



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

**Ενεργειακά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη μείωση
της φωτεινής ρύπανσης που προκαλεί ο φωτισμός εξωτερικών χώρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Π. Σταματίου

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2017



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

**Ενεργειακά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη μείωση
της φωτεινής ρύπανσης προκαλεί ο φωτισμός εξωτερικών χώρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Π. Σταματίου

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

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

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2017

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

Copyright © Αικατερίνη Π. Σταματίου, 2017
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι ο υπολογισμός των ενεργειακών και περιβαλλοντικών οφελών που θα προέκυπταν από την αντικατάσταση σημαντικού μέρους των εγκατεστημένων φωτιστικών εξωτερικών χώρων και οδοφωτισμού στην Ελλάδα. Εντοπίστηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα φωτιστικών παλαιού τύπου, μεγάλος αριθμός των οποίων παραμένει εγκατεστημένος στην ελληνική επικράτεια, επιβαρύνοντας σημαντικά το νυκτερινό ουρανό με ανεπιθύμητο φως. Εν συνεχεία υπολογίστηκαν τα οφέλη από την αντικατάσταση αυτών των τύπων φωτιστικών από άλλους, νέας τεχνολογίας, που παρουσιάζουν παρόμοια φωτεινή απόδοση αλλά μικρότερα επίπεδα φωτορρύπανσης. Με αναγωγή των οφελών στον αριθμό των οδικών φωτιστικών της χώρας που κατ' εκτίμηση αντιστοιχούν στους συγκεκριμένους παλαιούς τύπους προέκυψαν τα συνολικά ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη που θα συνόδευαν την αντικατάσταση του συγκεκριμένου αριθμού υφισταμένων φωτιστικών από νέα, σύγχρονης τεχνολογίας. Θα προηγηθεί μια επισκόπηση του προβλήματος της φωτορρύπανσης, των ειδών, των αιτίων της (όσον αφορά κυρίως τον οδικό φωτισμό) και των σοβαρότερων συνεπειών της.

Λέξεις-κλειδιά:

Φωτορρύπανση, φωτεινή ρύπανση, τεχνητό φως, επίδραση του φωτός, οδικός φωτισμός, εξωτερικός φωτισμός, φωτισμός εξωτερικών χώρων, αποδοτικός φωτισμός, εξοικονόμηση ενέργειας, φωτιστικά, LED, ULOR

Abstract

The scope of this thesis is the calculation of the benefits that would stem from replacing a significant part of the installed outdoor and street luminaires in Greece, with regard to energy consumption and the environment. Typical samples of old types of luminaires were tracked down, a large number of which remains installed in the greek territory, significantly burdening the night sky with unwanted light. Consequently, the benefits of replacing these types of luminaires with modern ones of similar lighting capacity but lower light pollution levels, were calculated. By projection to the estimated number of street luminaires of these particular old types still installed in the country, the total energy and environmental benefits of replacing them with new, modern ones were calculated. Prior to that, an overview of the problem of light pollution will be provided, including the types, causes (mainly regarding street lighting) and most serious consequences.

Key-words:

Light pollution, street lighting, artificial light, impact of light, outdoor lighting, efficient lighting, energy saving, luminaires, LED, ULOR

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον κο. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, καθηγητή ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη και το αμείωτο ενδιαφέρον του, και τον κο. Ευάγγελο Δ. Μαδιά, ηλεκτρολόγο μηχανικό και υποψήφιο διδάκτορα, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, την οικογένεια και τους φίλους μου, για τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	11
Κεφάλαιο 1: Τα είδη της φωτεινής ρύπανσης.....	13
1.1) Θάμβωση	13
1.2) Φωτεινή παρενόχληση	16
1.3) Φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού	18
1.4) Φασματικό περιεχόμενο	22
Κεφάλαιο 2: Η κατάσταση παγκοσμίως.....	23
Κεφάλαιο 3: Συνέπειες της φωτεινής ρύπανσης	29
3.1) Τεχνητό φως και οδική ασφάλεια	29
3.2) Τεχνητό φως και εγκληματικότητα	31
3.3) Τεχνητό φως και φυσικό περιβάλλον	33
3.4) Τεχνητός φως και άνθρωπος.....	37
Κεφάλαιο 4: Μέτρα αντιμετώπισης της φωτεινής ρύπανσης.....	39
4.1) Ποσοτικά όρια στο φωτισμό.....	39
4.2) Χρήση αποδοτικότερης τεχνολογίας	42
4.3) Ορθή χρήση του εξοπλισμού φωτισμού	52
Κεφάλαιο 5: Η μελέτη	57
5.1) Τα ζεύγη φωτιστικών που εξετάστηκαν	58
5.2) Η μέθοδος	63
5.3) Αποτελέσματα στην εκπομπή μη χρήσιμου φωτός και την κατανάλωση ενέργειας	65
5.4) Συνολικό ενεργειακό όφελος στην επικράτεια	70
5.5) Αποτελέσματα στη συνολική φωτεινή ρύπανση	71
5.6) Συνολική μείωση της φωτεινής ρύπανσης στην επικράτεια.....	76
5.7) Συνοπτικά αποτελέσματα	76
5.8) Εφαρμογή προγράμματος adaptive lighting	77
Επίλογος.....	79
Βιβλιογραφία	81

Πρόλογος

Για εκατομμύρια χρόνια τα έμβια όντα στον πλανήτη μας ζούσαν και εξακολουθούν να ζουν προσαρμόζοντας τη δραστηριότητα και τις βιολογικές τους λειτουργίες στις ημερήσιες εναλλαγές φωτός και σκότους. Δαμάζοντας τη φωτιά, ο άνθρωπος έγινε το πρώτο και μοναδικό πλάσμα που έσπασε τον κανόνα αυτό και μπόρεσε να επεκτείνει τη δραστηριότητά του και στο σκοτεινό τμήμα του 24ώρου. Για χιλιετίες, η φλόγα που διατηρούσαν ζωντανή πυρσοί, λυχνάρια και κεριά ήταν το μόνο τεχνητό φωτιστικό σώμα. Ωστόσο, η ανθρώπινη ζωή ακολουθούσε εν πολλοίς το ρυθμό του ημερονυκτίου. Η ημέρα ήταν αφιερωμένη στην εργασία και η νύκτα στην ανάπαυση, την ψυχαγωγία αλλά και το στοχασμό σχετικά με τη θέση μας στον κόσμο. Τα άστρα αποτελούν το σύνδεσμο ανάμεσα στη γήινη ύπαρξή μας και το αιώνιο σύμπαν. Η ανθρωπότητα, λοιπόν, χρειάζεται τη νύκτα, έχει ανάγκη το σκοτάδι.

Με την εφεύρεση του ηλεκτρισμού το 19ο αι. σημειώθηκε και η μεγάλη επανάσταση στον τεχνητό φωτισμό. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1870 ιδιωτικές οικίες και δημόσια κτίρια αρχίζουν να φωταγωγούνται με χρήση ηλεκτρικών λαμπτήρων πυρακτώσεως, η τελειοποίηση των οποίων από τον Thomas Edison άνοιξε το δρόμο για την εμπορική επέκταση του ηλεκτροφωτισμού στο ευρύτερο κοινό και, συνακόλουθα, την ανατροπή του εικοσιτετράωρου ρυθμού της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η βιομηχανοποίηση άλλαξε την κοινωνία και παρείχε την τεχνολογία για την υλοποίηση αυτών των αλλαγών. Η ολοένα αυξανόμενη κατανάλωση κατέστησε απαραίτητη τη μεταφορά αγαθών και ανθρώπων σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύκτας, γεγονός που οδήγησε στην ανάγκη και για οδικό φωτισμό.

Έκτοτε η τεχνολογία του φωτισμού εξελίσσεται ασταμάτητα με σκοπό τη δημιουργία ολοένα αποδοτικότερων μεθόδων και συσκευών φωτισμού. Η πληθώρα των προσφερόμενων λύσεων φωτισμού επιτείνει τις ανάγκες των σύγχρονων κοινωνιών (οδική ασφάλεια, καταπολέμηση της εγκληματικότητας, αύξηση της εμπορικής δραστηριότητας και οικονομική ανάπτυξη, ανάδειξη ιστορικών περιοχών και αξιοθεάτων) με αποτέλεσμα το φωτεινό τμήμα του 24ώρου να επιμηκύνεται διαρκώς και στα κέντρα των μεγαλουπόλεων πρακτικά να μη νυχτώνει ποτέ.

Δυστυχώς ανέγγιχτη από το φαινόμενο του υπερφωτισμού δεν έχει μείνει ούτε η ύπαιθρος, εξαιτίας της μίμησης των αστικών προτύπων ζωής και της ταχύτατης διάδοσης των συνηθειών. Οδικός φωτισμός, διαφημιστικές κατασκευές, ολόφωτες βιτρίνες καταστημάτων, φωτισμός αθλητικών εγκαταστάσεων, διακοσμητικός φωτισμός κτιρίων, κήπων και πάρκων, όλες αυτές οι πηγές τεχνητού φωτός δημιουργούν ένα αφύσικα φωτεινό νυκτερινό περιβάλλον, στις δυτικές κυρίως κοινωνίες.

Μέσα στο γενικότερο κλίμα ευαισθητοποίησης για τα περιβαλλοντικά ζητήματα, το φαινόμενο αυτό οδήγησε επιστήμονες και κυβερνήσεις σε έντονο προβληματισμό, με αποτέλεσμα το τεχνητό φως να μη θεωρείται πλέον μια ανώδυνη ευκολία της σύγχρονης ζωής, αλλά ένας επιπλέον ρύπος. Έτσι γεννήθηκε ο όρος της φωτεινής ρύπανσης ή φωτορρύπανσης, οι συνέπειες της οποίας μόλις τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αρχίσει να ερευνώνται στους τομείς της οδικής και δημόσιας ασφάλειας, της προστασίας της πανίδας και της χλωρίδας, της ανθρώπινης υγείας και ποιότητας ζωής, της ενεργειακής οικονομίας, ακόμη και της επιστήμης της αστρονομίας.

Μια μικρή συμβολή στη μελέτη του προβλήματος φιλοδοξεί να είναι και η παρούσα εργασία. Στο πρώτο κεφάλαιο ορίζονται τα βασικότερα είδη φωτεινής ρύπανσης, και παρουσιάζονται οι συνήθειες μέθοδοι μέτρησής τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η οξύτητα του προβλήματος παγκοσμίως, καθώς και οι σημαντικότερες προσπάθειες αντιμετώπισής του από τη διεθνή κοινότητα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι επιπτώσεις της φωτορρύπανσης στην οδική ασφάλεια, την εγκληματικότητα, το φυσικό περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μέτρα πρόληψης και περιορισμού της φωτεινής ρύπανσης, που αφορούν την επιλογή του κατάλληλου για κάθε εφαρμογή εξοπλισμού φωτισμού και τη σωστή χρήση του, σύμφωνα με διεθνείς κανονισμούς και πρότυπα.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο συγκρίνονται τα φωτομετρικά και ενεργειακά δεδομένα ενδεικτικών μοντέλων φωτιστικών παλαιάς (φωτορρυπαντικής) και νέας (μη φωτορρυπαντικής) τεχνολογίας ώστε να υπολογιστεί η θετική επίδραση που θα έχει στο φαινόμενο της φωτορρύπανσης και στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (και, συνεπώς, στο δημόσιο προϋπολογισμό) ο εκσυγχρονισμός των συστημάτων δημόσιου οδικού φωτισμού στην Ελλάδα.

Κεφάλαιο 1

Τα είδη της φωτεινής ρύπανσης

Κατά τον ορισμό της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού (CIE) η *φωτορρύπανση* είναι ένας γενικός όρος δηλωτικός του συνόλου των δυσμενών επιπτώσεων του τεχνητού φωτός [1]. Υπάρχουν τρία βασικά είδη φωτεινής ρύπανσης: η θάμβωση, η φωτεινή παρενόχληση και η φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού.

1.1) Θάμβωση

Η *θάμβωση* (glare) προκαλείται από φως που εκπέμπεται με διεύθυνση κοντά στην οριζόντιο. Τέτοιας διεύθυνσης φως μπορεί να είναι ορατό από απόσταση χιλιομέτρων και μειώνει την ικανότητα προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού στο σκοτάδι. Η θάμβωση διαπιστώνεται ως οπτική αδυναμία λόγω έντονης και ανεξέλεγκτης φωτεινότητας και αισθητικά γίνεται αντιληπτή είτε ως αίσθηση ενόχλησης ή πόνου στον οφθαλμό (*θάμβωση δυσφορίας* – discomfort glare), είτε ως σοβαρή απώλεια ορατότητας λόγω μείωσης της αντίθεσης λαμπρότητας (κοντράστ) των αντικειμένων στο πεδίο της όρασης που προκαλεί η διάχυση φωτός στον οφθαλμό από μια εξαιρετικά λαμπρή πηγή (*θάμβωση που παρεμποδίζει την όραση* – disability glare), χωρίς απαραίτητα να συνοδεύεται από αίσθηση δυσφορίας. Όπως είναι φυσικό, η θάμβωση είναι ένα υποκειμενικό πρόβλημα, εφόσον εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του οφθαλμού του κάθε ανθρώπου (πχ. η γήρανση του οφθαλμού καθιστά τους ηλικιωμένους πιο ευαίσθητους στη θάμβωση). Ως αποτέλεσμα η θάμβωση μπορεί να αποτελέσει δημόσιο κίνδυνο, συμβάλλοντας στην πρόκληση ατυχημάτων σε οδηγούς οχημάτων αλλά και πεζούς, γι' αυτό και ο έλεγχός της οφείλει να αποτελεί πρώτιστο μέλημα των επαγγελματιών φωτισμού.



Παράδειγμα φωτισμού που προκαλεί έντονη θάμβωση [2].



Επιτυχής φωτισμός με χαμηλά επίπεδα θάμβωσης [2].

Ο μηχανισμός δημιουργίας και τα αποτελέσματα της θάμβωσης που παρεμποδίζει την όραση έχουν κατανοηθεί εδώ και πολλές δεκαετίες. Αντίθετα, οι απόπειρες για την ανάπτυξη αντικειμενικών, φυσιολογικών μέτρων (συστολή της κόρης, συνοφρύωμα, μυϊκή τάση) και ηλεκτροφυσιολογικών μέτρων για τη θάμβωση δυσφορίας δεν έχουν καταλήξει σε μια αξιόπιστη και ακριβή μέθοδο μέτρησης. Συνήθως η θάμβωση δυσφορίας εκτιμάται ποσοτικά με τη χρήση υποκειμενικών κλιμάκων μέτρησης όπως η κλίμακα de Boer (1967), η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρον για την εκτίμηση της θάμβωσης που προκαλούν οι προβολείς των οχημάτων και άλλα είδη εξωτερικού

φωτισμού. Η κλίμακα de Boer αποτελείται από εννέα βαθμίδες που αντιστοιχούν σε οπτική αίσθηση [3]:

- 1 Αφόρητη
- 2
- 3 Ενοχλητική
- 4
- 5 Μόλις ανεκτή
- 6
- 7 Ικανοποιητική
- 8
- 9 Μόλις παρατηρήσιμη

Οι Schmidt-Clausen και Bindels ανέπτυξαν το 1974 ένα υπολογιστικό μοντέλο για τη θάμβωση δυσφορίας που προκαλούν οι προβολείς οχημάτων, το οποίο χρησιμοποιεί ως εισόδους την ένταση φωτισμού της πηγής, τη λαμπρότητα του περιβάλλοντος και τη γωνία μεταξύ της γραμμής της όρασης και της πηγής, το οποίο, όμως, δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τη μέτρηση της θάμβωσης όταν ο παρατηρητής κοιτάζει απευθείας την πηγή (ο παρονομαστής μηδενίζεται και προκύπτει άπειρη θάμβωση). Οι Bullough et al. (2008), βασισμένοι σε υποκειμενικές εκτιμήσεις παρατηρητών με χρήση της κλίμακας de Boer, κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση για τη θάμβωση δυσφορίας, που δίνει μια διαφορετική κλίμακα [3]:

$$DG = \log(E_L + E_S) + 0,6 \cdot \log\left(\frac{E_L}{E_S}\right) - 0,5 \cdot \log(E_A) \quad (1.1)$$

όπου:

E_L η ένταση φωτισμού της πηγής (σε lux)

E_S η ένταση φωτισμού του περιβάλλοντος (σε lux)

E_A η ένταση φωτισμού του περιβάλλοντος αν η πηγή της θάμβωσης δεν είχε εγκατασταθεί (σε lux)

Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για περιπτώσεις που η πηγή έχει μικρές διαστάσεις ή βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση (γι' αυτό και δε λαμβάνει υπόψιν τη λαμπρότητά της). Σε περιπτώσεις που η πηγή καταλαμβάνει περισσότερο από $0,3^\circ$ του οπτικού πεδίου, οι Rosenhahn και Lampen (2004) διαπίστωσαν ότι η μέγιστη λαμπρότητα της

πηγής προσφέρει ακριβέστερη πρόβλεψη της θάμβωσης από την ένταση φωτισμού της [3].

Σε κάθε περίπτωση, το επίπεδο της αποδεκτής θάμβωσης θα είναι αναγκαστικά ένας συμβιβασμός ανάμεσα σε μελέτες φυσιολογίας του ανθρώπινου οφθαλμού και στο τι είναι τεχνικά εφικτό. Γενικά, όσο μεγαλύτερη η λαμπρότητα της φωτεινής πηγής, όσο μικρότερη η ανακλαστικότητα της φωτιζόμενης επιφάνειας και όσο πιο κοντά βρίσκεται η πηγή του φωτός στο κέντρο του οπτικού μας πεδίου τόσο μεγαλύτερο θα είναι το επίπεδο της θάμβωσης [4].

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το φως οριζόντιας διεύθυνσεως ανακλάται από τη σκόνη και τα σωματίδια ατμοσφαιρικών ρύπων που βρίσκονται σε υψηλή συγκέντρωση κοντά στο έδαφος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός φωτεινού στρώματος στο επίπεδο της ανθρώπινης δραστηριότητας που μειώνει την οπτική αντίθεση μεταξύ του νυκτερινού ουρανού και των ουράνιων σωμάτων, και δυσχεραίνει την αστρονομική παρατήρηση [4].

