστούμε 220€ ανά κολόνα. Τέλος υπάρχει το κόστος για τους φορτιστές και τους αντιστροφείς. Σύμφωνα με όσα αναφέραμε στις ενότητες 5.6.1-5.6.2 το κόστος αυτό μπορεί να είναι περίπου 100€ ανά κολόνα. Συνολικά λοιπόν το κόστος του συστήματος θα είναι  $3000+925+220+100 = 4245$ € ανά κολόνα, από τα οποία τα 3000€ είναι για το φωτισμό και τα υπόλοιπα 1245 αφορούν τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Στο κεφάλαιο 6 είδαμε ότι για ένα μικρών απαιτήσεων δρόμο (μία λωρίδα κυκλοφορίας, κατηγορία φωτισμού ME3c) η μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των φωτιστικών είναι 30m. Επομένως σε κάθε km του δρόμου θα πρέπει να τοποθετηθούν 33 φωτιστικά. Με βάση τα παραπάνω, το αντίστοιχο κόστος ανά km θα είναι  $33 * 4245 = 140085$ €.

Όσον αφορά το διασυνδεδεμένο σύστημα, όπως είδαμε θα χρειαστούμε 3-6 φωτοβολταϊκά πλαίσια ανά κολόνα, που κοστίζουν από  $3 * 462.5 = 1387.5$ € έως  $6 * 462.5 = 2775$ €. Λαμβάνοντας υπόψιν και τα 138.4€ ανά κολόνα που υπολογίσαμε στην ενότητα 5.6.2

για το κόστος του αντιστροφέα βρίσκουμε ότι το συνολικό κόστος ανά κολόνα θα είναι από  $3500+1387.5+138.4 = 5025.9\text{€}$  έως  $3500+2775+138.4 = 6413.4\text{€}$ , ανάλογα με το βαθμό αυτονομίας του συστήματος (τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που αντιστοιχούν σε κάθε κολόνα). Στο κεφ. 6 βρήκαμε ότι στην εφαρμογή του διασυνδεδεμένου συστήματος οι κολόνες θα πρέπει να τοποθετηθούν σε αμφίπλευρη τριγωνική διάταξη και σε απόσταση 52m η μια από την άλλη. Επομένως σε κάθε km του δρόμου θα πρέπει να τοποθετηθούν 19 κολόνες από κάθε πλευρά, δηλαδή συνολικά 38 κολόνες. Το κόστος του συστήματος ανά km δρόμου θα είναι από  $38 * 5025.9 = 190984.2\text{€}$  έως  $38 * 6413.4 = 243709.2\text{€}$ , ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ο αριθμός αυτός θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να καθιστά συμφέρουσα την όλη επένδυση, λαμβάνοντας υπόψιν τα ποσά ενέργειας που υπολογίστηκαν στην ενότητα 5.4 και τις αντίστοιχες τιμές αγοράς και πώλησης της kWh.

## 8<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ”

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα φωτισμού για δρόμους μέσα στην πόλη με χρήση λαμπτήρων τεχνολογίας LED. Για λόγους σύγκρισης και πιο ολοκληρωμένης παρουσίασης διερευνήθηκε επίσης και η περίπτωση ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος για δρόμους με μεγαλύτερες απαιτήσεις φωτισμού. Πραγματοποιήθηκε μια εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα στο διαδίκτυο με σκοπό την κατανόηση των σχετικών τεχνολογιών και την εξοικείωση με τα προβλήματα του χώρου και τις διαθέσιμες λύσεις που κυκλοφορούν στην αγορά. Στη συνέχεια έγιναν λεπτομερείς υπολογισμοί όλων των τεχνικών παραμέτρων του συστήματος καθώς και μια εκτίμηση του συνολικού κόστους. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- Η σύγχρονη τεχνολογία των φωτοβολταϊκών μπορεί να αποτελέσει μια πολύ καλή λύση για εφαρμογές οδικού φωτισμού τροφοδοτούμενες από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Οι λαμπτήρες LED προσφέρονται ιδιαίτερα για το φωτισμό δρόμων καθώς προσφέρουν υψηλή ποιότητα φωτισμού, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και μεγάλη διάρκεια ζωής ενώ συμβάλλουν ουσιαστικά και στην προστασία του περιβάλλοντος.
- Σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα οδικού φωτισμού μεγάλο μέρος των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων μένει αναξιοποίητο για μεγάλο μέρος του έτους καθώς χρειάζεται μόνο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κατά τους χειμερινούς μήνες χαμηλής ηλιοφάνειας. Για το λόγο αυτό ίσως συμφέρει καλύτερα να μη βασίζεται το σύστημα αποκλειστικά στην ηλιακή ενέργεια αλλά να μπορεί να χρησιμοποιεί και άλλες βοηθητικές πηγές όποτε χρειάζεται.
- Η εγκατάσταση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος φωτισμού με λαμπτήρες LED σε δρόμους υψηλής κυκλοφορίας έχει αρκετά μεγάλο κόστος. Για το λόγο αυτό τέτοια συστήματα είναι πιο κατάλληλα για δρόμους χαμηλής και μέτριας κυκλοφορίας ή άλλους χώρους που δεν έχουν αυξημένες απαιτήσεις φωτισμού (π.χ. πλατείες, χώροι στάθμευσης, κλπ).



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [2] Δ. Χασάπης, «Εφαρμογές Ηλιακών Θερμικών Συστημάτων», *Παρουσίαση σεμιναρίου «Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αφαλάτωσης»*, ΚΑΠΕ, 2009, [http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/prodes3/PRODES\\_solar\\_thermal.pdf](http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/prodes3/PRODES_solar_thermal.pdf), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [3] [http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό\\_σύστημα](http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_σύστημα), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [4] <http://www.pvresources.com/en/history.php>, πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [5] [http://64.82.101.14/solar/solar-roadmap/solar\\_how-to/history-of-solar.htm](http://64.82.101.14/solar/solar-roadmap/solar_how-to/history-of-solar.htm), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [6] <http://www.solarbuzz.com/statsCosts.htm>, πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [7] Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ), «Η αγορά φωτοβολταϊκών», Σεπτέμβριος, 2007, [http://www.helapco.gr/library/PV\\_Market\\_Sep07.pdf](http://www.helapco.gr/library/PV_Market_Sep07.pdf), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [8] REN21, “Renewables Global Status Report: 2009 Update”, [http://www.ren21.net/pdf/RE\\_GSR\\_2009\\_update.pdf](http://www.ren21.net/pdf/RE_GSR_2009_update.pdf), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [9] James Russel, “Record growth in photovoltaic capacity and momentum builds for concentrating solar power”, <http://vitalsigns.worldwatch.org/vs-trend/record-growth-photovoltaic-capacity-and-momentum-builds-concentrating-solar-power>, πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [10] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), “Collection of Statistical Data on Solar Energy Applications in Greece”, 2001, [http://www.cres.gr/kape/pdf/datainfo/final\\_rev.pdf](http://www.cres.gr/kape/pdf/datainfo/final_rev.pdf), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [11] S. Tselepis, “The current state of the PV market and industrial activities in Greece”, 24<sup>th</sup> EU PVSEC, 2009, Hamburg, 6DV.2.4, <http://www.cres.gr/kape/publications/photovol/new/6DV.2.4preprintf.pdf>, πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [12] <http://www.solarserver.de/wissen/photovoltaik-e.html>, πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [13] <http://www.homesolarandwindinfo.com/solar-cell-efficiency/>, πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [14] [http://www.selasenergy.gr/fv\\_systems.php](http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php), πρόσβαση Ιούλιος 2010