1.2) Φωτεινή παρενόχληση

Φωτεινή παρενόχληση (light trespass) ή *οχληρό φως* (obtrusive light) σύμφωνα με τον ορισμό της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού (CIE) ονομάζεται η φωτεινή ακτινοβολία που προσπίπτει εκτός των επιθυμητών ορίων και λόγω της έντασης, της κατεύθυνσης ή του φασματικού της περιεχομένου προκαλεί, σε δεδομένο περιβάλλον, ενόχληση ή μείωση της ικανότητας διάκρισης βασικών οπτικών πληροφοριών [5]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο οδικός φωτισμός που εκτός από το δρόμο φωτίζει επίσης τις αυλές ή ακόμη και το εσωτερικό των γειτονικών οικιών. Είναι ευνόητο ότι η φωτεινή παρενόχληση αποτελεί ένα αρκετά υποκειμενικό πρόβλημα, αφού είναι δύσκολο να οριστεί πότε, πού και πόση ακτινοβολία είναι ανεπιθύμητη. Για κάποιους ιδιώτες, λόγου χάρη, η ακτινοβολία των γειτονικών οδικών φωτιστικών δεν είναι ανεπιθύμητη, δεδομένου ότι μειώνει την ανάγκη φωτισμού της κατοικίας τους, άλλοι, όμως, ενοχλούνται αρκετά ώστε να προσφύγουν στη σχετική υπηρεσία του δήμου τους και να ζητήσουν να τοποθετηθεί προστατευτικό γείσο στο αντίστοιχο φωτιστικό.



Παράδειγμα φωτεινής παρενόχλησης από οδικό φωτιστικό [2].



Προβολέας ξενοδοχείου φωταγωγεί την αντικρουή κατοικία [2].

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό του οχληρού φωτός απαιτείται η μέτρηση της έντασης φωτισμού σε κατάλληλο ανάλογο με την περίπτωση επίπεδο. Σε κάποιες περιπτώσεις μετράται η οριζόντια ένταση φωτισμού (λ.χ. στο επίπεδο ενός κρεβατιού), σε άλλες απαιτείται η μέτρηση της έντασης φωτισμού σε κατακόρυφο επίπεδο (λ.χ. στο επίπεδο ενός παραθύρου). Ένταση φωτισμού 1 lx (0,1 foot-candle) μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή τιμή για έναν άνθρωπο και απαράδεκτη για κάποιον άλλο. Ενδεικτικά, τα 0,3 lx είναι μια τυπική τιμή για την ένταση φωτισμού που προκύπτει από το σεληνόφως [2].

1.3) Φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού

Η φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού (sky glow) προκύπτει ως υπέρθεση της ακτινοβολίας φυσικών και τεχνητών πηγών φωτός. Η φυσική συνιστώσα αποτελείται από τις εξής επιμέρους πηγές φωτός [6]:

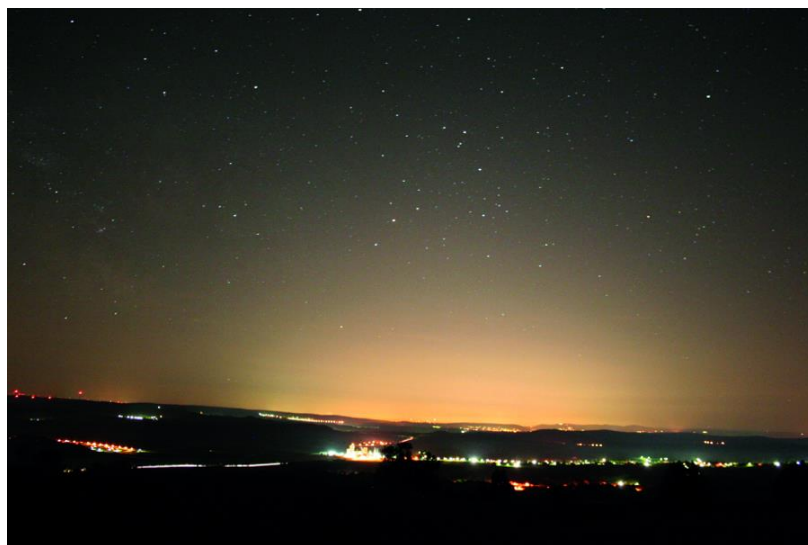
- το σεληνόφως (ουσιαστικά ηλιακό φως που ανακλάται από τη σελήνη)
- το ηλιακό φως που ανακλάται από την επιφάνεια της γης όταν ο ήλιος βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα (το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο κατά το λυκόφως ή το λυκαυγές)
- την ατμοσφαιρική φωταύγεια, δηλ. την ασθενή εκπομπή φωτός από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας που προκαλείται από φωτοχημικά και άλλα φαινόμενα εξαρτώμενα από το μαγνητικό πεδίο της γης, τον ηλιακό άνεμο (το βομβαρδισμό, δηλαδή, της ατμόσφαιρας από ηλεκτρόνια που προέρχονται από τη συνεχή ροή φορτισμένων σωματίων από τον Ήλιο), κά.. - πρόκειται ουσιαστικά για ένα μόνιμο ασθενές σέλας, σημαντικότερο ως πηγή φωτός κατά τις ασέληνες νύκτες
- το ζωδιακό φως (δηλ. ηλιακό φως ανακλώμενο από τον διαπλανητικό κονιορτό του ηλιακού μας συστήματος, ορατό μόνο κατά τις εξαιρετικά σκοτεινές νύκτες)
- το αστρικό φως (σημαντικό μόνο κατά τις ασέληνες νύκτες).
- το γαλαξιακό και κοσμικό φως (ακτινοβολία από ασθενή, μη διακριτά άστρα και νεφελώματα του δικού μας ή άλλων γαλαξιών)

Δεδομένου ότι οι φυσικές αυτές πηγές νυκτερινού φωτισμού σπάνια είναι ταυτόχρονα όλες παρατηρήσιμες, παρότι συνυπάρχουν, γίνεται φανερό ότι η καθοριστική συνιστώσα νυκτερινού φωτός και, επομένως, φωτορρύπανσης προέρχεται από τις τεχνητές πηγές φωτισμού. Φως από ηλεκτρικά φωτιστικά (που είτε κατευθύνεται απευθείας προς τον ουρανό είτε ανακλάται από το έδαφος) σκεδάζεται από σωματίδια σκόνης και μόρια αερίων, νερού και ρύπων στην ατμόσφαιρα, δημιουργώντας ένα φωτεινό υπόβαθρο που είναι ευνόητο ότι επιδεινώνεται από τις κακές καιρικές συνθήκες και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Επίσης, η φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού λόγω ηλεκτρικού φωτισμού ποικίλει ανάλογα με τις εποχές του έτους και το κλίμα μιας περιοχής, αφού το χιόνι ανακλά το προσπίπτον φως σε ποσοστά της τάξης του 80%. Το ανακλώμενο αυτό φως, σε συνδυασμό με το φως που

στέλνουν τα φωτιστικά εξωτερικού χώρου απευθείας προς τον ουρανό (για ένα τυπικό φωτιστικό δρόμου περίπου το 2-5% του συνολικού εκπεμπόμενου φωτός) αυξάνει δραστικά τη φωτεινότητα και το μέγεθος των θόλων φωτός που δεσπόζουν πάνω από αστικές περιοχές [4].



**Έντονη φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού της Νέας Υόρκης.
(πηγή: <http://www.wikipedia.com>)**



**Θόλος φωτός πάνω από την πόλη της Βιέννης.
(πηγή: Loss of the Night Network, <http://www.cost-lonne.eu>)**

Το συνεχώς επιδεινούμενο πρόβλημα της φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού ανησυχεί πρωτίστως τους αστρονόμους, γιατί περιορίζει την ικανότητά τους να παρατηρήσουν τα ουράνια σώματα. Ο νυκτερινός ουρανός ενός τυπικού προαστίου είναι 5-10 φορές φωτεινότερος στο ζενίθ (την κάθετη στο έδαφος γωνία στο σημείο παρατήρησης) από το φυσικό νυκτερινό ουρανό, ενώ ένα τυπικό αστικό κέντρο είναι 25-50 φορές φωτεινότερο [2].



Ο αστερισμός του Ωρίωνα, όπως φαίνεται από περιοχή χωρίς φωτορρύπανση (αριστερά) και από τη μητροπολιτική περιοχή του Πρόβο στη Γιούτα (δεξιά) (πηγή: <http://www.wikipedia.com>).

Μια έννοια που χρησιμοποιείται συχνά στην επιστήμη της αστρονομίας είναι το φαινόμενο μέγεθος αστέρος, ένα αριθμός που προσδιορίζει πόσο λαμπρός φαίνεται ένας αστέρας σε μια κλίμακα από το 1 έως το 7 (όσο μικρότερη η τιμή, τόσο λαμπρότερο φαίνεται το άστρο). Σε ένα εξαιρετικά σκοτεινό τοπίο και σε ιδανικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ένας πεπειραμένος παρατηρητής μπορεί να διακρίνει με γυμνό οφθαλμό άστρα φαινόμενου μεγέθους 7 (ο ουρανός έχει μέγεθος 7). Σε αυτήν την περίπτωση είναι διακριτά περίπου 7000 άστρα. Σε συνθήκες μέτριας φωτορρύπανσης διακρίνονται περίπου 800 άστρα, και ο γαλαξίας μας είναι οριακά

ορατός (ουρανός μεγέθους 5) [7]. Έτσι, εκτίμηση της φωτορρύπανσης σε μια περιοχή μπορεί να γίνει με βάση την ορατότητα γνωστών αστερισμών (π.χ. της Μεγάλης ή της Μικρής Άρκτου) ή το συνολικό αριθμό των ορατών άστρων.

Από αστρονομικά δεδομένα που έχουν καταγραφεί υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού έχουν επίσης προκύψει διάφορες μέθοδοι για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού σε σχέση με την απόσταση από την πόλη που αποτελεί την πηγή της, χωρίς, όμως, να καταφέρουν να συνδέσουν άμεσα το φαινόμενο με τις εκπομπές τεχνητού φωτός. Το απλούστερο μοντέλο πρόβλεψης που διαθέτει ικανοποιητική ακρίβεια είναι αυτό του Garstang (1991), βασισμένο στο νόμο του Walker (1970,1973,1991) με βάση το οποίο η αναμενόμενη φωτεινότητα I του ουρανού στην κατεύθυνση της πηγής και υπό γωνία 45° δίνεται από τη σχέση [8]:

$$I = \frac{C \cdot P}{d^{2,5}} \quad (1.2)$$

όπου:

P ο πληθυσμός της πόλης-πηγής

d η απόσταση του σημείου μέτρησης από την πόλη-πηγή

C μια σταθερά που εξαρτάται από τις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται, από την εκτιμώμενη «κατανάλωση» φωτός σε lumen κατά κεφαλήν και από άλλους παράγοντες, όπως ο βαθμός ανάκλασης του εδάφους.

Η τιμή που προκύπτει είναι η ποσοστιαία επαύξηση της φυσικής φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού. Πέραν των απλουστεύσεων που έγιναν κατά την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου [9] σχετικά με τη μορφολογία του εδάφους (θεωρώντας τοπικά τη Γη εντελώς επίπεδη και λεία) και το ρόλο της ατμόσφαιρας στη σκέδαση και την απορρόφηση του φωτός (θεώρησε μηδενική ατμόσφαιρα, δηλαδή κενό) ο αριθμός των φωτεινών πηγών και η κατανομή τους, η ισχύς τους, καθώς και το ποσοστό του ανακλώμενου φωτός είναι παράμετροι που δε συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς. Η μοντελοποίηση αυτών των πληροφοριών αποτελεί πραγματική πρόκληση, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη στοιχεία όπως η γωνιακή κατανομή της φωτεινής ροής από τα εγκατεστημένα φωτιστικά (που διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή), η γωνιακή κατανομή και η ένταση του ανακλώμενου από το

περιβάλλον φωτός (ομοίως) αλλά και η υγρασία και η ατμοσφαιρική ρύπανση που μπορεί να αλλάξουν για την ίδια περιοχή από στιγμή σε στιγμή.

1.4) Φασματικό περιεχόμενο

Αξίζει να σημειώσουμε ότι το χρώμα του εκπεμπόμενου τεχνητού φωτός (η φασματική κατανομή του στα ορατά μήκη κύματος) έχει επίσης αναγνωριστεί ως ένα είδος φωτεινής ρύπανσης, όταν παραμορφώνει χρωματικά το περιβάλλον. Η επιλογή κατάλληλου λαμπτήρα δεν είναι μόνο ζήτημα αισθητικής, ή εξοικονόμησης ενέργειας. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης (LPS) εκπέμπουν έντονα κίτρινο φως που μπορεί να παραμορφώνει οπτικά το περιβάλλον, ωστόσο προτιμάται από τους αστρονόμους γιατί αποκλείεται εύκολα από τα τηλεσκοπικά δεδομένα με κατάλληλα φίλτρα [10]. Από την άλλη, σημαντικό μέρος των αστρονομικών παρατηρήσεων γίνεται στην περιοχή των υπερύθρων και των υπεριωδών μηκών κύματος, και άλλο ένα μεγάλο μέρος των παρατηρήσεων βασίζονται στη φασματοσκοπία. Επομένως, από την πλευρά της αστρονομίας δεν επαρκεί η μελέτη της ορατής μόνο συνιστώσας του τεχνητού φωτός όταν εξετάζεται το ζήτημα της φωτορρύπανσης. Ακόμη και ακτινοβολία με μήκος κύματος στο άκρο ιώδες ή ερυθρό του ορατού φάσματος μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε συγκεκριμένα είδη αστρονομικών παρατηρήσεων, ενώ πολύ λίγο θα συνεισφέρει στην οπτική αίσθηση της φωτεινότητας [10].

Κεφάλαιο 2

Η κατάσταση παγκοσμίως

Εξαιτίας του σύγχρονου τρόπου ζωής, με την αδιάκοπη νυκτερινή δραστηριότητα που χαρακτηρίζει τα αστικά κέντρα, στο νυκτερινό φωτισμό αντιστοιχεί σημαντικό μερίδιο της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Ενδεικτικά, στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2006 ο φωτισμός (κατά κύριο λόγο ο εσωτερικός φωτισμός) αντιστοιχούσε στο 20% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα, με το δημόσιο φωτισμό να αντιστοιχεί στο 1% επί του συνόλου, και με τα επίπεδα του εξωτερικού φωτισμού γενικά να συνεχίζουν να αυξάνουν με ρυθμό 3% ετησίως [11]. Παρόλο που η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ανάλογη, λόγω της ανάπτυξης νέων, πιο αποδοτικών τεχνολογιών φωτισμού, εντούτοις αντιλαμβάνεται κανείς ότι η απώλεια φωτός λόγω φωτορρύπανσης αποτελεί πηγή τεράστιων απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας, και συνακόλουθα δισεκατομμυρίων ευρώ.

Για παράδειγμα, στα τέλη της δεκαετίας του 1990 η φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού πάνω από την πόλη του Παρισιού αντιστοιχούσε σε 38 εκατομμύρια kWh, τη στιγμή που ο συνολικός δημόσιος εξωτερικός φωτισμός της πρωτεύουσας της Φινλανδίας, Ελσίνκι, απαιτεί περίπου 170 εκατομμύρια kWh. Δηλαδή ολόκληρο το Ελσίνκι θα μπορούσε να φωταγωγηθεί για μια νύκτα με το φως που χάνεται άσκοπα μέσα σε πέντε νύκτες στο Παρίσι [12]! Στον οδικό φωτισμό φαίνεται να οφείλεται το μεγαλύτερο μέρος του μη χρήσιμου φωτός που προκαλεί φωτορρύπανση, αν και οι ερευνητές δεν έχουν καταλήξει σε κάποιο ποσοστό – οι εκτιμήσεις κυμαίνονται από το 14% του Schreuder (1991) ως το 50% του Shaflik (1997) [13].



Όψη του νυκτερινού Παρισιού από το Διεθνή Διαστημικό Σταθμό το 2013

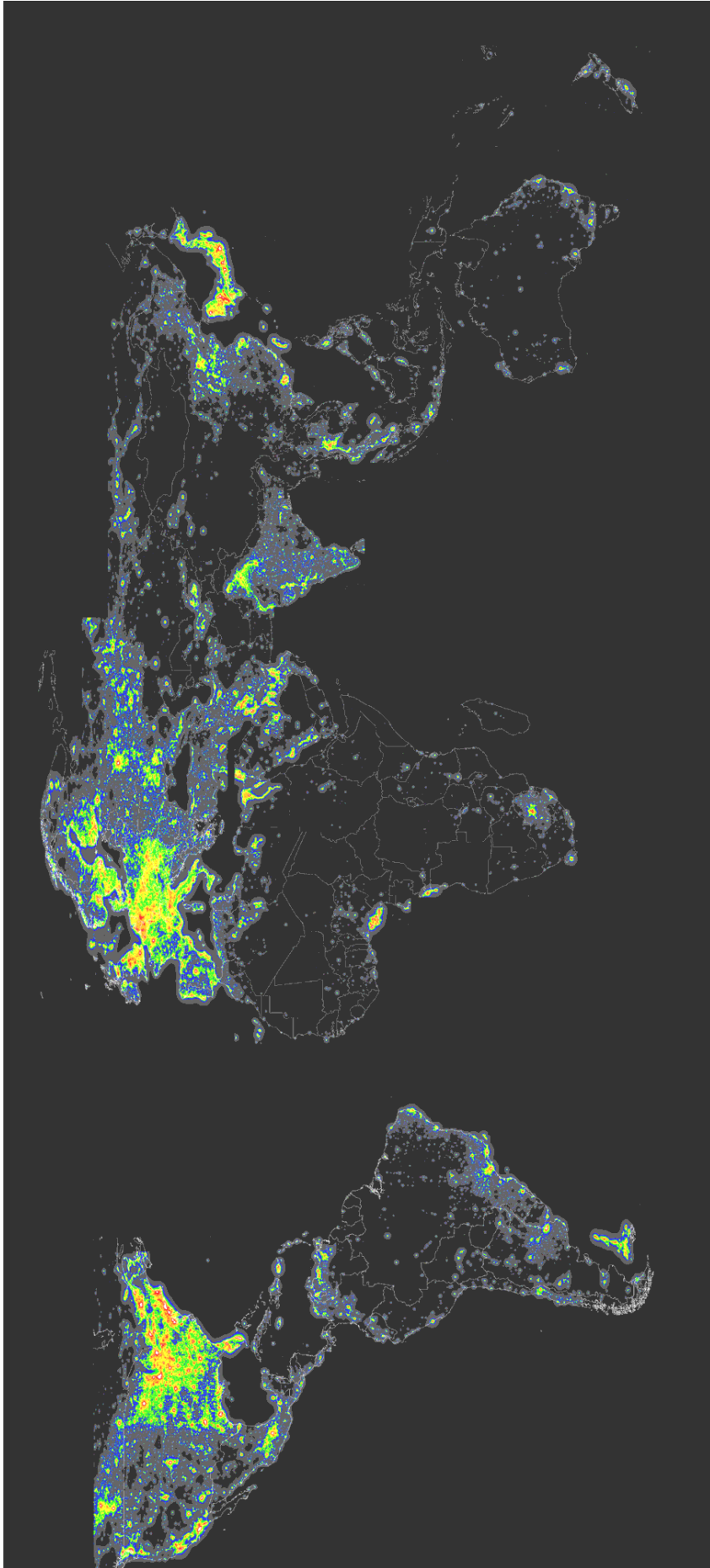
(πηγή: www.wikipedia.com).

Με σύνθεση δεδομένων από τους μετεωρολογικούς δορυφόρους του αμερικανικού υπουργείου αμύνης, οι Cinzano et al. δημοσίευσαν το 2001 τον πρώτο παγκόσμιο άτλαντα τεχνητής φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού. Οι τιμές φωτεινότητας αντιστοιχούν στο ζενίθ και στο επίπεδο της θάλασσας και η εικόνα που συνθέτουν καταδεικνύει πολύ ευκρινώς το μέγεθος του προβλήματος. Ενδεικτικά, περίπου τα 2/3 του παγκόσμιου πληθυσμού και το 99% του πληθυσμού των ΗΠΑ (εξαιρουμένης της Αλάσκας και της Χαβάης) και της Ευρωπαϊκής Ένωσης ζουν σε περιοχές με νυκτερινό ουρανό φωτορρυπασμένο. Περίπου το 1/5 του παγκόσμιου πληθυσμού, πάνω από τα 2/3 του πληθυσμού των ΗΠΑ και πάνω από το μισό πληθυσμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν έχουν τη δυνατότητα να δουν δια γυμνού οφθαλμού το γαλαξία μας. Τέλος, περίπου το 1/10 του παγκόσμιου πληθυσμού, πάνω από το 40% του πληθυσμού των ΗΠΑ και το 1/6 του πληθυσμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν αντικρύζουν πλέον το νυκτερινό ουρανό με τα μάτια τους προσαρμοσμένα στη νυκτερινή όραση, λόγω της φωτεινότητας [14]! Το πρόβλημα είναι παγκόσμιο και δεν αφορά μόνο τις ανεπτυγμένες χώρες. Μάλιστα πολλές περιοχές που θεωρούνταν μη φωτορρυπασμένες εμφανίζουν στον άτλαντα μη αμελητέα επίπεδα τεχνητής νυκτερινής φωτεινότητας,

εξαιτίας της σκέδασης φωτός από πηγές σε γειτονικές περιοχές – σε αρκετές περιπτώσεις από γειτονικές χώρες. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να ανοίξει ένα νέο κεφάλαιο στη διεθνή νομολογία. Τα δεδομένα αναφέρονται στα έτη 1996-1997, και η κατάσταση σήμερα είναι αναμφισβήτητα χειρότερη¹.

Αυτή η παγκόσμια τάση της ανθρωπότητας να αυξάνει συνεχώς τη φωτεινότητα του νυκτερινού της περιβάλλοντος μπορεί να έχει αναπάντεχες συνέπειες για το μέλλον. Η θέα του έναστρου ουρανού ανέκαθεν μάγευε τον άνθρωπο και του υπενθύμιζε την ελαχιστότητα της ύπαρξής του μέσα στο απέραντο σύμπαν, γι' αυτό και έπαιξε σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση μεγάλων πολιτισμών, επηρεάζοντας τη θρησκεία και τη φιλοσοφία, εμπνέοντας καλλιτέχνες και ποιητές. Πέραν τούτων, όμως, τεράστια σημασία είχε η δυνατότητα παρατήρησης του νυκτερινού ουρανού για την ανάπτυξη των επιστημών και την εξερεύνηση του πλανήτη μας. Κι όμως, αυτή τη στιγμή, εκτιμάται ότι αστεροσκοπεία και παρατηρητήρια σε όλον τον κόσμο κινδυνεύουν να χάσουν μέσα σε λίγα χρόνια την ποιότητα του νυκτερινού ουρανού που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία τους, αν δε ληφθούν επειγόντως μέτρα για την αντιμετώπιση της φωτεινής ρύπανσης, ακόμη και σε ακτίνα 250 χμ. [14]!

¹ Για την ακρίβεια είναι αποδεδειγμένα χειρότερη. Μόλις τον Ιούνιο του 2016 δημοσιεύθηκε η νέα έκδοση του παγκόσμιου άτλαντα τεχνητής φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού, που παρουσιάζει το πρόβλημα σημαντικά επιδεινωμένο: πάνω από το 80% του παγκόσμιου πληθυσμού και το 99% του πληθυσμού των ΗΠΑ και της Ευρώπης ζουν κάτω από φωτορρυπασμένο νυκτερινό ουρανό, πάνω από το 1/3 της ανθρωπότητας (το 60% των Ευρωπαίων και σχεδόν το 80% των Βορειοαμερικανών) στερούνται τη θέα του γαλαξία [15].



Ο παγκόσμιος άτλας τεχνητής φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού (πηγή: www.lightpollution.it).

Ινστιτούτα και οργανισμοί με αντικείμενο την έρευνα σε διάφορα επιστημονικά πεδία παρακολουθούν εδώ και πολλά χρόνια την εξέλιξη του προβλήματος, ενώ η διεθνής κοινότητα έχει αρχίσει, έστω και καθυστερημένα, να αναγνωρίζει τη σημασία του και να συζητά το θέμα σε επίπεδο διεθνών οργανισμών [16]. Σε διεθνές συνέδριο της UNESCO στο Παρίσι το 1992 υπήρξε η πρόταση να ανακηρυχθεί ο νυκτερινός ουρανός παγκόσμια κληρονομιά, ενώ το θέμα συζητήθηκε και στο 3^ο Διεθνές Συνέδριο του ΟΗΕ για τις Ειρηνικές Χρήσεις του Διαστήματος, το 1999 στη Βιέννη. Παράλληλα, εκπαιδευτικά προγράμματα υποστηρίζονται ανά τον κόσμο από εθνικούς ή διεθνείς οργανισμούς αστρονομίας και κυβερνήσεις.

Η επιδείνωση του προβλήματος οδήγησε κάποιες χώρες να προχωρήσουν πέρα από τα εκπαιδευτικά και στη λήψη νομοθετικών μέτρων. Ήδη από το 1988 η Ισπανία έθεσε σε εφαρμογή τον πρώτο νόμο κατά της φωτορύπανσης παγκοσμίως, προκειμένου να προστατεύσει την ποιότητα του νυκτερινού ουρανού των Καναρίων Νήσων, όπου εδρεύει διεθνές αστεροσκοπείο [17]. Έκτοτε πολλές χώρες έχουν λάβει κάποιου είδους μέτρα για την αντιμετώπιση της φωτεινής ρύπανσης σε εθνικό ή τοπικό επίπεδο (ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιταλία, Κίνα, Τουρκία, Χιλή, Τσεχία, Ελβετία, Γερμανία, Σλοβενία). Συνήθως τα μέτρα είναι πολύ ήπια για το μέγεθος του προβλήματος ή δεν εξασφαλίζεται η αυστηρή τήρησή τους, ωστόσο αποτελούν ένα πρώτο βήμα προς τη σωστή κατεύθυνση. Το πιο γνωστό και ολοκληρωμένο νομοθετικό παράδειγμα αντιμετώπισης της φωτεινής ρύπανσης έχει δώσει η Ιταλία, με περισσότερα από 5 νομοσχέδια εθνικής ισχύος, ενώ τοπικοί νόμοι, περισσότερο ή λιγότερο αποτελεσματικοί, ισχύουν ήδη σε 9 επαρχίες που καλύπτουν περισσότερο από το μισό πληθυσμό της χώρας και τα κυριότερα αστικά κέντρα (Μιλάνο, Ρώμη, Βενετία, Φλωρεντία, Νάπολη) [16]. Ο νόμος που ισχύει στη Λομβαρδία από το 2000 (με κάποιες τροποποιήσεις το 2004) αποτελεί ίσως το πιο αυστηρό και αποτελεσματικό δείγμα. Ο συγκεκριμένος νόμος εστιάζει στα φωτιστικά που θα χρησιμοποιηθούν για εξωτερικό φωτισμό, είτε σε νέες εγκαταστάσεις είτε σε ανακατασκευές παλαιότερων συστημάτων φωτισμού και ορίζει ότι [1],[18]:

1) κάθε φωτιστικό θα παρουσιάζει μηδενική φωτεινή ένταση σε γωνίες από 90^ο και πάνω, με εξαιρέσεις μόνο για κάποια αρχιτεκτονικά μνημεία

2) η λαμπρότητα και η ένταση φωτισμού δε θα υπερβαίνει το ελάχιστο που ορίζουν οι ευρωπαϊκοί τεχνικοί κανονισμοί (UNI10439, DIN5044, EN 13201 κ.ά.) και το φωτιστικό θα πρέπει υποχρεωτικά να συνοδεύεται από συσκευή dimmer ώστε από

τα μεσάνυχτα και μετά η φωτεινή ροή να μπορεί να μειώνεται τουλάχιστον κατά το 30% της μέγιστης φωτεινής ροής του φωτιστικού

3) οι λαμπτήρες που θα χρησιμοποιούνται θα έχουν τη βέλτιστη δυνατή φωτεινή απόδοση ανάλογα με την τεχνολογία τους

4) κατασκευαστές, εισαγωγείς και έμποροι θα πρέπει αφενός να παρέχουν για όλα τα προϊόντα που προσφέρουν σωστές οδηγίες εγκατάστασης και χρήσης, αφετέρου να πιστοποιούν, παράλληλα με άλλες τεχνικές παραμέτρους, τη συμβατότητά τους με το συγκεκριμένο νόμο και τα πρότυπα που αυτός ορίζει, με την παροχή πιστοποιητικού συμμόρφωσης εκδεδομένου από εθνικά ή διεθνή ινστιτούτα που έχουν ως αντικείμενο μελέτης την ασφάλεια και ποιότητα προϊόντων

5) για κάθε φωτιστικό ο κατασκευαστής θα πρέπει να παρέχει φωτομετρικά δεδομένα, τόσο σε έντυπη όσο και σε ηλεκτρονική μορφή, πιστοποιημένα και υπογεγραμμένα από το διευθυντή του εργαστηρίου που διεξήγαγε τις μετρήσεις.

Ο νόμος σίγουρα έχει περιθώρια βελτίωσης, αφού, για παράδειγμα, δεν θέτει κανένα όριο στην εγκατάσταση νέων συστημάτων φωτισμού (με βάση, πάντως, την έρευνα του Falchi το 2011, παρά το διπλασιασμό, μέσα σε 12 χρόνια, της εξωτερικά εγκατεστημένης φωτεινής ροής στη Λομβαρδία, η τεχνητή φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού δεν αυξήθηκε [19]). Ωστόσο αποτέλεσε μεγάλη καινοτομία, γι' αυτό και έχει χαρίσει στο δήμο της Λομβαρδίας εθνικά και διεθνή βραβεία [18], ενώ έχει αποτελέσει πρότυπο και για άλλες χώρες που θέλησαν να λάβουν νομοθετικά μέτρα ενάντια στη φωτορρύπανση, όπως η Σλοβενία (2007) [17].

Κεφάλαιο 3

Συνέπειες της φωτεινής ρύπανσης

Πέρα από τις ενεργειακές απώλειες και, επομένως, τη σπατάλη φυσικών πόρων στην οποία οδηγεί ο υπερφωτισμός στις σύγχρονες κοινωνίες, και βέβαια την απώλεια της θέας του νυκτερινού ουρανού, υπάρχουν επίσης αρνητικές συνέπειες της φωτορρύπανσης που άπτονται της ποιότητας ζωής του ανθρώπου, αλλά και της επιβίωσης και ευημερίας άλλων ζωντανών οργανισμών, με τη σχετική βιβλιογραφία να μετρά πλέον εκατοντάδες διατριβές. Επιπλέον, αξίζει να εξετάσουμε την αντιστροφή της ωφέλειας που προσφέρει στις ανθρώπινες κοινωνίες ο φωτισμός όταν εκφυλίζεται σε υπερφωτισμό.

3.1) Τεχνητό φως και οδική ασφάλεια

Το μεγαλύτερο μέρος του τεχνητού φωτός στο εξωτερικό περιβάλλον αντιστοιχεί στον οδικό φωτισμό, σκοπός του οποίου είναι η οδική ασφάλεια κατά τις νυκτερινές μετακινήσεις. Η απουσία φωτισμού προκαλεί ένα δυσανάλογα μεγάλο αριθμό ατυχημάτων (σε σχέση με το σύνολο των μετακινουμένων), κυρίως δε αυτών που περιλαμβάνουν πεζούς. Οι πεζοί είναι η πιο ευάλωτη ομάδα όσον αφορά τις νυκτερινές μετακινήσεις γι' αυτό και είναι αυτή που ωφελείται περισσότερο από την ύπαρξη οδικού φωτισμού. Οι Sullivan και Flannigan εκτιμούν ότι οι πεζοί είναι 3-6,75 φορές πιο πιθανό να εμπλακούν σε ατύχημα τη νύκτα απ' ό,τι την ημέρα, ενώ οι Schwab et al, η CIE και ο Elvik εκτιμούν ότι ο οδικός φωτισμός μπορεί να μειώσει τα νυκτερινά τροχαία δυστυχήματα που περιλαμβάνουν πεζούς κατά περίπου 50% [20]. Επίσης, πλήθος ερευνών έχει αποδείξει ότι διασταυρώσεις και κυκλοφοριακοί κόμβοι που διαθέτουν φωτισμό παρουσιάζουν πολύ λιγότερα ατυχήματα από αντίστοιχα αφώτιστα οδικά σημεία.

Αυτά τα είδη ατυχημάτων (που περιλαμβάνουν πεζούς ή συμβαίνουν σε διασταυρώσεις) οφείλονται συνήθως στην ελλιπή ορατότητα – σε περιπτώσεις όμως ευθείων οδών τα τροχαία ατυχήματα προκαλούνται κατά κύριο λόγο από άλλες αιτίες (κόπωση του οδηγού, οδήγηση υπό επήρεια ουσιών, κτλ) και ο φωτισμός δε φαίνεται να έχει άμεση επίδραση. Ακόμη, όμως, και στην περίπτωση των κυκλοφοριακών κόμβων, ο πλήρης φωτισμός δε φαίνεται να προσφέρει κάποιο σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με το μερικό φωτισμό [20]. Έτσι, διάφορες χώρες εξετάζουν την πιθανότητα να μειώσουν τον οδικό φωτισμό, σε μια προσπάθεια περιορισμού των δαπανών και εξοικονόμησης ενέργειας. Για παράδειγμα, έρευνα στην Αγγλία και την Ουαλία εξέτασε την επίδραση που είχε μια ποικιλία μέτρων περιορισμού του οδικού φωτισμού (πλήρης διακοπή του φωτισμού, φωτισμός μόνο για κάποιες ώρες της νύκτας, ελάττωση της έντασης του φωτισμού, αντικατάσταση εγκατεστημένων λαμπτήρων νατρίου με λαμπτήρες φθορισμού ή LED οι οποίοι παρουσιάζουν πολύ χαμηλή κατανάλωση), στον αριθμό των τροχαίων ατυχημάτων που καταγράφηκαν από 62 τοπικές αρχές κατά το χρονικό διάστημα 2000-2013. Η έρευνα κατέληξε ότι καμία από τις στρατηγικές προσαρμογής του οδικού φωτισμού δε συνδέεται με αλλαγή του αριθμού των τροχαίων ατυχημάτων κατά τη διάρκεια της νύκτας [21].

Αντίθετα, αύξηση της έντασης του οδικού φωτισμού πέρα από κάποια τιμή φαίνεται να συνδέεται με αύξηση των τροχαίων ατυχημάτων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της νύκτας. Για παράδειγμα, η έρευνα του Box [20] κατέληξε ότι ένταση φωτισμού της τάξης των 8,5-16 lux συνδέεται με μεγαλύτερο αριθμό ατυχημάτων σε σχέση με συνθήκες φωτισμού 3-6 lux. Ο Box πιθανολογεί ότι ίσως η αυξημένη ένταση φωτισμού ήταν πηγή θάμβωσης (που αποδεδειγμένα προκαλεί εξασθένηση της όρασης, κυρίως σε άτομα άνω των 50 ετών). Από την άλλη η CIE αξιολογώντας την έρευνά του θεωρεί ότι ενδεχομένως για να επιτευχθεί εντονότερος φωτισμός τα φωτιστικά είχαν εγκατασταθεί πολύ κοντά το ένα στο άλλο, με αποτέλεσμα ανομοιόμορφο φωτισμό (που δημιουργεί πρόβλημα στην όραση λόγω της δυσκολίας του οφθαλμού να προσαρμοστεί στην εναλλαγή των συνθηκών φωτός) ή υπερβολικά ομοιόμορφο φωτισμό (ώστε να γίνεται δύσκολη η διάκριση συγκεκριμένων αντικειμένων στο υπόβαθρο). Δεν αποκλείεται επίσης η πυκνότερη εγκατάσταση των πόλων να προσέφερε απλώς περισσότερα αντικείμενα με τα οποία ένα όχημα θα μπορούσε να συγκρουστεί, ενώ ακόμη και η εσφαλμένη αίσθηση υπερβολικής ασφάλειας που δημιουργούν στους οδηγούς τα αυξημένα επίπεδα φωτός θα μπορούσε να έχει παίξει κάποιο ρόλο [20].