- [15] U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency and Renewable Energy*, [http://apps1.eere.energy.gov/solar/cfm/faqs/third\\_level.cfm/name=Photovoltaics/cat=The%20Basics#Q43](http://apps1.eere.energy.gov/solar/cfm/faqs/third_level.cfm/name=Photovoltaics/cat=The%20Basics#Q43), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [16] Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ), «Φωτοβολταϊκά, ένας πρακτικός οδηγός», Απρίλιος, 2008, [http://www.helapco.gr/library/PV\\_Guide\\_Apr08.pdf](http://www.helapco.gr/library/PV_Guide_Apr08.pdf), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [17] PsiGroup, «Οδηγός για τη δημιουργία μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων», [http://www.psigroup.gr/documents/odigos\\_PB\\_PSIGroup.pdf](http://www.psigroup.gr/documents/odigos_PB_PSIGroup.pdf), πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [18] <http://el.wikipedia.org/wiki/Πυρίτιο>, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [19] Εκπαιδευτικές ιστοσελίδες ερευνητικού κέντρου Jefferson Lab, <http://education.jlab.org/itselemental/ele014.html>, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon>, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [21] [http://en.wikipedia.org/wiki/Street\\_light](http://en.wikipedia.org/wiki/Street_light), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [22] G. Woodbury, “Energy Efficient Streetlights and Outdoor Lighting Workshop”, [http://www.tvcog.com/pdf/Outdoor\\_Lighting\\_Presentation.ppt](http://www.tvcog.com/pdf/Outdoor_Lighting_Presentation.ppt), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [23] Κ. Τζανάνη, «Όραση και οδικός φωτισμός», Sun and Shadow Magazine, 15, 2007, [http://www.sunandshadow.gr/data/Articles/489/orasi\\_eidikos\\_fotismos.pdf](http://www.sunandshadow.gr/data/Articles/489/orasi_eidikos_fotismos.pdf), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [24] P.R. Boyce, “Human Factors in Lighting”, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, 2003, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [25] F.R. Beyer, K. Ker, “Street lighting for preventing road traffic injuries”, 2010, [http://www.thecochranelibrary.com/SpringboardWebApp/userfiles/ccoch/file/Safety\\_on\\_the\\_road/CD004728.pdf](http://www.thecochranelibrary.com/SpringboardWebApp/userfiles/ccoch/file/Safety_on_the_road/CD004728.pdf), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [26] <http://racairo.ee/en/faq/pupil-lumens>, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [27] [http://www.visual-3d.com/Education/LightingLessons/Documents/Photopic\\_and\\_scotopic\\_lumens\\_3.pdf](http://www.visual-3d.com/Education/LightingLessons/Documents/Photopic_and_scotopic_lumens_3.pdf), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [28] D. Erdman, “Photopic and Scotopic- The “eyes” have it”, [http://www.gelighting.com/na/business\\_lighting/education\\_resources/literature\\_library/white\\_papers/download/photopic\\_scotopic\\_lb.pdf](http://www.gelighting.com/na/business_lighting/education_resources/literature_library/white_papers/download/photopic_scotopic_lb.pdf), πρόσβαση Αύγουστος 2010

- [29] S. Berman, "Tuning the light spectrum to improve energy efficiency", IAEEL Newsletter 2/92, από την ηλεκτρονική διεύθυνση [http://www.iaeel.org/IAEEL/News/1992/tva1992/HumFa\\_2\\_92.html](http://www.iaeel.org/IAEEL/News/1992/tva1992/HumFa_2_92.html), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [30] S. Berman, "Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitivity", Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter 1992, από την ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.naturalux.com/Energy.htm>, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [31] S. Berman, "The re-engineering of lighting photometry", IESNA, <http://www.bluebellgroupinc.com/63.pdf>, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [32] [http://www1.eere.energy.gov/buildings/spectrally\\_enhanced.html](http://www1.eere.energy.gov/buildings/spectrally_enhanced.html), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [33] [http://www.webelements.com/silicon/crystal\\_structure.html](http://www.webelements.com/silicon/crystal_structure.html), πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [34] Κ. Καγκαράκης, «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1992., πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [35] Ν.Σ. Σπύρου, «Αγώγιμες Ιδιότητες των Ηλεκτροτεχνικών Υλικών», Εκδόσεις Τζιόλα, 2005., πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [36] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, «Φωτοβολταϊκά συστήματα», Εκδόσεις Ζήτη, 2007, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [37] Δ. Συγκρίδου, «Μετρήσεις χαρακτηριστικών ρεύματος τάσης φωτοβολταϊκών πλαισίων μονοκρυσταλλικού Si υπό πραγματικές συνθήκες», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2009, πρόσβαση Αύγουστος 2010
- [38] J. Jeong, "Photovoltaics: Measuring the Sun", OptoIQ, <http://www.optoIQ.com/index/photronics-technologies-applications/lfw-display/lfw-article-display/361941/articles/laser-focus-world/features/photovoltaics-measuring-the-sun.html>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [39] <http://www.wisegeek.com/what-are-the-different-generations-of-solar-cells.htm>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [40] [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [41] Ν. Καλαμαράς, «Υβριδικά φωτοβολταϊκά θερμικά (ΦΒ/Θ) συστήματα νερού», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2007, πρόσβαση Νοέμβριος 2010

- [42] Δ.Π. Χικιμτζής, «Μελέτη φωτισμού οδικών σηράγγων κατά CIE 88-1990 με χρήση υπολογιστή», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2003., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [43] Γ.Α. Αμπαρτζής, «Φωτισμός δρόμων και εξωτερικών χώρων με LED τροφοδοτούμενα από φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2009., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [44] Φ. Τοπαλής, «Φωτοτεχνία, βασικές αρχές φωτομετρίας και μελέτες φωτισμού», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [45] Commission Internationale de l' Eclairage (CIE) "Mesopic Photometry History, Special Problems and Practical Solutions", CIE Pub 81, 1<sup>st</sup> Edition, 1989, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [46] [http://greenenergia.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=35&Itemid=4](http://greenenergia.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=35&Itemid=4)  
6, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [47] <http://www.actewagl.com.au/education/energy/renewableenergy/solarenergy/howsolearcellwork.aspx>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [48] Γ. Ιωαννίδης, Σημειώσεις Εργαστηρίου Φωτοτεχνίας, ΤΕΙ Πειραιά, Τμ. Ηλεκτρολογίας., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [49] I. Lewin, "Lumen Effectiveness Multipliers for Outdoor Lighting Design", Illuminating Engineering Society, Paper No 50, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [50] Φυλλάδιο Philips, "LED for livable cities" από την ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.because.philips.com/downloads/LED-for-livable-cities.pdf>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [51] [http://www.lighting.philips.com/gl\\_en/news/press/innovations/2006/citysoul.php](http://www.lighting.philips.com/gl_en/news/press/innovations/2006/citysoul.php), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [52] Philips data sheet για τη σειρά City Soul Led, ηλεκτρονική διεύθυνση [http://download.p4c.philips.com/14bt/3/328723/328723\\_ffs\\_eng.pdf](http://download.p4c.philips.com/14bt/3/328723/328723_ffs_eng.pdf), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [53] Philips data sheet για τη σειρά Mini City Soul Led, ηλεκτρονική διεύθυνση [http://download.p4c.philips.com/14bt/3/327153/327153\\_ffs\\_eng.pdf](http://download.p4c.philips.com/14bt/3/327153/327153_ffs_eng.pdf), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [54] Philips Lighting "Views and Solutions – Spring 2010" (κατάλογος προϊόντων), πρόσβαση Ιούλιος 2010