3.2) Τεχνητό φως και εγκληματικότητα

Είναι ευρύτατα διαδεδομένη η αίσθηση ότι τα αυξημένα επίπεδα φωτός εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ασφάλεια, εμποδίζοντας τις εγκληματικές δραστηριότητες. Αυτός είναι και ο λόγος που πολλές κοινωνίες, αστικές ως επί το πλείστον, οδηγούνται στον υπερφωτισμό του περιβάλλοντος. Σίγουρα η ύπαρξη ικανοποιητικού νυκτερινού φωτισμού (επαρκής ένταση φωτισμού, ομοιομορφία, απουσία θάμβωσης, πιστότητα χρωματικής απόδοσης) είναι απαραίτητη για την ασφαλή κυκλοφορία σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Παρότι συστηματική αξιολόγηση των φωτεινών αυτών χαρακτηριστικών δεν είναι διαθέσιμη, ο Boyce [22] σε μια σύνθεση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας καταλήγει ότι για περιοχές πεζών εξοπλισμένες με φωτεινές πηγές καλής χρωματικής απόδοσης, η μέση ένταση φωτισμού στο πεζοδρόμιο θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 10-50 lux, ο λόγος ομοιομορφίας (μέγιστη προς ελάχιστη ένταση φωτισμού) δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 15:1, και ο λόγος θάμβωσης (λαμπρότητα η οποία προκαλεί θάμβωση που παρεμποδίζει την όραση - veiling luminance - προς μέση λαμπρότητα) το 4:1.

Παρόλ' αυτά, φωτεινότερο περιβάλλον δε σημαίνει απαραίτητα και ασφαλέστερο περιβάλλον. Πολλές μελέτες ανά τον κόσμο έχουν εξετάσει τη σύνδεση μεταξύ εγκληματικότητας και νυκτερινού φωτισμού, ωστόσο οι περισσότερες διεξάγονται από εγκληματολόγους και όχι επαγγελματίες φωτισμού, με αποτέλεσμα να στερούνται λεπτομερών πληροφοριών για τις συνθήκες φωτισμού, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα. Είναι γεγονός ότι πέρα από τα οπτικά οφέλη που προσφέρει σε μια περιοχή ο προσεγμένος φωτισμός, δίνει στους κατοίκους και την αίσθηση ότι οι τοπικές αρχές ενδιαφέρονται για τη γειτονιά τους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αυτοπεποίθηση και το αίσθημα ασφάλειας της τοπικής κοινωνίας και συνεπώς η κυκλοφορία στους δημόσιους χώρους κατά τις νυκτερινές ώρες. Αυτή η ψυχολογική ανάταση που προσφέρει στην τοπική κοινωνία η βελτίωση του τεχνητού φωτισμού (και όχι απαραίτητα το φως αυτό καθαυτό) φαίνεται να έχει σε κάποιες περιπτώσεις ως έμμεσο αποτέλεσμα τη μείωση των κρουσμάτων εγκληματικότητας στην περιοχή τόσο κατά τη διάρκεια της νύκτας όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας [20]! Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις, που η μείωση των επιπέδων οδικού φωτισμού έχει θετική επίδραση στα επίπεδα της εγκληματικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το πρόγραμμα που εφαρμόστηκε στην Αγγλία και την Ουαλία [21], τα αποτελέσματα

του οποίου υποδηλώνουν συσχετισμό μεταξύ της μείωσης της έντασης φωτισμού (dimming) και της μείωσης των κρουσμάτων εγκληματικότητας, ιδιαίτερα των βίαιων. Μια βάσιμη εξήγηση θα αποτελούσε η υπόθεση ότι τα χαμηλότερα επίπεδα φωτός δυσχεραίνουν τον εντοπισμό από τους εγκληματίες κατάλληλων στόχων ανάμεσα στους περαστικούς τη νύκτα. Τα αποτελέσματα επίσης υποδηλώνουν ένα συσχετισμό μεταξύ της αντικατάστασης των λαμπτήρων κίτρινου φωτός (LPS) από λαμπτήρες λευκού φωτός (LED ή φθορισμού) με μείωση των κρουσμάτων, κυρίως των διαρρήξεων, πιθανότατα λόγω της αυξημένης ορατότητας που συνεπάγεται η καλύτερη χρωματική ποιότητα του φωτός, ή ίσως και λόγω της οπτικής αναβάθμισης της γειτονιάς που δίνει και την εντύπωση κοινωνικής αναβάθμισης [21].

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν περιπτώσεις που η βελτίωση του δημόσιου φωτισμού συνοδεύτηκε από αύξηση της εγκληματικότητας. Για παράδειγμα, κατά το πρόγραμμα βελτίωσης του δημόσιου φωτισμού σε υποβαθμισμένες περιοχές της πόλης του Σικάγο παρατηρήθηκε αύξηση των καταγεγραμμένων κρουσμάτων εγκληματικότητας σε όλες τις κατηγορίες (σε βίαια εγκλήματα όπως ανθρωποκτονίες, ληστείες, επιθέσεις, εγκλήματα κατά της ιδιοκτησίας αλλά και βανδαλισμούς, πορνεία και κατοχή ουσιών ή όπλων) μετά την εγκατάσταση του βελτιωμένου συστήματος φωτισμού, και μάλιστα σε βαθμό μεγαλύτερο απ' ό,τι στην αντίστοιχων προδιαγραφών περιοχή που επιλέχθηκε ως αναφορά και στην οποία δεν άλλαξε ο εγκατεστημένος φωτισμός [23]. Μάλιστα η αύξηση των καταγγελιών για εγκληματική δραστηριότητα αφορούσε κρούσματα κατά τις νυκτερινές ώρες – ο αριθμός των ημερήσιων περιστατικών παρουσίασε γενικά μείωση, ή έμεινε σταθερός ή αυξήθηκε ελάχιστα. Τα ευρήματα είναι δύσκολο να αξιολογηθούν με βεβαιότητα, ωστόσο μια βάσιμη εξήγηση είναι ότι τα αυξημένα επίπεδα φωτός (τα παλαιά φωτιστικά ισχύος 90 Watt αντικαταστάθηκαν από νέα, ισχύος 250 Watt) διευκόλυναν τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση των εγκληματικών δραστηριοτήτων από αστυνομικούς σε περιπολία αλλά και από ντόπιους κατοίκους. Είναι πιθανό, δηλαδή, να μην αυξήθηκαν γενικώς τα κρούσματα εγκληματικότητας, αλλά τα καταγγελλθέντα στις αρχές κρούσματα, λόγω αυξημένης ορατότητας [23].

Τα παραπάνω αποδεικνύουν ότι είναι πολύ δύσκολο να επιβεβαιωθεί πέραν αμφιβολίας η απόλυτη μείωση της εγκληματικότητας χάρη στο δημόσιο φωτισμό και το θέμα θα πρέπει να εξετάζεται για κάθε περιοχή ξεχωριστά. Είναι λογικό, πάντως, το συμπέρασμα ότι το πρόβλημα της εγκληματικότητας δεν μπορεί να θεραπευθεί αποκλειστικά και μόνο από το φωτισμό. Ο κοινωνικός έλεγχος αποτελεί επίσης

σημαντικό παράγοντα, και αν αυτός εκλείψει ο έντονος φωτισμός θα αποτελέσει πλεονέκτημα για τους κακοποιούς, διευκολύνοντας την επιλογή του κατάλληλου τόπου και θύματος και την πραγματοποίηση του εγκλήματος. Επιπλέον, τα υψηλά επίπεδα θάμβωσης που συνοδεύουν συνήθως τον υπερφωτισμό ή τον κακού σχεδιασμού φωτισμό ασφαλείας μπορούν να αποτρέψουν τον έγκαιρο εντοπισμό του εν εξελίξει εγκλήματος, αναγκάζοντας τους περαστικούς να στρέφουν το βλέμμα τους αλλού και προσφέροντας στους κακοποιούς έντονες σκιές που αποτελούν βολικές κρυψώνες [24].

3.3) Τεχνητό φως και φυσικό περιβάλλον

Η επιβίωση των ζωντανών οργανισμών, φυτικών και ζωικών, εξαρτάται από την ικανότητά τους να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες, είτε αυτές αφορούν το χώρο στον οποίο ζουν είτε τις χρονικές εναλλαγές ημέρας και νύκτας, καθώς και των εποχών του χρόνου. Δεδομένου ότι η ένταση και η φασματική ποιότητα του φωτός, καθώς και η διάρκεια και η περιοδικότητα της έκθεσης σε αυτό ρυθμίζουν πολλαπλά τη βιοχημεία, τη φυσιολογία και τη συμπεριφορά των οργανισμών (και κυρίως εποχική συμπεριφορά όπως η ετήσια μετανάστευση και η χειμέρια νάρκη), καταλαβαίνει κανείς ότι οι τεχνητές αλλαγές στον κύκλο του φωτός μπορούν να έχουν τεράστια επίδραση στη φυσική τους κατάσταση και τον κύκλο ζωής τους, καταλήγοντας σε οικολογικές αλλαγές μεγάλης κλίμακας, ιδιαίτερα αν πρόκειται για είδη που κατέχουν σημαντική θέση στην οικολογική αλυσίδα.

Μια από τις επιδράσεις του τεχνητού φωτός σε πολλά είδη του ζωικού βασιλείου που έχει επανειλημμένα διαπιστωθεί αφορά την αλλαγή των αναπαραγωγικών συνηθειών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, γνωστό εδώ και αιώνες, αποτελούν οι οικόσιτες κόττες που μπορούν με τη χρήση τεχνητού φωτός κατά τη διάρκεια της νύκτας να διεγερθούν ώστε να γεννούν περισσότερα αυγά κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν τα επίπεδα του φυσικού φωτός είναι χαμηλά. Ανάλογες διαταραχές στην αναπαραγωγική λειτουργία πτηνών, τρωκτικών, ψαριών και άλλων ζώων που εκτίθενται σε παρατεταμένες περιόδους φωτός έχουν ευρύτατα μελετηθεί στα εργαστήρια και οφείλονται κατά κύριο λόγο στην καταστολή της μελατονίνης, ορμόνης που παίζει καθοριστικό ρόλο στην αναπαραγωγική συμπεριφορά και

φυσιολογία πολλών ειδών και παράγεται κατά τις νυκτερινές ώρες. Αλλά και σε είδη που ζουν ελεύθερα στο περιβάλλον παρατηρούνται αλλαγές στις αναπαραγωγικές δραστηριότητες λόγω τεχνητού φωτισμού: αρσενικές ατριχόρνοιθες (mockingbird – ενδημικό ωδικό πτηνό της Αμερικής) πλέον μετά το ζευγάρι τραγουδούν για να ορίσουν την περιοχή τους μόνο σε περιοχές τεχνητά φωτισμένες (ή κατά τη διάρκεια της πανσελήνου), βάτραχοι αναπαράγονται νωρίτερα προκειμένου να αποφύγουν τους θηρευτές για τους οποίους συνθήκες αυξημένου φωτός αποτελούν μεγάλο πλεονέκτημα, λιμόζες (υδρόβια πτηνά) επιλέγουν πού θα κτίσουν τη φωλιά τους με βάση τον εγκατεστημένο οδικό φωτισμό [25]. Τέτοιες αλλαγές μπορούν να έχουν καθοριστικές συνέπειες για μεγάλο αριθμό ειδών, ιδίως όταν προκαλούν αποσυγχρονισμό του αναπαραγωγικού κύκλου από τις περιβαλλοντικές μεταβλητές όπως είναι η θερμοκρασία. Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι ο τεχνητός φωτισμός μπορεί να έχει και πολύ άμεσες αρνητικές συνέπειες στην αναπαραγωγική λειτουργία και επομένως στον πληθυσμό για είδη που συγχρονίζουν τον αναπαραγωγικό τους κύκλο με βάση αυτόν της σελήνης, προκειμένου να εξασφαλίσουν μεγαλύτερες πιθανότητες επιτυχίας της ίδιας της αναπαραγωγής ή της δυνατότητας εύρεσης τροφής για τους απογόνους [26].

Άλλη λειτουργία των ζωικών οργανισμών που επηρεάζεται από τον τεχνητό φωτισμό είναι η αναζήτηση και η θήρευση τροφής. Είναι δεδομένο, πλέον, ότι η δυναμική των σχέσεων θηρευτή-θηράματος αλλάζει σε συνάρτηση με τα επίπεδα του περιβαλλοντικού φωτός: οι θηρευτές έχουν μεγάλο πλεονέκτημα σε συνθήκες αυξημένης φωτεινότητας όπως είναι η φάση της πανσελήνου, οπότε και τα θηράματα λαμβάνουν αποφάσεις για τη δραστηριότητά τους με σκοπό να αποφύγουν να γίνουν ορατά από τους θηρευτές. Αν ο σεληνιακός κύκλος έχει τέτοια επίδραση σ' αυτές τις λειτουργίες, αντιλαμβάνεται κανείς πόσο δραματικότερες αλλαγές μπορούν να επέλθουν στα είδη που ζουν σε περιοχές όπου η νυκτερινή φωτεινότητα λόγω τεχνητού φωτισμού υπερβαίνει αυτήν της πανσελήνου [25]. Η αυξημένης διάρκειας έκθεση σε φως διαταράσσει, επίσης, τους φυσιολογικούς ρυθμούς παραγωγής μελατονίνης, η οποία σε κάποια είδη ρυθμίζει την ανάγκη για πρόσληψη τροφής, άρα και για αναζήτησή της [25].

Τέλος, είναι επιβεβαιωμένη η επίδραση του νυκτερινού φωτισμού στα μεταναστευτικά μοτίβα πολλών ειδών, τα οποία διαμορφώνονται και με βάση τα επίπεδα του περιβαλλοντικού φωτός, αλλά κυρίως στον προσανατολισμό κατά τη μετανάστευση. Χαρακτηριστικότερο, ίσως, παράδειγμα αποτελούν οι θαλάσσιες

χελώνες *caretta caretta*, τα μικρά των οποίων μετά την επώαση κινούνται προς τη θάλασσα απομακρυνόμενα από τους σκοτεινούς αμμόλοφους όπου είχαν γεννηθεί τα αυγά. Ο τεχνητός φωτισμός που συνοδεύει την αστικοποίηση των ακτών αποπροσανατολίζει τις νεαρές χελώνες, με κίνδυνο να πεθάνουν από εξάντληση αναζητώντας σε λάθος κατεύθυνση τη θάλασσα [25]. Ανάλογα, πολλά αποδημητικά πτηνά που προσανατολίζονται με βάση συγκεκριμένους αστερισμούς μπορούν να μπερδευτούν από τα νυκτερινά φώτα των σύγχρονων πόλεων και να χάσουν τον προσανατολισμό τους, καταναλώνοντας άσκοπα αποθέματα λίπους που δε θα μπορέσουν να αποκαταστήσουν, οπότε θα πεθάνουν από εξάντληση και πείνα. Άλλος σοβαρός κίνδυνος είναι πάνω στον αποπροσανατολισμό τους να καταλήξουν να συγκρουστούν με κτίρια, δέντρα ή εναέρια καλώδια. Εκτιμάται ότι ο αριθμός των αποδημητικών πτηνών που σκοτώνονται ετησίως μόνο στη Βόρεια Αμερική από σύγκρουση με κτίρια κατά το μεταναστευτικό τους ταξίδι κυμαίνεται από 100 εκατομμύρια έως 1 δισεκατομμύριο [27]!

Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι η συμπεριφορά των ζώων δεν εξαρτάται μόνο από την ένταση του τεχνητού φωτός αλλά και από το μήκος κύματός του. Για παράδειγμα, έχει διαπιστωθεί ότι τα ιπτάμενα έντομα που συχνά συγκεντρώνονται σε μεγάλους αριθμούς γύρω από τα οδικά φωτιστικά ελκύονται περισσότερο από τα μικρότερα μήκη κύματος, γι' αυτό και προτιμούν τα φωτιστικά ατμών υδραργύρου. Εκτιμάται ότι οι πηγές νατρίου υψηλής πίεσης ελκύουν μόνο το 20-60% του αριθμού των εντόμων που ελκύουν οι πηγές υδραργύρου, ενώ οι πηγές νατρίου χαμηλής πίεσης αποδεικνύονται ακόμη λιγότερο ελκυστικές. Από την άλλη πλευρά, οι τελευταίες πηγές φαίνεται να επηρεάζουν την ικανότητα πτήσης σε νυκτερινές πεταλούδες και ίσως καθιστούν απαγορευμένες για τα νυκτόβια ιπτάμενα έντομα τις περιοχές όπου χρησιμοποιούνται ευρέως [11].

Πέραν της επιβεβαιωμένης επίδρασης της φωτορρύπανσης στην πανίδα, έρευνες αποδεικνύουν ότι ούτε οι φυτικοί οργανισμοί μπορούν να μείνουν ανεπηρέαστοι από τον τεχνητό νυκτερινό φωτισμό που έχει επιβάλλει ο άνθρωπος στο περιβάλλον. Αυτό είναι απόλυτα λογικό, εφόσον η βασικότερη λειτουργία ενός φυτού, η φωτοσύνθεση για την παραγωγή ενέργειας, απαιτεί τη δέσμευση φωτός (ηλιακού ή μη) από τη χλωροφύλλη, φωτοευαίσθητη χρωστική στα φύλλα. Παράλληλα το φως αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό ρυθμιστή των ρυθμών και μοτίβων ανάπτυξης, και μάλιστα με εξειδικευμένη δράση ανάλογα με το μήκος κύματος: το κόκκινο φως ενεργοποιεί τα περισσότερα στάδια-κλειδιά στον κύκλο ζωής των ανθοφόρων, ενώ το μπλε φως

προκαλεί τον φωτοτροπισμό (δηλ. την τάση των φυτών να αναπτύσσονται προς την κατεύθυνση του φωτός). Εκτός αυτού, κάθε είδος διαθέτει φωτοϋποδοχείς με διαφορετικό φάσμα απορρόφησης, δηλαδή ευαίσθητους σε ένα χαρακτηριστικό σύνολο μηκών κύματος [11]. Επίσης, το μήκος της ημέρας – ουσιαστικά η διάρκεια της ημερήσιας έκθεσης σε φως, φυσικό ή τεχνητό – παίζει σημαντικό ρόλο στη χρονική ρύθμιση της ανθοφορίας πολλών φυτών (όπως λ.χ. η ρουπακοβελανιδιά), ώστε να μεγιστοποιηθεί η περίοδος ανάπτυξης του φυτού και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος από ένα παγετό [28].

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι τόσο το φασματικό περιεχόμενο του τεχνητού φωτός (που είναι διαφορετικό για κάθε είδος λαμπτήρα) όσο και η διάρκεια του φωτισμού είναι παράγοντες που μπορούν να καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό σημαντικές λειτουργίες των φυτών, άρα και τη φυσική τους κατάσταση συνολικά. Για παράδειγμα, έχει διαπιστωθεί ότι πλάτανοι εκτεθειμένοι σε φως λαμπτήρων HPS (ατμών νατρίου υψηλής πίεσης) παρουσίαζαν ταχεία ανάπτυξη όψιμης περιόδου, ακολουθούμενη από δριμύ χειμερινό μαρασμό σε σχέση με πλατάνους που προστατεύονταν με σκίαστρα από το φως αυτών των πηγών, ενώ έχει παρατηρηθεί ότι ο συνεχής τεχνητός φωτισμός αναστέλλει το σχηματισμό της χλωροφύλλης και ενεργοποιεί την ανάπτυξη του φυλλώματος, με συνέπεια την αυξημένη ευαισθησία των φυτών στη χημική ρύπανση [11].

Εννοείται ότι οι επιπτώσεις της φωτορρύπανσης στα φυτικά είδη θα μετακυλιστούν σε ζωικά είδη που εξαρτώνται από αυτά (και κατόπιν και σε άλλους κρίκους της τροφικής αλυσίδας): ο σκώρος της ρουπακοβελανιδιάς πρέπει να συγχρονίσει την εκκόλαψη των αυγών του με την άνθηση του δέντρου-ξενιστή. Αν τα αυγά εκκολαφθούν πολύ νωρίς, οι προνύμφες δε θα επιβιώσουν λόγω έλλειψης τροφής, αν εκκολαφθούν πολύ αργά οι προνύμφες θα πρέπει να τραφούν με δύσπεπτα φύλλα, πλούσια σε ταννίνες. Αντιλαμβάνεται κανείς πόσο δύσκολο είναι να διατηρηθούν τέτοιες λεπτές ισορροπίες, όταν για παράδειγμα στη Μεγάλη Βρετανία διαπιστώνεται μετακύλιση της άνθησης ακόμη και κατά 7,5 ημέρες νωρίτερα λόγω φωτορρύπανσης [28]. Η συγκεκριμένη έρευνα αφορούσε δέντρα δασικών περιοχών, και οι επιστήμονες εκτιμούν ότι μικρότερα φυτά που αναπτύσσονται πιο κοντά στο δίκτυο οδικού φωτισμού είναι πολύ πιθανότερο να επηρεάζονται από το τεχνητό φως.

3.4) Τεχνητός φως και άνθρωπος

Ο ηλιακός κύκλος φωτός και σκότους παρέχει την απαραίτητη βάση για τη ζωή στη Γη. Η προσαρμογή στον ηλιακό κύκλο έχει ως αποτέλεσμα θεμελιώδεις μοριακές και γενετικές διεργασίες σε όλες κατά βάση τις μορφές ζωής, οι οποίες ακολουθούν μια περίοδο 24 περίπου ωρών. Επιστημονικές ανακαλύψεις των τελευταίων δεκαετιών έχουν διαλύσει την ψευδαίσθηση ότι, ενώ ο ημερήσιος κύκλος του φωτός ρυθμίζει τη φυσιολογία και τη συμπεριφορά των περισσότερων ζωντανών οργανισμών, εντούτοις αφήνει ανεπηρέαστο τον άνθρωπο.

Πράγματι, η μελανοψίνη, φωτοευαίσθητο μόριο που ανακαλύφθηκε μόλις το 1998, εντοπίστηκε στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ανθρώπινου οφθαλμού, και αποδείχθηκε ότι δεν παίζει ρόλο στη λειτουργία της όρασης, αλλά στη ρύθμιση του κερκάδιου ρυθμού, δηλ. του εσωτερικού βιορυθμισμού του οργανισμού, ώστε να επιτυγχάνεται ο καθημερινός συγχρονισμός του με τον ηλιακό κύκλο και άρα με το περιβάλλον. Ο κερκάδιος ρυθμός παίζει βασικότατο ρόλο σε πολλές, αν όχι στις περισσότερες, πλευρές της λειτουργίας των κυττάρων αλλά και ολόκληρου του ανθρώπινου οργανισμού, μέσω της παραγωγής ορμονών: από τον ύπνο και το μεταβολισμό μέχρι την άμυνα κατά των ασθενειών και την αναπαραγωγή. Μια από τις βασικότερες ορμόνες του ανθρώπινου οργανισμού (και πολλών ζώων), η σύνθεση της οποίας απαιτεί σήμα απευθείας από το κέντρο του κερκάδιου ρυθμού στον υποθάλαμο, είναι η μελατονίνη. Η ορμόνη αυτή αποτελεί το βιοχημικό ανάλογο του σκότους και παράγεται μόνο κατά τη διάρκεια της νύκτας (ακόμη και στα νυκτόβια όντα), και παρέχει στον οργανισμό μια εσωτερική αναπαράσταση της περιβαλλοντικής φωτοπεριόδου [29]. Έτσι, διαταραχή του κερκάδιου ρυθμού συνδέεται αποδεδειγμένα με διαταραχή του κύκλου ύπνου-εγρήγορσης και (μέσω αυτής αλλά και ανεξάρτητα, λόγω του πολλαπλού ρόλου της μελατονίνης) με μεταβολικά προβλήματα (παχυσαρκία, σακχαρώδη διαβήτη τύπου II), καρδιοπάθειες αλλά και διαταραχές της διάθεσης (κατάθλιψη, άγχος) [30]. Οι Wright et al. απέδειξαν ότι ακόμη και ένταση φωτισμού 1,5 lux μπορεί να επηρεάσει τον κερκάδιο ρυθμό, αντιλαμβάνεται λοιπόν κανείς τις επιπτώσεις που θα έχει ο συνήθης νυκτερινός φωτισμός της σύγχρονης καθημερινότητας [19]!

Επίσης, οι διαταραχές στα επίπεδα της μελατονίνης, ουσίας με γνωστή αντιοξειδωτική δράση, αυξάνουν τον κίνδυνο οξειδωτικού στρες, το οποίο μπορεί να

οδηγήσει σε βλάβη των ανοσοποιητικών κυττάρων, επιτάχυνση του ρυθμού γήρανσης και συχνότερα περιστατικά καρκίνου [25]. Πράγματι, υπάρχει πλέον τόσο μεγάλος αριθμός ερευνών που αποδεικνύει τη σύνδεση μεταξύ της έκθεσης σε φως κατά τη διάρκεια της νύκτας με την ανάπτυξη διάφορων ειδών καρκίνου, ώστε ο Διεθνής Οργανισμός για την Έρευνα κατά του Καρκίνου έχει κατατάξει την εργασία με εναλλασσόμενες βάρδιες ως πιθανότατα καρκινογόνο [31]. Ο καρκίνος του μαστού αποτελεί την πιο καλά τεκμηριωμένη περίπτωση, ωστόσο αποδεικνύεται αυξημένος ο κίνδυνος και για άλλα είδη καρκίνου (όπως του παχέος εντέρου) σε ανθρώπους με διαταραγμένο κιρκάδιο ρυθμό λόγω εργασίας σε εναλλασσόμενες βάρδιες [25], και πλέον μελετάται η σχέση της εμφάνισης καρκίνου με την έκθεση σε φως κατά τη διάρκεια της νύκτας γενικώς. Αξίζει να αναφερθεί ότι, πέραν από προληπτική αντιοξειδωτική δράση, με βάση εργαστηριακά δεδομένα από την πρωτοποριακή έρευνα των Blask et al. η μελατονίνη φαίνεται επίσης να αποτελεί ισχυρό αντικαρκινικό παράγοντα με θεραπευτική δράση κατά καρκινικών όγκων του μαστού, αναστέλλοντας άμεσα την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους [31].

Όταν η έκθεση στο ερυθρό φως ενός χαμηλής ισχύος λαμπτήρα πυρακτώσεως μόλις για 39 λεπτά αρκεί για να μειώσει τα επίπεδα της μελατονίνης στον άνθρωπο κατά 50% [25], αντιλαμβάνεται κανείς πόσο περισσότερο θα επηρεάζει τον ανθρώπινο οργανισμό το μπλε φως των λαμπτήρων νέας γενιάς που πλέον έχουν επικρατήσει, εφόσον η μελανοψίνη που δρα ως φωτοϋποδοχέας για τη ρύθμιση του κιρκάδιου ρυθμού εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε μήκη κύματος της μπλε περιοχής του ορατού φάσματος. Δε θα ήταν, λοιπόν, υπερβολή να πούμε ότι ο έντονος νυκτερινός φωτισμός των σύγχρονων κοινωνιών αποτελεί μια βραδυφλεγή υγειονομική βόμβα μεγάλης ισχύος που απειλεί το σύνολο του πληθυσμού, και όχι απλώς τους εργαζομένους σε βάρδιες. Αυτός ήταν άλλωστε ο λόγος που ο Αμερικανικός Ιατρικός Σύλλογος θεωρεί επίσημα από το 2009 τη φωτορρύπανση ως κίνδυνο για τη δημόσια υγεία [19]. Όντως, οι Kloog et al. αξιολόγησαν τα μέσα επίπεδα νυκτερινού φωτός σε 164 χώρες όπως αυτά καταγράφηκαν από μετεωρολογικό δορυφόρο, σε σχέση με τα περιστατικά καρκίνου του μαστού στις αντίστοιχες χώρες, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν και τα κοινωνικο-οικονομικά δεδομένα. Από την έρευνα προέκυψε ισχυρός συσχετισμός μεταξύ των επιπέδων νυκτερινού φωτός και των ποσοστών εμφάνισης καρκίνου του μαστού [31]. Το μέλλον θα δείξει πόσες ακόμη ανεξερεύνητες συνέπειες μπορεί να έχει η φωτεινή ρύπανση για την υγεία όλων μας.

Κεφάλαιο 4

Μέτρα αντιμετώπισης της φωτεινής ρύπανσης

Τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρει για την ανθρώπινη δραστηριότητα ο εξωτερικός νυκτερινός φωτισμός είναι αδιαμφισβήτητα. Ωστόσο, δεν είναι καθόλου αδιαμφισβήτητο το ότι για τον εξωτερικό φωτισμό ισχύει το ρητό «όσο περισσότερο, τόσο το καλύτερο». Ο προσεκτικός σχεδιασμός σε όλα τα στάδια της υλοποίησης μιας εγκατάστασης φωτισμού προκειμένου να εξασφαλιστούν τα κατάλληλα επίπεδα φωτός εκεί όπου πραγματικά είναι απαραίτητα προσφέρει μεγαλύτερα οφέλη και λιγότερες αρνητικές παρενέργειες. Με αυτό το σκεπτικό καταβάλλονται παγκοσμίως διάφορες προσπάθειες για την αντιμετώπιση του προβλήματος της φωτεινής ρύπανσης, από πλευράς σύνταξης τεχνικών προδιαγραφών και ορίων, τεχνολογίας φωτισμού και εκπαίδευσης.

4.1) Ποσοτικά όρια στο φωτισμό

Σημαντικό βήμα προς τη μείωση της φωτορρύπανσης είναι η κατάρτιση κατάλληλων νομοθετικών πλαισίων αναφορικά με τα επίπεδα του τεχνητού φωτός και το χρόνο εκπομπής του, βασισμένων σε έρευνες εγνωσμένου κύρους διεθνών οργανισμών φωτισμού.

Για παράδειγμα, ο Οργανισμός Μηχανικών Φωτισμού του Ηνωμένου Βασιλείου (ILE) ακολουθώντας τη λογική της CIE [5] υποδεικνύει σχετικά όρια και για τα τρία είδη φωτεινής ρύπανσης, καθορίζοντας 4 ενεργειακές ζώνες για την κατάταξη μιας περιοχής με βάση την ένταση της ανθρώπινης δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της νύκτας [32]:

Ζώνη 1: Σκοτεινές λόγω της φύσης τους περιοχές (εθνικοί δρυμοί, προστατευόμενες περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, περιοχές που περιλαμβάνουν αστρονομικά παρατηρητήρια κλπ.).

Ζώνη 2: Αγροτικές και ημιαστικές περιοχές με χαμηλή περιβαλλοντική φωτεινότητα.

Ζώνη 3: Περιοχές με μέσα επίπεδα περιβαλλοντικής φωτεινότητας (προάστια, κέντρα μικρών πόλεων).

Ζώνη 4: Περιοχές με έντονη περιβαλλοντική φωτεινότητα (αστικά κέντρα, εμπορικές περιοχές με έντονη νυκτερινή δραστηριότητα).

Ευνόητο είναι ότι για τον περιορισμό της φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού πρέπει να ελεγχθεί η προς τα άνω (άνω της οριζοντίου) εκπεμπόμενη φωτεινή ροή των εγκατεστημένων φωτιστικών σωμάτων (ULOR), ως ποσοστό επί του συνόλου της φωτεινής ροής του φωτιστικού σώματος. Δεδομένου όμως ότι η φωτεινή αυτή ροή εκπέμπεται συνήθως σε γωνίες κοντά στην οριζόντιο και στη συνέχεια σκεδάζεται από την πρόσπτωση σε κτίρια ή βλάστηση χάνοντας μεγάλο μέρος της ισχύος της, κρίνεται απαραίτητο να ελεγχθεί επίσης η συνολική φωτεινή ισχύς (ώστε να περιοριστεί το ανακλώμενο από το έδαφος φως που ακολουθεί γωνίες κοντά στην κατακόρυφο) [9]. Για τον έλεγχο του οχληρού φωτός που προσπίπτει σε γειτονικά οικήματα προτείνονται όρια για τον έλεγχο της κατακόρυφης έντασης φωτισμού στο επίπεδο των παραθύρων E_v . Για τον έλεγχο της θάμβωσης συνιστάται ο περιορισμός της φωτεινής έντασης I των φωτιστικών σωμάτων, καθώς και της λαμπρότητας L των προσόψεων γειτονικών φωτιζόμενων κτιρίων. Προτείνονται 2 διαφορετικές τιμές ορίων: μια για το χρονικό διάστημα από το σούρουπο μέχρι τις 11 μ.μ., όταν η κίνηση στο δρόμο είναι ακόμη έντονη, και μια αυστηρότερη για το διάστημα από τις 11 μ.μ. μέχρι τις 7 π.μ.

	ULOR φωτιστικού σώματος (%)	Ένταση Φωτισμού επί των παραθύρων E_v (lux)		Ένταση Φωτεινής Πηγής I (kcd)		Λαμπρότητα κτιρίων L (cd/m^2) (εσπερινό όριο)	
		Εσπερινό όριο	Νυκτερινό όριο	Εσπερινό όριο	Νυκτερινό όριο	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Ζώνη 1	0	2	1	0	0	0	0
Ζώνη 2	2,5	5	1	20	0,5	5	10
Ζώνη 3	5	10	2	30	1	10	60
Ζώνη 4	15	25	5	30	2,5	25	150

Προτεινόμενα όρια για τα διάφορα φωτομετρικά μεγέθη σε καθεμία από τις τέσσερις ζώνες ανθρώπινης δραστηριότητας κατά ILE [32].

Η CIE υποδεικνύει επιπλέον όρια για τη λαμπρότητα φωτεινών πινακίδων, με τη σημείωση ότι η χρήση πινακίδων που αναβοσβήνουν αποδοκιμάζεται έντονα για τις Ζώνες 1 και 2, ενώ σε κάθε περίπτωση τέτοιες πινακίδες δε θα πρέπει να τοποθετούνται κοντά σε παράθυρα κατοικήσιμων δωματίων [5].

Δεδομένου ότι η φωτεινή ακτινοβολία μπορεί να γίνει ορατή από τον ανθρώπινο οφθαλμό από απόσταση 200 χμ. από την πηγή της (πρακτικά σε μια καθαρή νύκτα μόνο η καμπυλότητα της Γης συνιστά αποτελεσματική προστασία από τη διάδοση του φωτός), αυτό το σκεπτικό της δημιουργίας ζωνών προστασίας με βαθμιαία αυξανόμενη αυστηρότητα όσο προσεγγίζεται η προστατευόμενη τοποθεσία στερείται ουσιαστικής βάσης (εκτός αν υιοθετηθούν ζώνες ακτίνας εκατοντάδων χιλιομέτρων). Στη σύγχρονη νομοθεσία οι ζώνες αυξημένης ευαισθησίας δεν εισάγονται προκειμένου να εφαρμοστούν αυστηρότερα όρια απ' ό,τι στη γύρω περιοχή αλλά για να τονιστεί η ανάγκη προσαρμογής των εγκατεστημένων συστημάτων που σε τέτοιες ζώνες πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα. Σε κάποιες περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη και η τήρηση των αυστηρότερων ωραρίων. Η τάση φαίνεται να είναι η απόλειψη του ορισμού ζωνών προστασίας από τα νομοσχέδια περί φωτορρύπανσης και η αντικατάστασή του με μια προσαρμογή που σε διαδοχικά στάδια θα επεκταθεί σε ολόκληρη την υπό εξέταση περιοχή [33].

4.2) Χρήση αποδοτικότερης τεχνολογίας

Η ανάγκη για περιορισμό της φωτορρύπανσης σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επίσης δώσει ώθηση στο σχεδιασμό φωτιστικών υψηλής απόδοσης, που κατανέμουν κατάλληλα τις φωτεινές ακτίνες ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία σχεδιάστηκαν, ελαχιστοποιώντας την απώλεια φωτός. Έτσι, προέκυψαν κανονισμοί σχετικά με το σχήμα των φωτιστικών, οι οποίοι λαμβάνονται συχνά υπόψη από τη σχετική νομοθεσία.

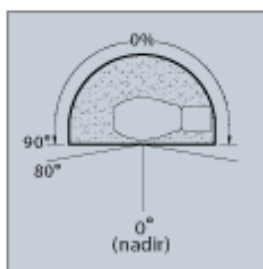
Ένα παράδειγμα αποτελεί η προταθείσα από το Σύλλογο Μηχανικών Φωτισμού Βορείου Αμερικής (Illuminating Engineering Society of North America – IESNA) ταξινόμηση των φωτιστικών ανάλογα με την αποκοπή (cutoff) της φωτεινής δέσμης, δηλαδή με τον περιορισμό της προς τα άνω εκπεμπόμενης φωτεινής έντασης η οποία είναι και η σημαντικότερη πηγή φωτορρύπανσης. Η ταξινόμηση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τη φωτεινή ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα φωτιστικό σε γωνίες μεγαλύτερες των 80° από το ναδίρ του φωτιστικού (κατακόρυφος) και σε γωνίες μεγαλύτερες των 90° , καθώς φως εκπεμπόμενο στη ζώνη 80° - 90° είναι πιο πιθανό να προκαλεί θάμβωση, και φως εκπεμπόμενο πάνω από την οριζόντιο είναι πιο πιθανό να συνεισφέρει στη φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού. Οι τέσσερις κατηγορίες φωτιστικών που διακρίνει με βάση αυτά τα κριτήρια η IESNA [34] ορίζονται ως εξής:

- **Πλήρους αποκοπής (full cutoff, sharp cutoff):**

Η φωτεινή ένταση (σε candelas) που εκπέμπεται άνω της οριζοντίου είναι μηδενική.