- [55] Κ.Α. Μπουρούσης, Μ.Δ. Αθανασοπούλου, «Φωτισμός Δρόμων με Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Σύστημα», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Ιούνιος 2004., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [56] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solres.htm>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [57] [http://s-ol-ar.gr/foto\\_systymata.html](http://s-ol-ar.gr/foto_systymata.html), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [58] <http://www.solar-systems.gr/solar-panel-pv-6.html>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [59] [http://williams.best.vwh.net/sunrise\\_sunset\\_algorithm.htm](http://williams.best.vwh.net/sunrise_sunset_algorithm.htm), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [60] <http://www.solartec.gr/grpvpanels.htm>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [61] Datasheet inverter της εταιρείας Conergy για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα [http://www.solartec.gr/pdf/inverters/conergymic350\\_1500.pdf](http://www.solartec.gr/pdf/inverters/conergymic350_1500.pdf), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [62] Data sheet της Sharp για τη σειρά φωτοβολταϊκών πλαισίων NU [http://www.solartec.gr/pdf/panels/sharp\\_nu\\_series185w\\_180w\\_175w\\_170w.pdf](http://www.solartec.gr/pdf/panels/sharp_nu_series185w_180w_175w_170w.pdf), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [63] <http://www.coursertech.com.cn/english/productss.asp?catid=190&id=190>, πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [64] <http://www.dialux.com/>, πρόσβαση Ιούλιος 2010
- [65] [http://en.wikipedia.org/wiki/Mesopic\\_vision](http://en.wikipedia.org/wiki/Mesopic_vision), πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [66] Μ.Δ. Βαλσαμάκης, «Φωτισμός δρόμων και εξοικονόμηση ενέργειας», Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2008., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [67] M.S. Rea, J.D. Bullough, J.P. Freyssinier-Nova, A. Bierman “A proposed unified system of photometry”, *Lighting Research and Technology*, 2004, 36, pp. 85-111., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [68] E. Marjukka, L. Halonen (Eds) “Performance based model for mesopic photometry”, Report No 35 of the project MOVE (Mesopic Optimisation of Visual Efficiency), realized under the “Competitive and Sustainable Growth” program, 2005., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [69] Δ. Τσανακτσίδης, Δ. Τσίτσουλας, «Σύγχρονα συστήματα εξοπλισμού των οδών», Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2003., πρόσβαση Νοέμβριος 2010

- [70] Π.Ν. Μπαρτσακούλιας, «Μεταβολές στις προδιαγραφές και τα οικονομοτεχνικά στοιχεία εγκαταστάσεων οδικού φωτισμού που προκύπτουν από την υιοθέτηση της μεσοπικής θεώρησης», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2006., πρόσβαση Νοέμβριος 2010
- [71] M. Ellis and Associates, “Design Energy Limits for Main Road Lighting”, Report prepared for the Australian Greenhouse Office and National Appliance and Equipment Energy Efficiency Company (NAEEEC), September 2005, <http://www.energyrating.gov.au/library/pubs/200518-meps-streetlight.pdf>, πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [72] [http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode), πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [73] [http://www.ledlights.ca/led\\_news\\_1.php](http://www.ledlights.ca/led_news_1.php), πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [74] <http://www1.gantep.edu.tr/~bgonul/dersnotlari/sc/LED.ppt>, πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [75] <http://www.toolbase.org/Technology-Inventory/Electrical-Electronics/white-LED-lighting>, πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [76] <http://gadgets.softpedia.com/news/History-of-LEDs-Light-Emitting-Diodes-1487-01.html>, πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [77] <http://www.creelighting.com/Demos/Commercial-Government/Sentry.aspx>, πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [78] <http://www.fluorescentefficiency.com/articles/led-articles/advantages-of-led-lighting/>, πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [79] [http://en.wikipedia.org/wiki/LED\\_lamp](http://en.wikipedia.org/wiki/LED_lamp), πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [80] Justin Maeers, “LED Misrepresentations”, *Modern Building Services*, May, 2010, [http://www.modbs.co.uk/news/fullstory.php/aid/7779/LED\\_misrepresentations.html](http://www.modbs.co.uk/news/fullstory.php/aid/7779/LED_misrepresentations.html), πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [81] [http://www.eterna leds.com/The\\_Definitive\\_LED\\_Light\\_Bulb\\_Buying\\_Guide\\_a/220.htm](http://www.eterna leds.com/The_Definitive_LED_Light_Bulb_Buying_Guide_a/220.htm), πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [82] [http://www.lrc.rpi.edu/programs/DELTA/pdf/FTDelta\\_LEDStreetLighting.pdf](http://www.lrc.rpi.edu/programs/DELTA/pdf/FTDelta_LEDStreetLighting.pdf), πρόσβαση Φεβρουάριος 2011
- [83] B. Anton, “Environmental benefits of led lighting”, άρθρο στην ιστοσελίδα <http://www.alumbo.com/article/35064-Environmental-Benefits-of-LED-Lighting.html>, πρόσβαση Φεβρουάριος 2011

- [84] G. Childs, “Led bulbs quickly replacing lights for everyday use”, ιστοσελίδα [http://www.campusprogress.org/articles/led\\_bulbs\\_quickly\\_replacing\\_incandescent\\_lights\\_for\\_everyday\\_use/](http://www.campusprogress.org/articles/led_bulbs_quickly_replacing_incandescent_lights_for_everyday_use/), πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [85] <http://www.consumersearch.com/light-bulbs/important-features>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [86] <http://www.theledlight.com/>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [87] <http://www.ledmegastore.gr>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [88] <http://www.ledsmagazine.com/products/25702>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [89] <http://www.everbrightlights.com/street.html>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [90] <http://www.led-landscape-lighting.com/>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [91] [http://www.coolon.com.au/ind\\_projector.php](http://www.coolon.com.au/ind_projector.php), πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [92] [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_LED\\_failure\\_modes](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_LED_failure_modes), πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [93] U.S. Department of Energy, “Lumen Depreciation”, ιστοσελίδα στη διεύθυνση <https://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/depreciation.html>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [94] C. Richardson, “Matching Driver to Led”, National Semiconductor white paper, [http://www.national.com/appinfo/power/files/National\\_LED\\_White\\_Paper.pdf](http://www.national.com/appinfo/power/files/National_LED_White_Paper.pdf), πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [95] <http://greenlighting.co.uk/products/residential-lighting/>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [96] <http://www.ledlightsorient.com/docs/LEDVSHPS.pdf>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [97] <http://newzstreet.com/lucknow/2010/04/27/lucknow-to-get-led-street-light>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [98] <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/undercabinet.html>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [99] [http://garden-pond-filters.com/pond\\_light\\_review.htm](http://garden-pond-filters.com/pond_light_review.htm), πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [100] <http://www.oceanled.co.uk/>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [101] Y. Freemark, “The Future of Streetlights: 6 Brilliant New Concepts”, άρθρο στην ιστοσελίδα <http://www.infrastructurist.com/2009/04/28/the-future-of-streetlights-6-brilliant-new-concepts/>, πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [102] Siemens AG, “Pictures of the future”, άρθρο στην ιστοσελίδα [http://www.siemens.com/innovation/en/publications/publications\\_pof/pof\\_spring\\_2010/green\\_cities/led\\_streetlights.htm](http://www.siemens.com/innovation/en/publications/publications_pof/pof_spring_2010/green_cities/led_streetlights.htm), πρόσβαση Μάρτιος 2011
- [103] <http://www.advanced-led.com/future/>, πρόσβαση Απρίλιος 2011

- [104] [http://www.forumforthefuture.org/greenfutures/articles/LED\\_street\\_lighting](http://www.forumforthefuture.org/greenfutures/articles/LED_street_lighting), πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [105] <http://www.solar-street-lighting.com/>, πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [106] <http://sroeco.com/solar/learn-solar/solar-panel-comparison/>, πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [107] <http://sroeco.com/solar/choose-the-best-value-solar-system>, πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [108] <http://www.pvresources.com/en/module.php>, πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [109] <http://www.iqsolarpower.com/pvsize.htm>, πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [110] [http://www.windsun.com/Batteries/Battery\\_FAQ.htm](http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm), πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [111] [http://www.windsun.com/Batteries/Battery\\_types.htm](http://www.windsun.com/Batteries/Battery_types.htm), πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [112] Α. Παπαδημητράκης, «Λειτουργία και τεχνικοοικονομική μελέτη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών, 2009., πρόσβαση Απρίλιος 2011
- [113] [http://www.1-solar.gr/battery\\_batteries/index.htm](http://www.1-solar.gr/battery_batteries/index.htm), πρόσβαση Μάϊος 2011
- [114] <http://www.iqsolarpower.com/pvchargecontroller.htm>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [115] <http://www.freesunpower.com/chargecontrollers.php>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [116] [http://www.leonics.com/support/article2\\_14j/articles2\\_14j\\_en.php](http://www.leonics.com/support/article2_14j/articles2_14j_en.php), πρόσβαση Μάϊος 2011
- [117] <http://www.eshops.gr/index.php?act=viewCat&catId=17>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [118] <http://www.solar.com.gr/el/controllers.asp>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [119] <http://antoniou24.skrouzstore.gr/p.Rythmistis-fortisis-20-Ampere-Phocos-PL-20-Charge-Controller.111262.html>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [120] <http://solar.altestore.com/energy/36%20Volt%20Charge%20Controller>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [121] <http://www.freesunpower.com/inverters.php>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [122] <http://www.iqsolarpower.com/inverter.htm>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [123] <http://www.bdbatteries.com/inverterconsiderations.php>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [124] <http://www.solar-facts.com/inverters/inverter-choice.php>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [125] <http://www.solar-systems.gr/inverter/index.htm>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [126] <http://www.pv-installer.net>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [127] <http://www.solarshop-europe.net>, πρόσβαση Μάϊος 2011



- [128] “Sunny Island 2012/2224” datasheet της SMA από την ηλεκτρονική διεύθυνση [http://download.solarshop.net/english/uploads/SI2012\\_2224-DEN082212.pdf](http://download.solarshop.net/english/uploads/SI2012_2224-DEN082212.pdf), πρόσβαση Μάϊος 2011
- [129] “Sunny Island 3324/4248” datasheet της SMA από την ηλεκτρονική διεύθυνση [http://download.solarshop.net/english/uploads/SI3324\\_4248-11-BE2306.pdf](http://download.solarshop.net/english/uploads/SI3324_4248-11-BE2306.pdf), πρόσβαση Μάϊος 2011
- [130] <http://www.spitia.gr/greek/aiforos/ananeosimes/ape.htm>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [131] <http://www.ledsmagazine.com/news/8/2/21>, πρόσβαση Μάϊος 2011
- [132] Philips data sheet για τη σειρά SpeedStar LED, ηλεκτρονική διεύθυνση [http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/330540/speedstar\\_bgp321\\_330540\\_ffs\\_aen.pdf](http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/330540/speedstar_bgp321_330540_ffs_aen.pdf), πρόσβαση Ιούνιος 2011
- [133] Philips data sheet για το φωτιστικό SpeedStar BGP 322, ηλεκτρονική διεύθυνση [http://download.p4c.philips.com/l4b/9/910503814318\\_eu/910503814318\\_eu\\_pss\\_eng.pdf](http://download.p4c.philips.com/l4b/9/910503814318_eu/910503814318_eu_pss_eng.pdf), πρόσβαση Ιούνιος 2011
- [134] Philips data sheet για το φωτιστικό SpeedStar BGP 323, ηλεκτρονική διεύθυνση [http://download.p4c.philips.com/l4b/9/910503812718\\_eu/910503812718\\_eu\\_pss\\_aen.pdf](http://download.p4c.philips.com/l4b/9/910503812718_eu/910503812718_eu_pss_aen.pdf), πρόσβαση Ιούνιος 2011

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται οι πλήρεις πίνακες με τις τιμές της πυκνότητας ισχύος ανά δεκαπεντάλεπτο, όπως τις υπολόγισε το πρόγραμμα PVGIS τη συγκεκριμένη ημέρα και ώρα που έγιναν οι υπολογισμοί της παρούσας εργασίας (παρατηρήθηκε ότι επαναλαμβάνοντας τους ίδιους υπολογισμούς κάποια άλλη μέρα μπορεί να πάρουμε λίγο διαφορετικά αποτελέσματα, πιθανότατα λόγω αλλαγών, ενημερώσεων ή διορθώσεων, που γίνονται κατά καιρούς στο πρόγραμμα και στα στοιχεία της βάσης δεδομένων). Οι τιμές που δίνονται εδώ είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των στοιχείων του πίνακα 5-3.

**Πίνακας Α1: Προσανατολισμός 0 (Νότιος) Κλίση 90**

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
05:07	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0
05:22	0	0	0	0	8	16	12	0	0	0	0	0
05:37	0	0	0	0	17	24	20	6	0	0	0	0
05:52	0	0	0	9	25	31	28	14	0	0	0	0
06:07	0	0	0	18	34	38	35	22	3	0	0	0
06:22	0	0	6	27	41	45	42	30	12	0	0	0
06:37	0	0	25	35	48	51	48	37	30	0	0	0
06:52	0	0	47	42	55	57	54	44	51	9	0	0
07:07	0	12	72	70	62	63	60	50	77	51	0	0
07:22	0	65	99	93	67	68	65	56	106	85	8	0
07:37	12	99	127	117	73	72	70	100	139	121	59	8
07:52	92	131	155	143	77	77	74	127	172	157	98	14
08:07	135	162	184	169	127	80	78	155	206	193	135	107
08:22	174	192	212	195	151	84	131	184	241	229	170	145
08:37	210	220	239	220	174	141	156	212	275	263	203	180
08:52	244	247	265	245	197	165	181	240	308	295	234	212
09:07	276	272	290	268	219	188	205	267	340	326	263	242
09:22	304	295	313	291	240	209	228	293	370	356	290	269
09:37	331	317	335	312	260	230	249	318	399	383	314	294
09:52	355	336	355	331	278	249	270	341	425	408	337	317
10:07	376	354	373	349	295	267	288	362	450	430	357	337
10:22	395	369	389	365	311	284	305	381	472	451	375	355
10:37	412	383	403	379	324	298	320	398	491	469	391	370
10:52	426	395	416	392	336	310	333	413	508	484	404	384
11:07	438	404	426	402	346	321	344	425	522	497	415	395
11:22	448	412	434	410	354	330	353	435	534	508	424	404
11:37	455	418	440	416	360	336	360	443	542	515	431	410

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
11:52	460	422	444	421	364	340	365	448	548	521	436	415
12:07	462	424	446	423	366	342	367	450	551	523	438	417
12:22	462	424	446	423	366	342	367	450	551	523	438	417
12:37	460	422	444	421	364	340	365	448	548	521	436	415
12:52	455	418	440	416	360	336	360	443	542	515	431	410
13:07	448	412	434	410	354	330	353	435	534	508	424	404
13:22	438	404	426	402	346	321	344	425	522	497	415	395
13:37	426	395	416	392	336	310	333	413	508	484	404	384
13:52	412	383	403	379	324	298	320	398	491	469	391	370
14:07	395	369	389	365	311	284	305	381	472	451	375	355
14:22	376	354	373	349	295	267	288	362	450	430	357	337
14:37	355	336	355	331	278	249	270	341	425	408	337	317
14:52	331	317	335	312	260	230	249	318	399	383	314	294
15:07	304	295	313	291	240	209	228	293	370	356	290	269
15:22	276	272	290	268	219	188	205	267	340	326	263	242
15:37	244	247	265	245	197	165	181	240	308	295	234	212
15:52	210	220	239	220	174	141	156	212	275	263	203	180
16:07	174	192	212	195	151	84	131	184	241	229	170	145
16:22	135	162	184	169	127	80	78	155	206	193	135	107
16:37	92	131	155	143	77	77	74	127	172	157	98	65
16:52	50	99	127	117	73	72	70	100	139	121	59	8
17:07	0	65	99	93	67	68	65	56	106	85	8	0
17:22	0	12	72	70	62	63	60	50	77	51	0	0
17:37	0	0	47	42	55	57	54	44	51	9	0	0
17:52	0	0	25	35	48	51	48	37	30	0	0	0
18:07	0	0	6	27	41	45	42	30	12	0	0	0
18:22	0	0	0	18	34	38	35	22	3	0	0	0
18:37	0	0	0	9	25	31	28	14	0	0	0	0
18:52	0	0	0	0	17	24	20	6	0	0	0	0
19:07	0	0	0	0	8	16	12	0	0	0	0	0
19:22	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0