Η φωτεινή ένταση (σε candelas) που εκπέμπεται υπό γωνία μεγαλύτερη των 80° από την κατακόρυφο δεν υπερβαίνει αριθμητικά το 10% της φωτεινής ροής (σε lumens) των λαμπτήρων του φωτιστικού.

Τα φωτιστικά αυτά έχουν συνήθως ανακλαστικές και επίπεδο τζάμι, και είναι ικανά να εστιάσουν ομοιόμορφα το φως σε ένα καλά ορισμένο μοτίβο στο έδαφος. Προκειμένου, όμως, να επιτευχθεί ομοιόμορφος φωτισμός θα χρειαστεί μεγαλύτερος αριθμός φωτιστικών πλήρους αποκοπής ή εγκατάστασή τους σε μεγαλύτερο ύψος σε σύγκριση με φωτιστικά αποκοπής ή ημι-αποκοπής [35].

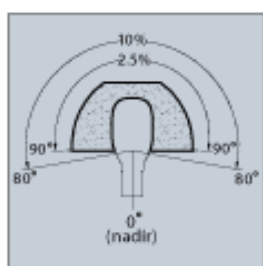


Φωτεινή ένταση φωτιστικού πλήρους αποκοπής [27].

- **Αποκοπής (cutoff):**

Η φωτεινή ένταση (σε candelas) που εκπέμπεται άνω της οριζοντίου δεν υπερβαίνει αριθμητικά το 2,5% της φωτεινής ροής (σε lumens) των λαμπτήρων του φωτιστικού.

Η φωτεινή ένταση (σε candelas) που εκπέμπεται υπό γωνία μεγαλύτερη των 80° από την κατακόρυφο δεν υπερβαίνει αριθμητικά το 10% της φωτεινής ροής (σε lumens) των λαμπτήρων του φωτιστικού.



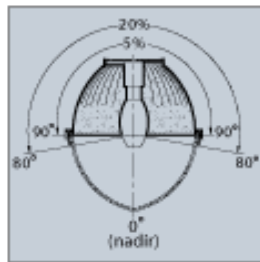
Φωτεινή ένταση φωτιστικού αποκοπής [27].

- **Ημιαποκοπής (semicutoff):**

Η φωτεινή ένταση (σε candelas) που εκπέμπεται άνω της οριζοντίου δεν υπερβαίνει αριθμητικά το 5% της φωτεινής ροής (σε lumens) των λαμπτήρων του φωτιστικού.

Η φωτεινή ένταση (σε candelas) που εκπέμπεται υπό γωνία μεγαλύτερη των 80° από την κατακόρυφο δεν υπερβαίνει αριθμητικά το 20% της φωτεινής ροής (σε lumens) των λαμπτήρων του φωτιστικού.

Τα φωτιστικά αυτά διαθέτουν συνήθως έναν ωσειδή φακό κάτω από το λαμπτήρα, ο οποίος διαχέει το φως σε μια ευρεία περιοχή, επιτρέποντας αραιότερη εγκατάσταση. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το εμβαδό της φωτιζόμενης επιφάνειας και εξαιτίας παρασιτικών αντανακλάσεων στην εσωτερική πλευρά του φακού, αναγκαστικά ένα μικρό μέρος του φωτός θα εκπέμπεται πάνω από την οριζόντιο. Γι' αυτό τα φωτιστικά αυτά ιδανικά θα πρέπει να εγκαθίστανται απολύτως οριζόντια [1].

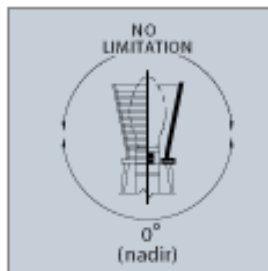


Φωτεινή ένταση φωτιστικού ημιαποκοπής [27] .

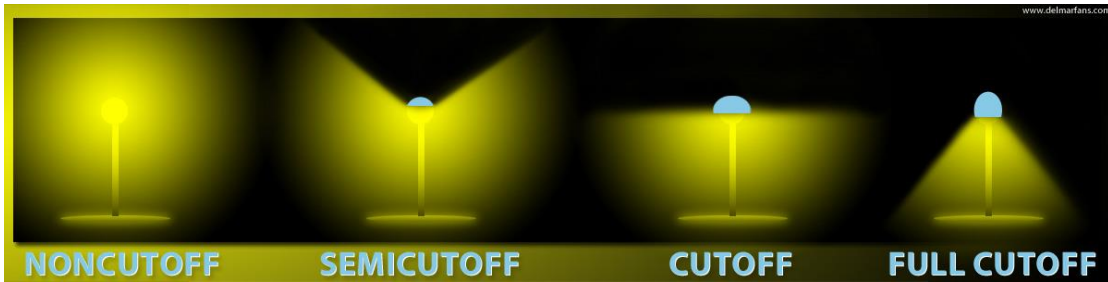
- **Μη αποκοπής (noncutoff):**

Δεν υπάρχει περιορισμός για τη φωτεινή ένταση.

Τα φωτιστικά αυτά χρησιμοποιούνται συχνά σε εμπορικές πινακίδες και για τον εξωτερικό φωτισμό οικιών και κήπων και είναι τα πιο επιβαρυντικά από πλευράς φωτορρύπανσης, καθώς περίπου το μισό του εκπεμπόμενου φωτός κατευθύνεται προς τον ουρανό, και περίπου το ένα τέταρτο προκαλεί σημαντικού βαθμού θάμβωση. Μόνο το ένα τρίτο κατά προσέγγιση του εκπεμπόμενου φωτός αξιοποιείται ουσιαστικά για το φωτισμό του εδάφους ή των κτιρίων [4].



Φωτεινή ένταση φωτιστικού μη αποκοπής [27].



Ενδεικτική ακτινοβολία φωτιστικού σε καθεμία από τις τέσσερις κατηγορίες της IESNA
 (πηγή: <http://info.drclarkstore.com/blog/bid/391392/Light-Pollution-The-Dark-Side-of-Too-Much-Light>).

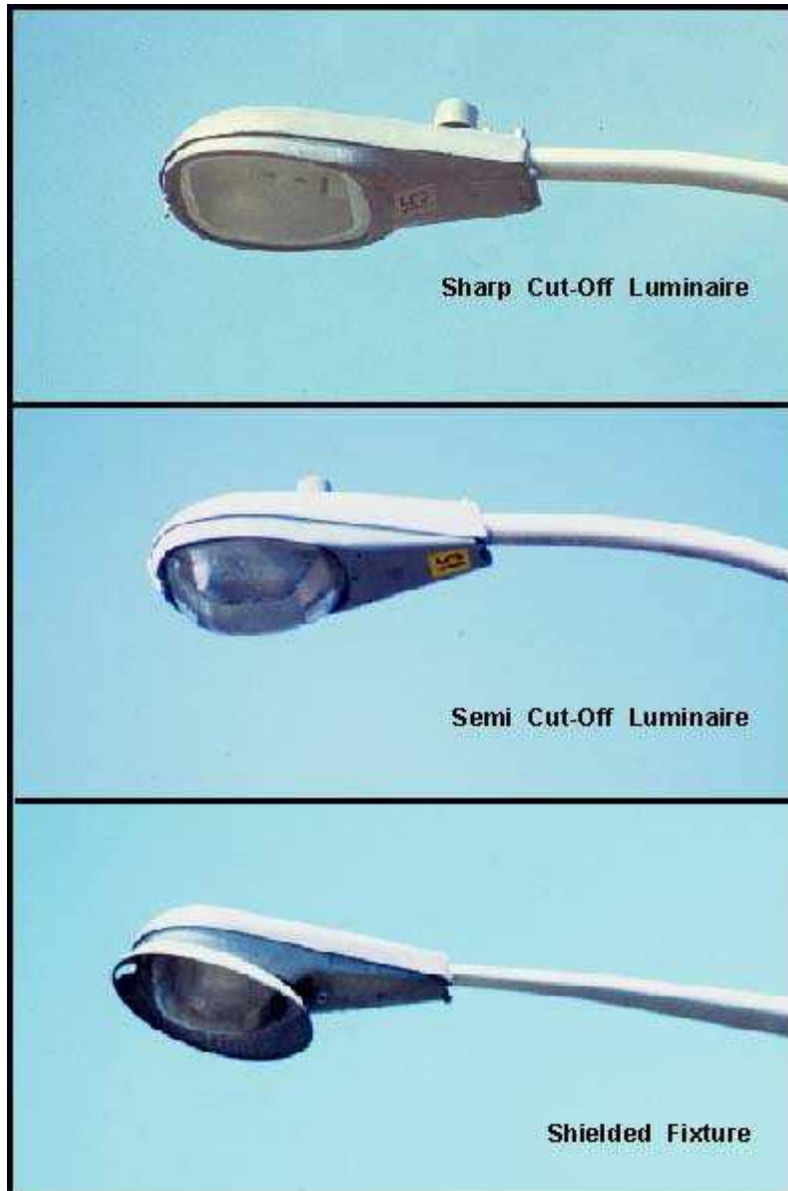
Η ανωτέρω ταξινόμηση δημιουργήθηκε με στόχο τον περιορισμό της θάμβωσης, και τα φωτομετρικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν δεν αποτελούν ακριβείς ενδείξεις για την αξιολόγηση ενός φωτιστικού ως προς την εκπομπή φωτός πάνω από την οριζόντιο. Μόνη εξαίρεση αποτελούν τα φωτιστικά πλήρους αποκοπής, τα οποία ποτέ δε θα εκπέμπουν φως πάνω από την οριζόντιο και γι' αυτό επιλέγονται όταν στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού. Μια καλή εκτίμηση της προς τα άνω εκπεμπόμενης φωτεινής ροής θα ήταν δυνατή μέσω της σύνοψης της γωνιακής κατανομής της φωτεινής ροής του συγκεκριμένου φωτιστικού, διαθέσιμη από τον κατασκευαστή του. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η φωτεινή ροή που θεωρητικά μπορεί να εκπέμπεται από ένα φωτιστικό κάθε κατηγορίας ως ποσοστό των lumens των λαμπτήρων στις δύο γωνιακές ζώνες που ενδιαφέρουν [2]:

Κατηγορία Φωτιστικού	Lumens λαμπτήρων εκπεμπόμενα υπό γωνία >90°	Lumens λαμπτήρων εκπεμπόμενα υπό γωνία 80°-90°
Full cutoff	0	0-11%
Cutoff	0-16%	0-11%
Semicutoff	0-31%	0-22%

Φωτεινή ροή εκπεμπόμενη σε γωνίες πάνω ή κοντά στην οριζόντιο, για τις τρεις κατηγορίες φωτιστικών αποκοπής [2].

Συχνά χρησιμοποιείται επίσης ο χαρακτηρισμός (fully) shielded για να περιγράψει φωτιστικά που παρουσιάζουν μεν μηδενική εκπομπή φωτός άνω της οριζοντίου λόγω

της ύπαρξης γείσου γύρω από τη φωτεινή πηγή, ωστόσο δεν πληρούν απαραίτητα τον περιορισμό θάμβωσης για το φως που εκπέμπεται στη ζώνη 80° - 90° [2].

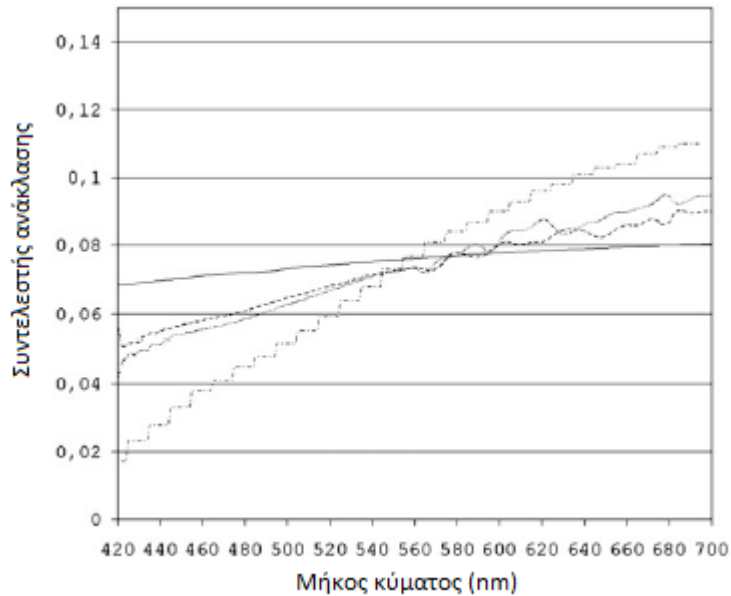


Διαφορετικοί τύποι οδικού φωτιστικού σχήματος κόμπρα [4].

Η επιλογή φωτιστικών με βέλτιστο έλεγχο της κατεύθυνσης της φωτεινής ροής είναι αποφασιστικής σημασίας για τον περιορισμό της φωτεινής ρύπανσης (δεδομένου ότι φως εκπεμπόμενο σε γωνίες κοντά στην οριζόντιο μπορεί να διαδοθεί σε πολύ μεγάλη απόσταση και να δράσει αθροιστικά με άλλες φωτεινές πηγές, εντείνοντας το πρόβλημα), ενώ παράλληλα προσφέρουν υψηλή απόδοση από ενεργειακής και άρα

οικονομικής πλευράς. Ο μόνος λόγος για τον οποίο δεν επιλέγονται εξαρχής σε κάθε εγκατάσταση τέτοια φωτιστικά είναι το γεγονός ότι αυξάνουν το αρχικό κόστος ενώ τα οικονομικά οφέλη γίνονται αισθητά μακροπρόθεσμα (συνδυασμός απαγορευτικός κατά τη λήψη των σχετικών πολιτικών αποφάσεων), καθώς και το ότι απαιτείται υψηλός βαθμός κατάρτισης για να είναι σε θέση ένας επαγγελματίας φωτισμού να αναγνωρίσει τα πλεονεκτήματά τους και να τα επιλέξει. Επιπλέον, είναι συχνός ο ισχυρισμός ότι τα φωτιστικά πλήρους αποκοπής απαιτούν πυκνότερα εγκατεστημένους πόλους για να πετύχουν τον ίδιο φωτισμό σε σχέση με τα φωτιστικά ημιαποκοπής (που παραμένουν τα πιο δημοφιλή) και επομένως θα απαιτούν και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Όμως η εξοικονόμηση ενέργειας δεν μπορεί να νοηθεί χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πόση φωτεινή ροή ανά μήκος δρόμου καταλήγει όντως στο δρόμο και πόση χάνεται εκτός αυτού. Η δυνατότητα αραιότερης εγκατάστασης των πόλων δεν εξαρτάται τόσο από τη γωνία εκπομπής του φωτιστικού κατά μήκος του δρόμου (αυτό το χαρακτηριστικό δε διαφέρει και πολύ από φωτιστικό σε φωτιστικό) αλλά από την ικανότητα του φωτιστικού να εκπέμπει όσο το δυνατόν λιγότερο φως εκτός του δρόμου (εγκάρσια αυτού) αν εγκατασταθεί σε μεγαλύτερο ύψος. Αυτό έχει να κάνει κυρίως με την ποιότητα των οπτικών και το σχεδιασμό του φωτιστικού και όχι με το σχήμα του φακού του [33].

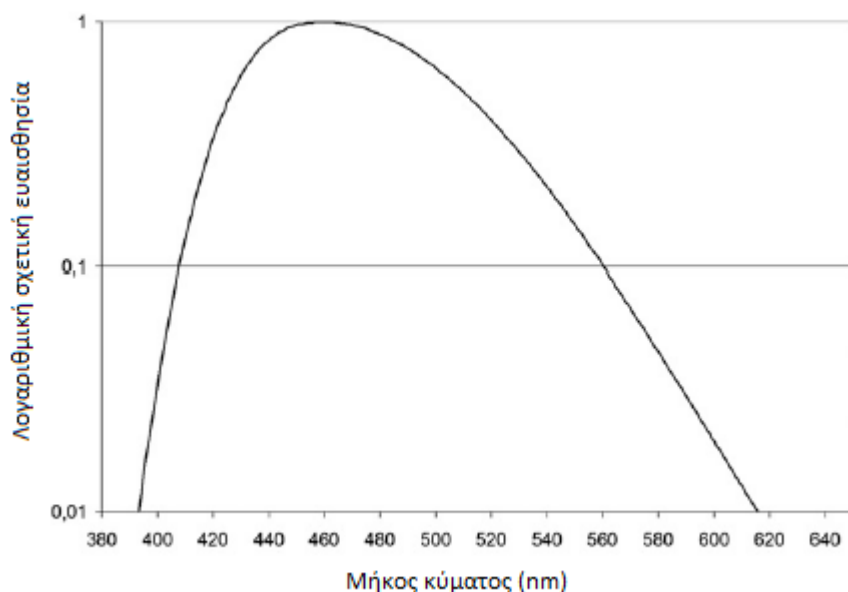
Στην απόδοση ενός φωτιστικού σημαντικό ρόλο παίζει και ο λαμπτήρας, και όχι μόνο από πλευράς ενεργειακής κατανάλωσης. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης (LPS) είναι πιο αποδοτικοί ενεργειακά από τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης (HPS) και τους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων (MH), ενώ το γεγονός ότι εκπέμπουν καθαρά μονοχρωματικό κίτρινο φως που πλησιάζει το μέγιστο της ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού τους προσδίδει και εξαιρετικά υψηλή απόδοση από οπτικής πλευράς [10]. Επιπλέον, επειδή η άσφαλτος και το τσιμέντο παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή ανάκλασης για μεγαλύτερα μήκη κύματος, οι πηγές LPS (και σε μικρότερο βαθμό οι HPS) μπορούν να προσδώσουν λαμπρότητα στην επιφάνεια του δρόμου σε μεγαλύτερο βαθμό από τις πηγές με μεγάλο ποσοστό εκπομπής μπλε φωτός, όπως οι πηγές MH και LED [19].



Βαθμός ανάκλασης τεσσάρων διαφορετικών ειδών ασφάλτου [19].

Πρέπει να σημειωθεί ακόμη ότι, με τη γήρανση, ο φακός του ανθρώπινου οφθαλμού γίνεται πολύ πιο αδιαφανής στο μπλε φως (για μήκος κύματος 425 nm ο φακός ενός εξηντάρη παρουσιάζει μόλις το 1/3 της διαπερατότητας του φακού ενός εικοσάρη, ενός για μήκη κύματος από 600 nm και πάνω οι φακοί τους δεν παρουσιάζουν διαφορά [19]).