Πίνακας Α2: Προσανατολισμός: -45 (Νοτιοανατολικός) Κλίση 90

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
05:07	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0
05:22	0	0	0	0	8	48	36	0	0	0	0	0
05:37	0	0	0	0	53	85	75	6	0	0	0	0
05:52	0	0	0	9	94	125	117	56	0	0	0	0
06:07	0	0	0	76	136	166	161	109	3	0	0	0
06:22	0	0	6	130	179	207	205	163	63	0	0	0
06:37	0	0	67	183	221	247	248	217	133	0	0	0
06:52	0	0	128	232	260	285	289	269	203	9	0	0
07:07	0	12	185	278	297	320	327	317	270	116	0	0
07:22	0	127	236	319	331	352	362	362	331	187	8	0
07:37	12	185	282	355	361	381	393	402	387	250	102	8
07:52	151	234	323	388	388	407	420	438	435	306	164	14
08:07	212	275	357	416	411	429	444	468	478	355	216	164
08:22	262	310	387	439	431	447	464	494	514	397	260	212
08:37	304	338	412	458	446	461	479	516	544	432	298	253
08:52	339	362	432	473	458	472	491	532	568	460	329	288

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
09:07	367	381	447	484	466	479	498	544	586	483	354	315
09:22	389	395	459	491	471	481	502	551	598	501	374	337
09:37	405	405	466	494	472	481	502	554	606	513	389	354
09:52	417	412	469	493	469	476	497	552	608	520	400	366
10:07	424	415	469	489	464	469	490	547	606	523	407	375
10:22	428	414	466	482	455	458	479	537	599	522	410	379
10:37	427	411	459	472	443	443	464	524	587	517	409	380
10:52	424	405	450	458	428	426	447	507	572	508	405	378
11:07	417	397	438	442	411	407	427	487	553	496	399	373
11:22	407	386	423	424	391	384	404	464	531	480	389	365
11:37	395	373	407	403	370	359	378	438	505	462	378	355
11:52	380	358	388	381	346	332	350	409	477	441	364	343
12:07	364	341	367	356	320	304	321	379	445	418	347	329
12:22	345	323	345	330	293	273	289	346	412	393	330	312
12:37	325	304	321	302	264	241	256	312	377	365	310	295
12:52	303	283	296	273	234	208	222	276	340	337	289	276
13:07	280	261	269	243	203	174	186	239	301	307	267	256
13:22	256	238	242	213	172	99	98	201	262	276	244	235
13:37	231	215	215	181	104	99	97	162	222	244	220	213
13:52	206	191	187	150	103	98	97	93	182	212	196	190
14:07	180	167	159	95	102	98	96	92	142	180	172	168
14:22	155	143	131	94	101	97	95	91	79	148	147	145
14:37	129	119	83	92	100	96	94	90	77	117	123	122
14:52	105	96	81	91	98	95	93	88	76	67	99	100
15:07	81	60	78	89	97	93	91	86	73	64	77	79
15:22	43	57	75	86	94	91	89	84	71	61	46	59
15:37	39	53	71	83	92	89	87	81	68	57	42	35
15:52	35	49	67	80	89	86	84	78	64	53	38	31
16:07	30	44	63	76	86	84	81	75	60	49	33	26
16:22	24	39	58	72	82	80	78	71	56	43	28	20
16:37	19	33	52	67	77	77	74	67	51	38	22	14
16:52	12	26	46	62	73	72	70	62	46	31	15	8
17:07	0	20	39	56	67	68	65	56	40	25	8	0
17:22	0	12	31	49	62	63	60	50	34	17	0	0
17:37	0	0	23	42	55	57	54	44	27	9	0	0
17:52	0	0	15	35	48	51	48	37	19	0	0	0
18:07	0	0	6	27	41	45	42	30	12	0	0	0
18:22	0	0	0	18	34	38	35	22	3	0	0	0
18:37	0	0	0	9	25	31	28	14	0	0	0	0
18:52	0	0	0	0	17	24	20	6	0	0	0	0
19:07	0	0	0	0	8	16	12	0	0	0	0	0
19:22	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0

Πίνακας Α3: Προσανατολισμός: +45 (Νοτιοδυτικός) Κλίση 90

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
05:07	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0
05:22	0	0	0	0	8	16	12	0	0	0	0	0
05:37	0	0	0	0	17	24	20	6	0	0	0	0
05:52	0	0	0	9	25	31	28	14	0	0	0	0
06:07	0	0	0	18	34	38	35	22	3	0	0	0

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
06:22	0	0	6	27	41	45	42	30	12	0	0	0
06:37	0	0	15	35	48	51	48	37	19	0	0	0
06:52	0	0	23	42	55	57	54	44	27	9	0	0
07:07	0	12	31	49	62	63	60	50	34	17	0	0
07:22	0	20	39	56	67	68	65	56	40	25	8	0
07:37	12	26	46	62	73	72	70	62	46	31	15	8
07:52	19	33	52	67	77	77	74	67	51	38	22	14
08:07	24	39	58	72	82	80	78	71	56	43	28	20
08:22	30	44	63	76	86	84	81	75	60	49	33	26
08:37	35	49	67	80	89	86	84	78	64	53	38	31
08:52	39	53	71	83	92	89	87	81	68	57	42	35
09:07	43	57	75	86	94	91	89	84	71	61	46	59
09:22	81	60	78	89	97	93	91	86	73	64	77	79
09:37	105	96	81	91	98	95	93	88	76	67	99	100
09:52	129	119	83	92	100	96	94	90	77	117	123	122
10:07	155	143	131	94	101	97	95	91	79	148	147	145
10:22	180	167	159	95	102	98	96	92	142	180	172	168
10:37	206	191	187	150	103	98	97	93	182	212	196	190
10:52	231	215	215	181	104	99	97	162	222	244	220	213
11:07	256	238	242	213	172	99	98	201	262	276	244	235
11:22	280	261	269	243	203	174	186	239	301	307	267	256
11:37	303	283	296	273	234	208	222	276	340	337	289	276
11:52	325	304	321	302	264	241	256	312	377	365	310	295
12:07	345	323	345	330	293	273	289	346	412	393	330	312
12:22	364	341	367	356	320	304	321	379	445	418	347	329
12:37	380	358	388	381	346	332	350	409	477	441	364	343
12:52	395	373	407	403	370	359	378	438	505	462	378	355
13:07	407	386	423	424	391	384	404	464	531	480	389	365
13:22	417	397	438	442	411	407	427	487	553	496	399	373
13:37	424	405	450	458	428	426	447	507	572	508	405	378
13:52	427	411	459	472	443	443	464	524	587	517	409	380
14:07	428	414	466	482	455	458	479	537	599	522	410	379
14:22	424	415	469	489	464	469	490	547	606	523	407	375
14:37	417	412	469	493	469	476	497	552	608	520	400	366
14:52	405	405	466	494	472	481	502	554	606	513	389	354
15:07	389	395	459	491	471	481	502	551	598	501	374	337
15:22	367	381	447	484	466	479	498	544	586	483	354	315
15:37	339	362	432	473	458	472	491	532	568	460	329	288
15:52	304	338	412	458	446	461	479	516	544	432	298	253
16:07	262	310	387	439	431	447	464	494	514	397	260	212
16:22	212	275	357	416	411	429	444	468	478	355	216	164
16:37	151	234	323	388	388	407	420	438	435	306	164	101
16:52	84	185	282	355	361	381	393	402	387	250	102	8
17:07	0	127	236	319	331	352	362	362	331	187	8	0
17:22	0	12	185	278	297	320	327	317	270	116	0	0
17:37	0	0	128	232	260	285	289	269	203	9	0	0
17:52	0	0	67	183	221	247	248	217	133	0	0	0
18:07	0	0	6	130	179	207	205	163	63	0	0	0
18:22	0	0	0	76	136	166	161	109	3	0	0	0
18:37	0	0	0	9	94	125	117	56	0	0	0	0
18:52	0	0	0	0	53	85	75	6	0	0	0	0

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
19:07	0	0	0	0	8	48	12	0	0	0	0	0
19:22	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0

**Πίνακας Α4: Προσανατολισμός: 0 (Νότιος) Κλίση 56**

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
05:07	0	0	0	0	0	13	7	0	0	0	0	0
05:22	0	0	0	0	13	26	20	0	0	0	0	0
05:37	0	0	0	0	28	39	33	10	0	0	0	0
05:52	0	0	0	15	42	51	46	23	0	0	0	0
06:07	0	0	0	30	55	63	58	37	6	0	0	0
06:22	0	0	9	44	68	74	69	49	22	0	0	0
06:37	0	0	33	70	80	84	80	70	47	0	0	0
06:52	0	0	63	100	110	104	104	101	79	16	0	0
07:07	0	20	96	134	143	138	139	138	117	58	0	0
07:22	0	72	132	171	178	175	177	178	160	100	14	0
07:37	52	112	171	209	215	213	217	220	207	143	63	13
07:52	94	150	210	249	252	253	258	264	256	188	105	24
08:07	141	189	249	288	290	293	299	309	305	234	146	111
08:22	185	226	287	327	328	333	340	354	355	279	186	151
08:37	226	261	325	365	365	372	381	398	404	324	225	190
08:52	266	296	361	402	401	410	421	442	451	367	263	228
09:07	304	328	395	437	436	447	459	483	497	408	298	262
09:22	339	358	428	471	468	481	495	523	541	446	331	295
09:37	371	386	458	502	499	514	529	561	582	483	362	325
09:52	401	412	486	531	528	545	561	595	621	516	390	352
10:07	428	435	511	557	554	573	590	627	656	547	416	377
10:22	452	456	534	581	577	598	616	656	687	575	439	399
10:37	473	474	554	601	598	621	640	682	715	599	459	419
10:52	491	490	571	619	616	640	660	704	740	620	477	435
11:07	506	503	586	635	631	657	677	723	760	638	491	449
11:22	519	513	598	647	643	670	691	738	777	652	503	461
11:37	528	521	606	656	653	680	701	749	789	662	512	469
11:52	534	527	612	662	659	686	708	757	797	670	518	475
12:07	537	529	615	665	662	690	712	761	802	673	520	477
12:22	537	529	615	665	662	690	712	761	802	673	520	477
12:37	534	527	612	662	659	686	708	757	797	670	518	475
12:52	528	521	606	656	653	680	701	749	789	662	512	469
13:07	519	513	598	647	643	670	691	738	777	652	503	461
13:22	506	503	586	635	631	657	677	723	760	638	491	449
13:37	491	490	571	619	616	640	660	704	740	620	477	435
13:52	473	474	554	601	598	621	640	682	715	599	459	419
14:07	452	456	534	581	577	598	616	656	687	575	439	399
14:22	428	435	511	557	554	573	590	627	656	547	416	377
14:37	401	412	486	531	528	545	561	595	621	516	390	352
14:52	371	386	458	502	499	514	529	561	582	483	362	325
15:07	339	358	428	471	468	481	495	523	541	446	331	295
15:22	304	328	395	437	436	447	459	483	497	408	298	262
15:37	266	296	361	402	401	410	421	442	451	367	263	228
15:52	226	261	325	365	365	372	381	398	404	324	225	190

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
16:07	185	226	287	327	328	333	340	354	355	279	186	151
16:22	141	189	249	288	290	293	299	309	305	234	146	111
16:37	94	150	210	249	252	253	258	264	256	188	105	66
16:52	52	112	171	209	215	213	217	220	207	143	63	13
17:07	0	72	132	171	178	175	177	178	160	100	14	0
17:22	0	20	96	134	143	138	139	138	117	58	0	0
17:37	0	0	63	100	110	104	104	101	79	16	0	0
17:52	0	0	33	70	80	84	80	70	47	0	0	0
18:07	0	0	9	44	68	74	69	49	22	0	0	0
18:22	0	0	0	30	55	63	58	37	6	0	0	0
18:37	0	0	0	15	42	51	46	23	0	0	0	0
18:52	0	0	0	0	28	39	33	10	0	0	0	0
19:07	0	0	0	0	13	26	20	0	0	0	0	0
19:22	0	0	0	0	0	13	7	0	0	0	0	0

**Πίνακας Α5: Προσανατολισμός: -45 (Νοτιοανατολικός) Κλίση 56**

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
05:07	0	0	0	0	0	13	7	0	0	0	0	0
05:22	0	0	0	0	13	54	41	0	0	0	0	0
05:37	0	0	0	0	58	97	83	10	0	0	0	0
05:52	0	0	0	15	105	144	131	60	0	0	0	0
06:07	0	0	0	79	154	194	183	115	6	0	0	0
06:22	0	0	9	138	205	245	237	175	62	0	0	0
06:37	0	0	68	195	256	297	291	237	132	0	0	0
06:52	0	0	130	252	306	348	345	298	204	16	0	0
07:07	0	20	190	307	355	397	397	358	277	112	0	0
07:22	0	123	247	358	402	445	447	416	347	184	14	0
07:37	20	183	300	407	446	490	494	470	413	251	98	13
07:52	143	235	349	452	488	532	538	522	474	312	160	24
08:07	206	282	393	493	526	571	579	569	530	368	213	158
08:22	258	323	433	530	560	606	616	612	581	419	262	207
08:37	305	359	468	563	591	637	649	650	626	464	304	252
08:52	345	391	499	591	618	665	677	684	666	503	342	290
09:07	379	418	526	616	641	688	702	713	701	538	374	323
09:22	408	441	548	636	660	707	722	737	730	567	401	351
09:37	433	459	567	653	675	722	738	756	754	591	424	374
09:52	452	474	581	665	686	733	750	771	772	610	443	393
10:07	468	486	591	673	693	740	757	781	785	624	457	408
10:22	479	493	598	677	697	743	760	786	793	634	468	419
10:37	486	498	601	678	696	741	759	786	795	639	475	427
10:52	489	499	600	675	693	736	754	782	793	640	478	431
11:07	489	497	596	668	685	727	745	774	786	636	477	431
11:22	485	492	589	658	674	715	732	762	774	629	474	429
11:37	478	484	578	645	660	699	716	745	758	618	467	423
11:52	468	474	565	629	643	680	696	725	738	604	458	415
12:07	456	461	549	610	624	658	673	701	714	586	445	404
12:22	440	446	531	588	601	632	647	674	687	565	431	391
12:37	422	429	510	564	576	604	618	644	655	541	413	375
12:52	402	409	486	537	548	573	586	611	621	514	394	358
13:07	380	388	461	508	518	540	552	575	584	485	372	338