Οι πηγές φωτός με φασματικό περιεχόμενο πλούσιο σε μπλε μήκη κύματος θα πρέπει να αποφεύγονται και για τον επιπλέον λόγο ότι το μπλε φως είναι αυτό που επηρεάζει πιο έντονα την παραγωγή της μελατονίνης στον άνθρωπο (και σε άλλα έμβια όντα). Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, η δράση της καταστολής της μελατονίνης παρουσιάζει μέγιστο κατά την έκθεση σε φως 460 nm.



Το φάσμα δράσης της καταστολής της μελατονίνης. Το μέγιστο εμφανίζεται για φως 460 nm [19].

Στην περιοχή γύρω από το μέγιστο (440-500 nm) οι πηγές ΜΗ και LED εκπέμπουν 3-7 φορές περισσότερη ενέργεια από μια πηγή ΗΡS, για το ίδιο οπτικό αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Μια μετάβαση, λοιπόν, από τις πηγές ΗΡS σε πηγές ΜΗ και λευκών LED θα είχε πολύ δυσμενέστερες συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία από αυτές που έχει ήδη ο σημερινός τεχνητός φωτισμός.

Είδος φωτεινής πηγής	Ενέργεια εκπεμπόμενη στα 440-500 nm, σε σχέση με πηγή ΗΡS	Καταστολή της μελατονίνης, σε σχέση με πηγή ΗΡS
ΗΡS	1	1
LPS	0,02	0,3
ΜΗ	2,7	3,4
LED φυσικού λευκού	7,0	5,4
Πυρακτώσεως 65 W	2,5	2,5

Σύγκριση της εκπομπής ακτινοβολίας στα μήκη κύματος που καταστέλλουν δραστικότερα τη μελατονίνη, για διάφορα είδη πηγών (ως ποσοστό της αντίστοιχης δράσης πηγής ΗΡS) [19].

Με βάση τα παραπάνω, ιδανικά θα έπρεπε να προτιμώνται οι πηγές LPS, οι οποίες δυστυχώς γίνονται όλο και λιγότερο διαθέσιμες καθώς οι κατασκευαστές στρέφονται πλέον προς άλλες τεχνολογίες. Το κίτρινο φως που εκπέμπουν θεωρείται αντιαισθητικό (αν και σε πολλές εφαρμογές η ελαφρά χρωματική παραμόρφωση του περιβάλλοντος δεν αποτελεί πρόβλημα), και έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της κατεύθυνσης του φωτός χωρίς τη χρήση περίπλοκων οπτικών συστημάτων.



Χώρος στάθμευσης υπό το κίτρινο φως λαμπτήρα HPS (πάνω) και λευκού φωτός λαμπτήρα LED (κάτω) [36].

Επόμενη καλύτερη επιλογή θα ήταν οι πηγές HPS, ενώ άλλου είδους πηγές θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις που κρίνεται απολύτως απαραίτητη η χρήση λευκού φωτός [19]. Οι λαμπτήρες HPS προσφέρουν πολύ καλύτερο φως από πλευράς χρωματικής ποιότητας και έχουν εξαιρετικά μικρό μέγεθος. Οι λαμπτήρες MH εκπέμπουν σχεδόν λευκό φως και έχουν επίσης μικρό μέγεθος, ωστόσο έχουν μικρότερο χρόνο ζωής από τους λαμπτήρες HPS [4] και παρουσιάζουν με την πάροδο του χρόνου σοβαρή πτώση στη φωτεινή απόδοση (καθώς και μια μεταβολή του χρώματος προς το πράσινο) γι' αυτό και δεν ενδείκνυνται για οδικό φωτισμό. Οι έως τώρα διαδεδομένες πηγές LED λευκού φωτός θα πρέπει να αποφεύγονται, παρόλ' αυτά η τεχνολογία LED έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες και θα μπορούσαν, με την κατάλληλη ώθηση της βιομηχανικής έρευνας, να προκύψουν πηγές LED με πολύ διαφορετικό φάσμα εκπομπής, ώστε να παράγουν «θερμότερο» φως, χωρίς μπλε συνιστώσες [19]. Έτσι, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα των πηγών αυτών (πιο αποδοτική μετατροπή της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ορατό φως, μικρή κατανάλωση ενέργειας, εκπομπή αμελητέων ποσοτήτων υπεριώδους και υπέρυθρης ακτινοβολίας, χρήση πολύ χαμηλών ποσοτήτων επικίνδυνων υλικών για την κατασκευή τους [36]), με παράλληλη αποφυγή των αρνητικών χαρακτηριστικών τους.

Πρέπει, τέλος, να σημειωθεί ότι, επειδή κάποια είδη λαμπτήρων (π.χ. οι HPS και οι MH) παρουσιάζουν μια πτώση στη φωτεινή απόδοση με την πάροδο του χρόνου, τα περισσότερα συστήματα οδικού φωτισμού σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποδίδουν τα απαιτούμενα επίπεδα φωτισμού στο τέλος του χρόνου ζωής του λαμπτήρα. Αυτό έχει ως συνέπεια να εκπέμπουν για μεγάλο χρονικό διάστημα περισσότερο φως απ' όσο είναι απαραίτητο [37]. Αυτός είναι και ο λόγος που ο Hilton προτείνει τη λειτουργία λιγότερων φωτιστικών απ' όσα είναι εγκατεστημένα (συγκεκριμένα 2 στα 3) όταν οι λαμπτήρες έχουν μόλις αντικατασταθεί, για διάστημα όμως όχι μεγαλύτερο του εξαμήνου [38]. Έτσι εξοικονομείται ενέργεια και μειώνεται το κόστος της αντικατάστασης των λαμπτήρων, ενώ αποφεύγεται η έλλειψη της απαιτούμενης ομοιομορφίας στη φωτεινότητα (συγκεκριμένα η αναλογία ανάμεσα στο μέσο όρο και το ελάχιστο του επιπέδου φωτισμού για αυτοκινητοδρόμους δεν πρέπει να ξεπερνά το λόγο 3:1 [37]).

Πέρα από τη χρήση φωτιστικών με υψηλής απόδοσης οπτικά συστήματα και λαμπτήρων με κατάλληλο φάσμα εκπομπής, στις σύγχρονες εγκαταστάσεις οδικού φωτισμού μπορούν να αξιοποιηθούν και τεχνολογίες που θα προσφέρουν αποφυγή του

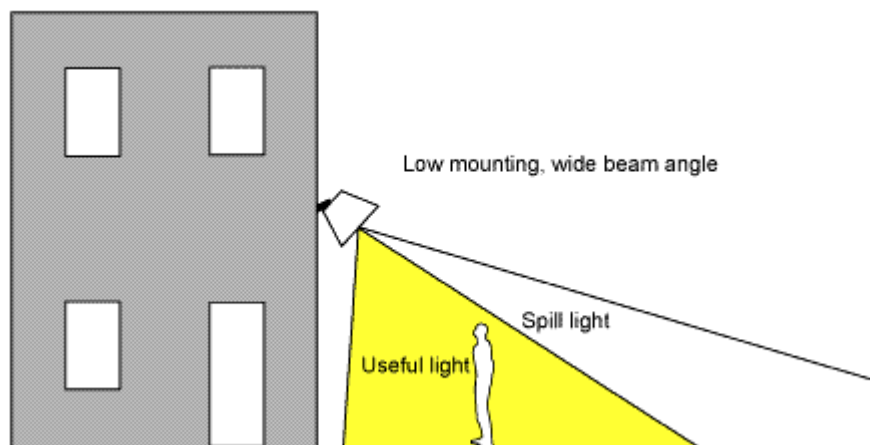
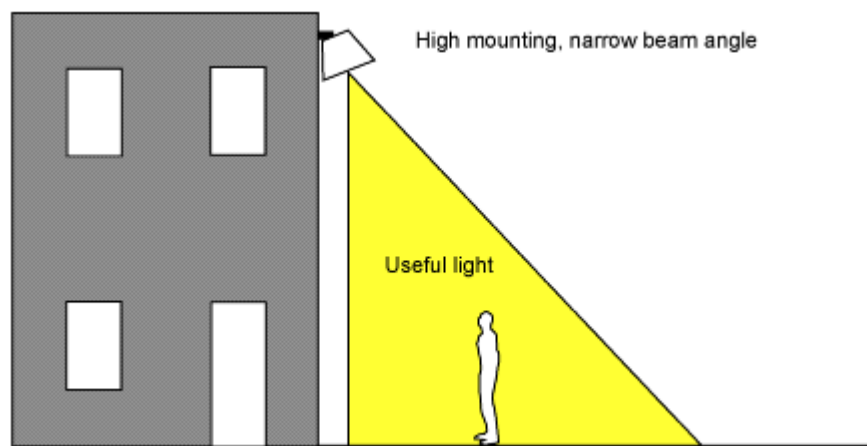
υπερφωτισμού και σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ θα εγγυώνται την παροχή κατάλληλης ποσότητας και ποιότητας φωτός. Μια από τις τεχνολογίες αυτές είναι η χρήση ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης φωτισμού, το οποίο θα ρυθμίζει τα επίπεδα φωτισμού ανάλογα με την εκτιμώμενη ή την τρέχουσα κυκλοφοριακή ροή ή/και τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες. Και στις δύο περιπτώσεις, όταν η ένταση φωτισμού στο δρόμο υπερβαίνει τα επίπεδα που ορίζονται από τα διεθνή πρότυπα για τις δεδομένες συνθήκες, το σύστημα διαχείρισης θα έχει τη δυνατότητα να μειώνει κατάλληλα τα επίπεδα του φωτισμού, χωρίς να υπονομεύεται η οδική ασφάλεια. Αν και τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλο αρχικό κόστος, εντούτοις μπορούν να το αποσβέσουν μέσα σε λίγα μόλις χρόνια, αφού δύνανται να προσφέρουν μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ακόμη και ως 40%, και του κόστους συντήρησης έως 50%.

4.3) Ορθή χρήση του εξοπλισμού φωτισμού

Καθώς είναι αυτονόητο ότι κάθε φωτιστικό μπορεί να προκαλεί φωτεινή ρύπανση, αν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογή για την οποία δεν ενδείκνυται ή σε περίπτωση εσφαλμένης τοποθέτησης, είναι απαραίτητο όσοι είναι υπεύθυνοι για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση συστημάτων φωτισμού να διαθέτουν την απαραίτητη κατάρτιση. Ειδικά τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας που αφορούν τον οδικό φωτισμό και χρησιμοποιούν τεχνολογίες τηλεχειρισμού (για παράδειγμα, προσαρμογή της έντασης φωτισμού ανάλογα με την κυκλοφοριακή πυκνότητα ή τις καιρικές συνθήκες, ρύθμιση του σημείου μέγιστης ισχύος ανάλογα με τον υπάρχοντα φωτισμό του περιβάλλοντος) είναι απίθανο να ωφελήσουν χωρίς το κατάλληλο εργατικό δυναμικό. Όμως ακόμη και η ακριβής προσαρμογή οπτικών συστημάτων ανάλογα με το περιβάλλον δεν είναι κάτι που μπορεί να κάνει ένας ανειδίκευτος εργάτης.

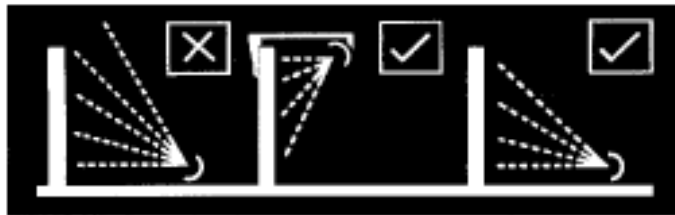
Η ύπαρξη εύχρηστων υπολογιστικών προγραμμάτων φωτισμού έχει οδηγήσει στην εσφαλμένη εντύπωση ότι μπορεί ο οποιοσδήποτε να σχεδιάσει εγκαταστάσεις εξωτερικού φωτισμού, αγνοώντας ότι θα πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένοι κανόνες για να εξασφαλιστεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα με τη μικρότερη δυνατή απώλεια φωτός, προς τον ουρανό ή προς ξένες ιδιοκτησίες. Για παράδειγμα, ο έλεγχος της θάμβωσης απαιτεί η κεντρική ακτίνα του φωτιστικού να κατευθύνεται προς παρατηρητές σε βασικές γειτονικές θέσεις υπό γωνία μικρότερη των 70°, ώστε τα

φωτεινά τμήματα του φωτιστικού να μην είναι άμεσα ορατά στο ύψος των ματιών. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του φωτιστικού σε μεγαλύτερο ύψος [32]. Αυτό θα επέτρεπε επίσης και τη χρήση φωτιστικού με πολύ πιο ελεγχόμενη κατανομή φωτός (δηλαδή στενότερη ακτίνα), καθώς και τον προσανατολισμό του πιο κοντά στην κατακόρυφο, γεγονός που θα είχε ως συνέπεια τη μείωση της εκπομπής φωτός εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος, άρα και της φωτεινής παρενόχλησης σε γειτονικές οικίες [2].



Η ίδια επιφάνεια φωτίζεται χωρίς απώλειες φωτός και χωρίς να προκαλείται θάμβωση, όταν ο προβολέας τοποθετηθεί σε μεγαλύτερο ύψος [2].

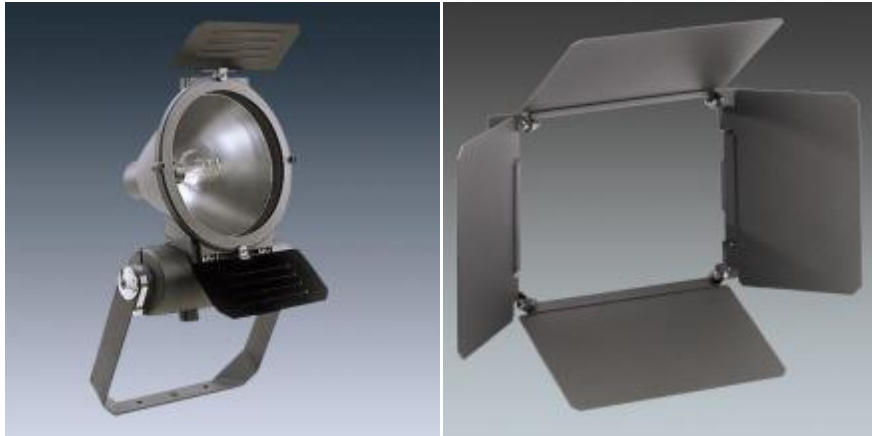
Αντίστοιχα, όταν πρόκειται για το φωτισμό κατακόρυφων κατασκευών (π.χ. διαφημιστικών πινακίδων ή κτιρίων) συστήνεται ο προβολέας να τοποθετείται στην κορυφή της κατασκευής, ώστε το φως να κατευθύνεται προς τα κάτω. Αν αυτό είναι αδύνατο και ο προβολέας τοποθετηθεί στο έδαφος είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μέσα (ασπίδες, ανακλαστήρες, περσίδες) ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια φωτός προς κατευθύνσεις εκτός της κατασκευής.



Φωτισμός κατακόρυφης κατασκευής: κακός (αριστερά), βέλτιστος (κέντρο) και αποδεκτός (δεξιά) [32].



Γείσο και περσίδες περιορίζουν την προς τα άνω εκπεμπόμενη φωτεινή ροή του προβολέα [39].



Ασπίδες για τον περιορισμό της φωτεινής ροής προβολέων [39].

Παράλληλα θα πρέπει να ξεκινήσει, με την κατάλληλη ώθηση από τις κατά τόπους δημοτικές αρχές, μια εκστρατεία ευαισθητοποίησης αρχιτεκτόνων, εργολάβων κατασκευών, επαγγελματιών φωτισμού και πολιτών γύρω από το πρόβλημα της φωτορρύπανσης, ώστε να διαμορφωθεί μια διαφορετική νοοτροπία όσον αφορά το φωτισμό οικιών και, κυρίως, εμπορικών περιοχών. Για παράδειγμα, πινακίδες με φωτεινό υπόβαθρο και σκοτεινά γράμματα αφενός φωτορρυπαίνουν έντονα, αφετέρου δεν είναι αποτελεσματικές στη μετάδοση πληροφορίας. Αντίθετα, πινακίδες με σκοτεινό ή έγχρωμο υπόβαθρο και φωτεινά γράμματα είναι πολύ πιο αποτελεσματικές ως διαφημιστικό μέσο και προκαλούν πολύ μικρότερη οπτική ενόχληση. Ωστόσο χωρίς την ύπαρξη σχετικού κανονισμού αυτό δε θα γίνει απαραίτητα αποδεκτό από έναν επιχειρηματία που θέλει να διαφημίσει το κατάστημά του και προσέρχεται ως πελάτης σε ένα σχετικό επαγγελματία φωτισμού.

Επίσης, πέραν της επιβολής νυκτερινού ωραρίου για το φωτισμό εμπορικών περιοχών από τις δημοτικές αρχές, θα μπορούσε να συστηθεί ή να επιβληθεί η χρήση κατάλληλων αυτοματισμών από τις επιχειρήσεις (όπως είναι τα φωτοκύτταρα, οι ωρολογιακοί διακόπτες, οι ανιχνευτές κίνησης κτλ) ώστε ο φωτισμός να ενεργοποιείται όταν υπάρχει λόγος και στο μέτρο που είναι απαραίτητος. Το ίδιο μέτρο θα μπορούσε να εφαρμοσθεί και για τον περιορισμό της φωτορρύπανσης που προκαλείται από τους προβολείς ασφαλείας, η χρήση των οποίων διαδίδεται ολοένα και περισσότερο και μεταξύ ιδιωτών για την προστασία των κατοικιών τους. Σκοπός

της χρήσης τους είναι η ασφάλεια της ιδιωτικής περιουσίας, ωστόσο η εσφαλμένη τοποθέτησή τους ή η υπερβολική ένταση του εκπεμπόμενου φωτός μπορεί στην πραγματικότητα να διευκολύνει επίδοξους διαρρήκτες στην εγκληματική τους δραστηριότητα: προκαλώντας θάμβωση στους περαστικούς, θα τους αναγκάζει να αποστρέψουν το βλέμμα τους από τη σκηνή του εγκλήματος, ενώ δημιουργώντας σκοτεινότερες σκιές θα προσφέρει ιδανικές κρυψώνες στους παραβάτες. Μάλιστα, ο ΠΕ συμβουλεύει να υπάρχει ορθή εγκατάσταση και των ανιχνευτών κίνησης, ώστε να εντοπίζουν μόνο κίνηση ανθρώπων εντός των ορίων της προστατευόμενης ιδιοκτησίας και όχι ζώων ή ανθρώπων στο δημόσιο δρόμο, ώστε ο προβολέας να μην αναβοσβήνει κατά τη διάρκεια της νύκτας χωρίς να υπάρχει πραγματική ανάγκη. Παράλληλα αποτρέπει από τη χρήση λαμπτήρων με φωτεινή ροή μεγαλύτερη των 2000 lumen (ισχύς περί τα 150 W για ένα λαμπτήρα αλογόνου) για αστικό περιβάλλον, και των 1000 lumen (50 W) για εξοχικές περιοχές [24].