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
13:22	355	365	434	478	487	505	516	537	544	454	349	317
13:37	329	341	405	445	453	468	478	497	503	421	324	294
13:52	302	315	375	411	418	430	438	455	459	386	298	269
14:07	274	288	343	376	382	390	397	411	414	350	270	244
14:22	244	260	311	339	345	349	354	367	367	313	242	218
14:37	214	232	277	302	307	307	311	321	320	275	213	191
14:52	184	203	244	265	268	265	268	276	273	237	184	164
15:07	154	174	210	227	230	223	224	230	226	199	155	137
15:22	124	145	176	189	192	181	181	186	180	162	126	111
15:37	96	117	143	153	154	140	139	142	136	127	99	86
15:52	70	90	111	132	146	142	139	129	106	93	74	62
16:07	49	72	103	125	141	137	134	123	99	80	54	42
16:22	40	64	95	118	134	132	128	117	92	71	46	33
16:37	30	54	85	110	127	126	122	109	84	62	36	24
16:52	20	44	75	101	119	119	115	101	75	52	25	13
17:07	0	32	64	92	111	112	107	92	66	40	14	0
17:22	0	20	52	81	101	103	99	83	55	28	0	0
17:37	0	0	38	70	91	94	90	72	44	16	0	0
17:52	0	0	24	57	80	84	80	61	32	0	0	0
18:07	0	0	9	44	68	74	69	49	19	0	0	0
18:22	0	0	0	30	55	63	58	37	6	0	0	0
18:37	0	0	0	15	42	51	46	23	0	0	0	0
18:52	0	0	0	0	28	39	33	10	0	0	0	0
19:07	0	0	0	0	13	26	20	0	0	0	0	0
19:22	0	0	0	0	0	13	7	0	0	0	0	0

Πίνακας Α6: Προσανατολισμός: +45 (Νοτιοδυτικός) Κλίση 56

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
05:07	0	0	0	0	0	13	7	0	0	0	0	0
05:22	0	0	0	0	13	54	41	0	0	0	0	0
05:37	0	0	0	0	58	97	83	10	0	0	0	0
05:52	0	0	0	15	105	144	131	60	0	0	0	0
06:07	0	0	0	79	154	194	183	115	6	0	0	0
06:22	0	0	9	138	205	245	237	175	62	0	0	0
06:37	0	0	68	195	256	297	291	237	132	0	0	0
06:52	0	0	130	252	306	348	345	298	204	16	0	0
07:07	0	20	190	307	355	397	397	358	277	112	0	0
07:22	0	123	247	358	402	445	447	416	347	184	14	0
07:37	20	183	300	407	446	490	494	470	413	251	98	13
07:52	143	235	349	452	488	532	538	522	474	312	160	24
08:07	206	282	393	493	526	571	579	569	530	368	213	158
08:22	258	323	433	530	560	606	616	612	581	419	262	207
08:37	305	359	468	563	591	637	649	650	626	464	304	252
08:52	345	391	499	591	618	665	677	684	666	503	342	290
09:07	379	418	526	616	641	688	702	713	701	538	374	323
09:22	408	441	548	636	660	707	722	737	730	567	401	351
09:37	433	459	567	653	675	722	738	756	754	591	424	374
09:52	452	474	581	665	686	733	750	771	772	610	443	393
10:07	468	486	591	673	693	740	757	781	785	624	457	408
10:22	479	493	598	677	697	743	760	786	793	634	468	419



	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
10:37	486	498	601	678	696	741	759	786	795	639	475	427
10:52	489	499	600	675	693	736	754	782	793	640	478	431
11:07	489	497	596	668	685	727	745	774	786	636	477	431
11:22	485	492	589	658	674	715	732	762	774	629	474	429
11:37	478	484	578	645	660	699	716	745	758	618	467	423
11:52	468	474	565	629	643	680	696	725	738	604	458	415
12:07	456	461	549	610	624	658	673	701	714	586	445	404
12:22	440	446	531	588	601	632	647	674	687	565	431	391
12:37	422	429	510	564	576	604	618	644	655	541	413	375
12:52	402	409	486	537	548	573	586	611	621	514	394	358
13:07	380	388	461	508	518	540	552	575	584	485	372	338
13:22	355	365	434	478	487	505	516	537	544	454	349	317
13:37	329	341	405	445	453	468	478	497	503	421	324	294
13:52	302	315	375	411	418	430	438	455	459	386	298	269
14:07	274	288	343	376	382	390	397	411	414	350	270	244
14:22	244	260	311	339	345	349	354	367	367	313	242	218
14:37	214	232	277	302	307	307	311	321	320	275	213	191
14:52	184	203	244	265	268	265	268	276	273	237	184	164
15:07	154	174	210	227	230	223	224	230	226	199	155	137
15:22	124	145	176	189	192	181	181	186	180	162	126	111
15:37	96	117	143	153	154	140	139	142	136	127	99	86
15:52	70	90	111	132	146	142	139	129	106	93	74	62
16:07	49	72	103	125	141	137	134	123	99	80	54	42
16:22	40	64	95	118	134	132	128	117	92	71	46	33
16:37	30	54	85	110	127	126	122	109	84	62	36	24
16:52	20	44	75	101	119	119	115	101	75	52	25	13
17:07	0	32	64	92	111	112	107	92	66	40	14	0
17:22	0	20	52	81	101	103	99	83	55	28	0	0
17:37	0	0	38	70	91	94	90	72	44	16	0	0
17:52	0	0	24	57	80	84	80	61	32	0	0	0
18:07	0	0	9	44	68	74	69	49	19	0	0	0
18:22	0	0	0	30	55	63	58	37	6	0	0	0
18:37	0	0	0	15	42	51	46	23	0	0	0	0
18:52	0	0	0	0	28	39	33	10	0	0	0	0
19:07	0	0	0	0	13	26	20	0	0	0	0	0
19:22	0	0	0	0	0	13	7	0	0	0	0	0

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων αντιπροσωπευτικών μοντέλων φωτοβολταϊκών πλαισίων που κυκλοφορούν στην αγορά, όπως αναγράφονται στα εγχειρίδια των κατασκευαστών. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μοντέλο αναφέρουμε την απόδοση, τις διαστάσεις (από τις οποίες προσδιορίζουμε την επιφάνεια) και την ισχύ, η οποία καθορίζει και το ενδεικτικό κόστος του πλαισίου όπως εξηγήσαμε στην ενότητα 5.4. Κύρια πηγή ήταν η ιστοσελίδα της εταιρείας Solartek ([60]), στην οποία υπάρχουν τεχνικά φυλλάδια (datasheets) για διάφορες μάρκες φωτοβολταϊκών. Επίσης ανατρέξαμε σε ιστοσελίδες κατασκευαστών για να συλλέξουμε πρόσθετα στοιχεία και για να δούμε μήπως υπήρχαν πιο ενημερωμένες εκδόσεις των φυλλαδίων που βρήκαμε στην ιστοσελίδα ([60]).

### (A) Εταιρεία Sharp

Μοντέλο	Τύπος	Απόδοση (%)	Διαστάσεις (mm)	Εμβαδόν (m <sup>2</sup> )	Ισχύς (Wr)
NE 80W	Πολυκρυσταλλικό	10	1214 X 545 X 36	0.66	80
NEQ7	Πολυκρυσταλλικό	12.8	1575 X 826 X 46	1.30	167
NEQ2	Πολυκρυσταλλικό	12.5	1575 X 826 X 46	1.30	162
NEP0	Πολυκρυσταλλικό	11.5	1575 X 826 X 46	1.30	150
NT175	Μονοκρυσταλλικό	13.5	1575 X 826 X 46	1.30	175
NT170	Μονοκρυσταλλικό	13.1	1575 X 826 X 46	1.30	170
ND175	Πολυκρυσταλλικό	13.3	1318 X 994 X 46	1.31	175
ND170	Πολυκρυσταλλικό	13.0	1318 X 994 X 46	1.31	170
ND162	Πολυκρυσταλλικό	12.4	1318 X 994 X 46	1.31	162
ND158	Πολυκρυσταλλικό	12.1	1318 X 994 X 46	1.31	158
ND148	Πολυκρυσταλλικό	11.3	1318 X 994 X 46	1.31	148
ND210	Πολυκρυσταλλικό	12.8	1652 X 994 X 46	1.64	210
ND200	Πολυκρυσταλλικό	12.2	1652 X 994 X 46	1.64	200
NU185	Μονοκρυσταλλικό	14.1	1318 X 994 X 46	1.31	185
NU180	Μονοκρυσταλλικό	13.7	1318 X 994 X 46	1.31	180
NUR5	Μονοκρυσταλλικό	13.4	1318 X 994 X 46	1.31	175
NUR0	Μονοκρυσταλλικό	13.0	1318 X 994 X 46	1.31	170

### (B) Εταιρεία Conergy

Μοντέλο	Τύπος	Απόδοση (%)	Διαστάσεις (mm)	Εμβαδόν (m <sup>2</sup> )	Ισχύς (Wr)
POWERPLUS 200P	Πολυκρυστ.	12.29	1651 X 986 X 46	1.63	200
POWERPLUS 205P	Πολυκρυστ.	12.59	1651 X 986 X 46	1.63	205
POWERPLUS 210P	Πολυκρυστ.	12.90	1651 X 986 X 46	1.63	210
POWERPLUS 215P	Πολυκρυστ.	13.21	1651 X 986 X 46	1.63	215
POWERPLUS 220P	Πολυκρυστ.	13.51	1651 X 986 X 46	1.63	220
POWERPLUS 225P	Πολυκρυστ.	13.82	1651 X 986 X 46	1.63	225
POWERPLUS 230P	Πολυκρυστ.	14.13	1651 X 986 X 46	1.63	230
POWERPLUS 210M	Μονοκρυστ.	12.90	1651 X 986 X 46	1.63	210

Μοντέλο	Τύπος	Απόδοση (%)	Διαστάσεις (mm)	Εμβαδόν (m <sup>2</sup> )	Ισχύς (Wp)
POWERPLUS 215M	Μονοκρυστ.	13.21	1651 X 986 X 46	1.63	215
POWERPLUS 220M	Μονοκρυστ.	13.51	1651 X 986 X 46	1.63	220
POWERPLUS 225M	Μονοκρυστ.	13.82	1651 X 986 X 46	1.63	225
POWERPLUS 230M	Μονοκρυστ.	14.13	1651 X 986 X 46	1.63	230
POWERPLUS 170MC	Μονοκρυστ.	12.91	1335 X 986 X 46	1.32	170
POWERPLUS 175MC	Μονοκρυστ.	13.29	1335 X 986 X 46	1.32	175
POWERPLUS 180MC	Μονοκρυστ.	13.67	1335 X 986 X 46	1.32	180
POWERPLUS 185MC	Μονοκρυστ.	14.05	1335 X 986 X 46	1.32	185
P170M	Μονοκρυστ.	13.3	1580 X 808 X 45	1.28	170
P175M	Μονοκρυστ.	13.7	1580 X 808 X 45	1.28	175
P180M	Μονοκρυστ.	14.1	1580 X 808 X 45	1.28	180
P185M	Μονοκρυστ.	14.5	1580 X 808 X 45	1.28	185
P190P	Πολυκρυστ.	12.7	1494 X 1000 X 45	1.49	190
P195P	Πολυκρυστ.	13.0	1494 X 1000 X 45	1.49	195
P200P	Πολυκρυστ.	13.4	1494 X 1000 X 45	1.49	200
P205P	Πολυκρυστ.	13.7	1494 X 1000 X 45	1.49	205
P210P	Πολυκρυστ.	14.1	1494 X 1000 X 45	1.49	210
P210PA	Πολυκρυστ.	12.7	1652 X 1000 X 50	1.65	210
P215PA	Πολυκρυστ.	13.0	1652 X 1000 X 50	1.65	215
P220PA	Πολυκρυστ.	13.3	1652 X 1000 X 50	1.65	220
P225PA	Πολυκρυστ.	13.6	1652 X 1000 X 50	1.65	225
P230PA	Πολυκρυστ.	13.9	1652 X 1000 X 50	1.65	230
SC170MA	Μονοκρυστ.	13.1	1575 X 826 X 46	1.3	170
SC175MA	Μονοκρυστ.	13.5	1575 X 826 X 46	1.3	175
SC180MA	Μονοκρυστ.	13.8	1575 X 826 X 46	1.3	180
SC170M	Μονοκρυστ.	13.1	1575 X 826 X 46	1.3	170
SC175M	Μονοκρυστ.	13.5	1575 X 826 X 46	1.3	175
SC180M	Μονοκρυστ.	13.8	1575 X 826 X 46	1.3	180

### (Γ) Εταιρεία SOLARFUN

#### Γ1. Σειρά SF 160-24-M

Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με διαστάσεις πλαισίου 1580 X 808 X 45 mm (επιφάνεια 1.28 m<sup>2</sup>). Η μέγιστη ισχύς και η απόδοση των επιμέρους μοντέλων της σειράς φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ισχύς (Wp)	150	155	160	165	170	175	180	185
Απόδοση (%)	11.8	12.2	12.5	12.9	13.3	13.7	14.1	14.7

#### Γ2. Σειρά SF 190-27-M

Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με διαστάσεις πλαισίου 1194 X 1000 X 45 mm (επιφάνεια 1.19 m<sup>2</sup>). Η μέγιστη ισχύς και η απόδοση των επιμέρους μοντέλων της σειράς φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ισχύς (Wp)	170	175	180	185	190	195	200	205	210
Απόδοση (%)	11.4	11.7	12.1	12.4	12.7	13.1	13.4	13.7	14.1

### Γ3. Σειρά SF 190-27-P

Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με διαστάσεις πλαισίου 1194 X 1000 X 45 mm (επιφάνεια 1.19 m<sup>2</sup>). Η μέγιστη ισχύς και η απόδοση των επιμέρους μοντέλων της σειράς φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>Ισχύς (Wp)</b>	<b>170</b>	<b>175</b>	<b>180</b>	<b>185</b>	<b>190</b>	<b>195</b>	<b>200</b>	<b>205</b>	<b>210</b>
<b>Απόδοση (%)</b>	<b>11.4</b>	<b>11.7</b>	<b>12.1</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>13.1</b>	<b>13.4</b>	<b>13.7</b>	<b>14.1</b>

### Γ4. Σειρά SF 220-30-P

Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με διαστάσεις πλαισίου 1652 X 1000 X 50 mm (επιφάνεια 1.65 m<sup>2</sup>). Η μέγιστη ισχύς και η απόδοση των επιμέρους μοντέλων της σειράς φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>Ισχύς (Wp)</b>	<b>200</b>	<b>205</b>	<b>210</b>	<b>215</b>	<b>220</b>	<b>225</b>	<b>230</b>	<b>235</b>	<b>240</b>
<b>Απόδοση (%)</b>	<b>12.1</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>13.0</b>	<b>13.3</b>	<b>13.6</b>	<b>13.9</b>	<b>14.2</b>	<b>14.5</b>

### Γ4. Σειρά SF 190P Black Diamond

Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου, με διαστάσεις πλαισίου 1494 X 1000 X 45 mm (επιφάνεια 1.49 m<sup>2</sup>). Η μέγιστη ισχύς και η απόδοση των επιμέρους μοντέλων της σειράς φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>Ισχύς (Wp)</b>	<b>170</b>	<b>175</b>	<b>180</b>	<b>185</b>	<b>190</b>	<b>195</b>	<b>200</b>
<b>Απόδοση (%)</b>	<b>11.4</b>	<b>11.7</b>	<b>12.1</b>	<b>12.4</b>	<b>12.7</b>	<b>13.1</b>	<b>13.4</b>

Αθήνα

Οκτώβριος - 2011