Όπως γίνεται αντιληπτό, η φωτορρύπανση είναι κυρίως συνέπεια κακού σχεδιασμού ενός συστήματος φωτισμού, που συχνά επιδεινώνεται από την λανθασμένη εγκατάσταση και την αμελή συντήρηση. Η διόρθωση αυτών των σφαλμάτων σε πολλές περιπτώσεις αρκεί για την επίτευξη μεγάλης βελτίωσης στο πρόβλημα της φωτορρύπανσης. Είναι, όμως, αναμφισβήτητο το γεγονός ότι αυτός καθαυτός ο αριθμός των εγκαταστάσεων φωτισμού στις σύγχρονες, βιομηχανοποιημένες κοινωνίες είναι ένα τεράστιο πρόβλημα, ανεξάρτητα από την ποιότητα του σχεδιασμού τους. Ακόμη κι αν κάθε εγκατάσταση είχε σχεδιαστεί με βάση τα αυστηρότερα πρότυπα, η φωτορρύπανση που θα προέκυπτε από το ανακλώμενο από το έδαφος και το υπόλοιπο περιβάλλον φως δε θα ήταν καθόλου αμελητέα. Γι' αυτό είναι ακόμη πιο επιτακτική η ανάγκη για αυστηρή εφαρμογή των προτύπων και αξιοποίηση των σχετικών τεχνολογιών στις νέες εγκαταστάσεις (και για κατά το δυνατόν αναβάθμιση των παλαιών), αλλά και για ενημέρωση και ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης, όπως συμβαίνει σε πολλά άλλα θέματα οικολογικής φύσεως.

Κεφάλαιο 5

Η μελέτη

Από όλες τις συνέπειες του φαινομένου της φωτορρύπανσης, η πιο άμεσα αντιληπτή και ανησυχητική για την κοινωνία είναι η ενεργειακή και οικονομική σπατάλη. Όσον αφορά τον οδικό φωτισμό, η έρευνα του Falchi (2011) έδειξε ότι το φως που ανακλάται από τις φωτιζόμενες επιφάνειες (δρόμος, πεζοδρόμιο κτλ.) ευθύνεται μόνο κατά 25% για την τεχνητή φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού, ενώ το φαινόμενο αυτό οφείλεται κατά 75% σε φως που εκπέμπεται από τα φωτιστικά απευθείας προς τον ουρανό [19], ακόμη κι αν το ποσοστό της φωτεινής αυτής ροής είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με την ανακλώμενη από τις επιφάνειες. Αιτία είναι το γεγονός ότι το φως που ανακλάται από τις επιφάνειες κατευθύνεται ως επί το πλείστον κατακόρυφα (οπότε φωτορρυπαίνει μόνο τοπικά), ενώ το φως που εκπέμπεται προς τον ουρανό από τα φωτιστικά διαδίδεται με γωνίες πολύ κοντά στην οριζόντιο, με αποτέλεσμα να διανύει μεγάλες αποστάσεις και να συμβάλλει (σε ποσοστό της τάξης του 95%) στην αύξηση της φωτεινότητας του νυκτερινού ουρανού ακόμη και σε τοποθεσίες που απέχουν 20 χμ. από τα φωτιστικά [33]. Επομένως, το απλούστερο μέτρο για την αντιμετώπιση της φωτεινής ρύπανσης είναι η αντικατάσταση των παλαιών φωτιστικών που εκπέμπουν φως και άνω της οριζόντιου με νεότερα που αποκόπτουν πλήρως την προς τα άνω εκπεμπόμενη φωτεινή ροή. Η σύγχρονη τάση είναι τέτοιου τύπου φωτιστικά να χρησιμοποιούν λαμπτήρες LED, οι οποίοι διαθέτουν εξαιρετικά ενεργειακά χαρακτηριστικά και η λειτουργία τους μπορεί να προσαρμόζεται στα εκάστοτε επιθυμητά επίπεδα ηλεκτρονικά, με ένα σύστημα τηλεχειρισμού.

Προς το σκοπό αυτό αναζητήθηκαν φωτοτεχνικά αρχεία παλαιού τύπου φωτιστικών αστικού τοπίου διαφόρων τιμών ισχύος, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται ακόμη ευρύτατα στην Ελλάδα. Τα φωτιστικά αυτά λειτουργούν συνήθως με λαμπτήρες ατμών υψηλής πίεσης [1]. Ακολούθως, επελέγησαν σύγχρονα φωτιστικά λαμπτήρων LED με χαρακτηριστικά που τα καθιστούν κατάλληλα για να

αντικαταστήσουν τα συμβατικά. Στη συνέχεια μετρήθηκε για κάθε φωτιστικό των δύο ομάδων το μη χρήσιμο φως (το άθροισμα της προς τα άνω απευθείας εκπεμπόμενης φωτεινής ροής και της ροής που εκπέμπεται υπό γωνίες 70° - 90° και συνεπώς δεν φωτίζει το δρόμο), ως ένα μέτρο της άσκοπης ενεργειακής κατανάλωσης, και η συνολική προκαλούμενη φωτεινή ρύπανση (το άθροισμα της άνω της οριζοντίου εκπεμπόμενης φωτεινής ροής και της ροής που ανακλάται από το δρόμο και το υπόλοιπο περιβάλλον).

5.1) Τα ζεύγη φωτιστικών που εξετάστηκαν

- Το φωτιστικό CDS450 EB PR της PHILIPS, λειτουργεί με ένα λαμπτήρα ατμών νατρίου υψηλής πίεσης (HPS) ισχύος 70 W (79 W συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρονικού στραγγαλιστικού πηνίου) και φωτεινής ροής 6.600 lumen. Είναι σχήματος πυρσού και εκπέμπει μόλις το 66% της συνολικής φωτεινής ροής του (5.507 lumen – βαθμός απόδοσης φωτιστικού LOR = 83%) κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό CDS450 EB PR της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

Προς αντικατάστασή του επελέγη το BDP780 GRN30 της PHILIPS, που λειτουργεί με 56 πηγές LED συνολικής φωτεινής ροής 3.000 lumens και ισχύος 26 W (συμπεριλαμβανομένου του τροφοδοτικού - driver). Έχει βαθμό απόδοσης LOR = 80,5% και εκπέμπει το 98,7% της φωτεινής ροής του (2.416 lm) κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό BDP780 GRN30 της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

- Το φωτιστικό MADISON της εταιρείας «Ιωάννης Αργυρός και ΣΙΑ» λειτουργεί με ένα λαμπτήρα HPS ισχύος 84 W (συμπεριλαμβανομένου του στραγγαλιστικού πηνίου) και ονομαστικής φωτεινής ροής 5.800 lumen. Λόγω της κατασκευής του εκπέμπει μόλις το 75% της συνολικής φωτεινής ροής του κάτω της οριζοντίου, και με βαθμό απόδοσης LOR = 47%.



Το φωτιστικό MADISON της «Ιωάννης Αργυρός και ΣΙΑ».

(πηγή: <https://www.vardalight.gr>)

Για την αντικατάστασή του επελέγη το BDP780 GRN40 της SIEMENS, αυτή τη φορά σε συνδυασμό με 56 πηγές LED συνολικής ισχύος 37 W και φωτεινής ροής

4.000 lumen. Έχει βαθμό απόδοσης LOR = 82% περίπου και εκπέμπει το 98,9% της φωτεινής ροής του κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό BDP780 GRN40 της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

- Το φωτιστικό CDS530 TB της PHILIPS, σχήματος πυρσού, λειτουργεί με ένα λαμπτήρα HPS 100 W (114 W συμπεριλαμβανομένου του στραγγαλιστικού πηνίου), φωτεινής ροής 10.700 lumens, έχει βαθμό απόδοσης φωτιστικού LOR = 96% και εκπέμπει μόνο το 50% της συνολικής φωτεινής ροής του κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό CDS530 TB της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

Για την αντικατάστασή του επελέγη το PHILIPS BDP780 GRN60, που λειτουργεί με 56 πηγές LED ισχύος 48 W (συμπεριλαμβανομένου του τροφοδοτικού) και

φωτεινής ροής 6.000 lumen. Το φωτιστικό έχει φωτεινή απόδοση $LOR = 80,5\%$ και εκπέμπει το 98,7% της συνολικής φωτεινής ροής του κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό BDP780 GRN60 της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

- Το φωτιστικό CDS592 DF OO της PHILIPS, σχήματος φανού, λειτουργεί με πηγή HPS 150 W (169 W, συμπεριλαμβανομένου του στραγγαλιστικού πηνίου) και φωτεινής ροής 17.500 lumen. Έχει φωτεινή απόδοση $LOR = 65\%$ και εκπέμπει το 52% της φωτεινής ροής του κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό CDS592 DF OO της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

Για την αντικατάστασή του επελέγη το BGP430 T25 DK της PHILIPS, με μονάδα πηγών LED ισχύος 61 W (συμπεριλαμβανομένου του τροφοδοτικού) και

φωτεινής ροής 7.400 lumen. Το φωτιστικό διαθέτει LOR = 83% και εκπέμπει το σύνολο της φωτεινής ροής του (6.132 lumen) κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό BGP430 T25 DK της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

- Το φωτιστικό HPB704 ACS της PHILIPS, με κλασικό σχήμα φανού, λειτουργεί με πηγή HPS ισχύος 276 W (συμπεριλαμβανομένου του στραγγαλιστικού πηνίου) και φωτεινής ροής 22.000 lumen. Με βαθμό απόδοσης LOR = 62%, εκπέμπει το 91% της φωτεινής ροής του κάτω από την οριζόντιο.



Το φωτιστικό HPB704 ACS της PHILIPS.

(πηγή: <https://reluxnet.relux.com>)

Επελέγη προς αντικατάστασή του το BGP431 T25 DM της PHILIPS, με πηγή LED ισχύος 119 W (συμπεριλαμβανομένου του τροφοδοτικού) και φωτεινής ροής

14.900 lumen. Έχει βαθμό απόδοσης LOR = 85% και εκπέμπει το σύνολο της φωτεινής ροής του (12.710 lumen) κάτω της οριζοντίου.



Το φωτιστικό BGP431 T25 DM της PHILIPS.

(πηγή: <https://www.lighting.philips.com>)

5.2) Η μέθοδος

Στα φωτομετρικά αρχεία κάθε φωτιστικού συμπεριλαμβάνεται πίνακας με την τιμή της εκπεμπόμενης φωτεινής έντασης (σε candelas ανά kilolumen λαμπτήρων) σε κάθε κατακόρυφη γωνία γ (με τη σύμβαση ότι το σημείο στο έδαφος ακριβώς κάτω από το φωτιστικό αντιστοιχεί στις 0° και το σημείο ακριβώς πάνω από το φωτιστικό στις 180°) και για κάθε κατακόρυφο επίπεδο C (επίπεδο $0^\circ - 180^\circ$ θεωρείται συμβατικά το κατακόρυφο επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα του φωτιστικού σώματος, οπότε το επίπεδο που συμπίπτει με τον άξονα του φωτιστικού είναι το $90^\circ - 270^\circ$). Από τις τιμές αυτές υπολογίστηκαν αρχικά οι μέσοι όροι της φωτεινής έντασης που εκπέμπεται σε κάθε γωνία γ (με σταθερό βήμα), και από τις τιμές που προέκυψαν υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι της φωτεινής έντασης για κάθε 2 διαδοχικές γωνίες γ_1 και γ_2 – έστω $I_{\gamma_1-\gamma_2}$. Κάθε μία από τις τιμές αυτές, πολλαπλασιαζόμενη με τη στοιχειώδη στερεά γωνία που ορίζεται από τις γωνίες γ_1 και γ_2 και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\Delta\omega = 2\pi \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot \gamma_1}{180}\right) - \cos\left(\frac{\pi \cdot \gamma_2}{180}\right) \right) \quad (5.1)$$

μας δίνει τη στοιχειώδη φωτεινή ροή του φωτιστικού που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη στοιχειώδη στερεά γωνία, δηλαδή

$$\Delta\Phi = \Delta\omega \cdot I_{\gamma_1-\gamma_2} \quad (5.2)$$

Αθροίζοντας τις στοιχειώδεις φωτεινές ροές για όλες τις γωνίες γ (από 0° έως 180°) προκύπτει το σύνολο της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής του φωτιστικού (σε lumen ανά kilolumen λαμπτήρων).

Αφαιρώντας τη φωτεινή ροή που εκπέμπεται υπό γωνία 0° έως 90° από τη συνολική φωτεινή ροή του φωτιστικού (0° έως 180°) και πολλαπλασιάζοντας επί τα kilolumen των λαμπτήρων προκύπτει η φωτεινή ροή (σε lumen) που εκπέμπεται από το φωτιστικό σε διευθύνσεις άνω της οριζοντίου (ULOR) και συνεπώς αποτελεί άμεση φωτεινή ρύπανση. Επίσης, η φωτεινή ροή που εκπέμπεται υπό γωνίες $70^\circ - 90^\circ$ αποτελεί φωτεινή παρενόχληση, εφόσον ουσιαστικά δε φωτίζει το δρόμο. Το άθροισμα της άνω του οριζοντος εκπεμπόμενης φωτεινής ροής Φ_{ULOR} και της φωτεινής ροής Φ_{70-90} που εκπέμπεται υπό γωνίες $70^\circ - 90^\circ$ αποτελεί το μη χρήσιμο φως του φωτιστικού $\Phi_{not-use}$:

$$\Phi_{not-use} = \Phi_{ULOR} + \Phi_{70-90} \quad (5.3)$$

Η μείωση στη $\Phi_{not-use}$ που θα επιτευχθεί με την αντικατάσταση κάθε συμβατικού φωτιστικού από το αντίστοιχο φωτιστικό LED μεταφράζεται σε ετήσια μείωση άσκοπης κατανάλωσης ενέργειας.

Από περιβαλλοντικής σκοπιάς, και η ακτινοβολία που ανακλάται από την άσφαλτο και από το γύρω περιβάλλον (κτίρια, δέντρα, κλπ) συνεισφέρει σημαντικά στη φωτεινότητα του νυκτερινού ουρανού και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Θεωρώντας άσφαλτο τύπου R3 η οποία έχει συντελεστή ανάκλασης ίσο με $\rho_{asph} = 0,07$ και λαμβάνοντας συμβατικά συντελεστή ανάκλασης για τον περιβάλλοντα του φωτιστικού χώρο $\rho_{amb} = 0,1$ έχουμε ότι η συνολική εκπεμπόμενη προς τον ουρανό (άνω της οριζοντίου) φωτεινή ροή Φ_{sky} ισούται με

$$\Phi_{sky} = \Phi_{ULOR} + \rho_{asph} \cdot \Phi_{0-70} + \rho_{amb} \cdot \Phi_{70-90} \quad (5.4)$$

όπου Φ_{0-70} η φωτεινή ροή που εκπέμπεται υπό γωνίες έως και 70° (και αποτελεί το λεγόμενο χρήσιμο φως) και Φ_{70-90} η φωτεινή ροή που εκπέμπεται υπό γωνίες $70^\circ -90^\circ$ και συνιστά φωτεινή παρενόχληση. Η μείωση της Φ_{sky} που θα επιτευχθεί με την αντικατάσταση των συμβατικών φωτιστικών με LED μεταφράζεται σε μείωση ανεπιθύμητου φωτός στον ουρανό (lumen).

5.3) Αποτελέσματα στην εκπομπή μη χρήσιμου φωτός και την κατανάλωση ενέργειας

- Για το 1^ο ζεύγος φωτιστικών:

	CDS450 EB PR (συμβατικό – 79 W)	BDP780 GRN30 (LED – 26 W)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	5.507 lumens	2.417 lumens
Φ_{ULOR}	1.856 lumens	35 lumen
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	33,70	1,44
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	28,13	1,15
Φ_{70-90}	556 lumens	285 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	10,09	11,83
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	8,42	9,51
$\Phi_{not-use}$	2.412 lumens	320 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	43,80	13,27
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	36,55	10,67

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του μη χρήσιμου εκπεμπόμενου φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{not-use} = 2.412 - 320 = 2.092 \text{ lumens}$$

καθώς και εξοικονόμηση ισχύος 53 W (67%), οπότε θεωρώντας διάρκεια λειτουργίας των φωτιστικών τις 11 ώρες ημερησίως (4.015 ετησίως) προκύπτει ετήσιο ενεργειακό όφελος

$$\Delta E_1 = 53 \cdot 4.015 = 212.795 \text{ Wh} \approx 212,8 \text{ KWh}$$

- Για το 2^ο ζεύγος φωτιστικών:

	MADISON (συμβατικό – 84 W)	BDP780 GRN40 (LED – 37 W)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	2.710 lumens	3.274 lumens
Φ_{ULOR}	652 lumens	37 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	24,05	1,14
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	11,24	0,94
Φ_{70-90}	836 lumens	354 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	30,85	10,79
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	14,42	8,86
$\Phi_{not-use}$	1.488 lumens	392 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	54,90	11,93
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	25,65	9,80

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του μη χρήσιμου εκπεμπόμενου φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{not-use} = 1.488 - 392 = 1.096 \text{ lumens}$$

καθώς και εξοικονόμηση ισχύος 47 W (56%), που αντιστοιχεί σε ετήσιο ενεργειακό όφελος $\Delta E_2 = 188.705 \text{ Wh} \approx 188,7 \text{ KWh}$.

- Για το 3^ο ζεύγος φωτιστικών:

	CDS530 TB (συμβατικό – 114 W)	BDP780 GRN60 (LED – 48 W)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	10.301 lumens	4.833 lumens
Φ_{ULOR}	5.153 lumens	69 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	50,02	1,44
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	48,16	1,15
Φ_{70-90}	2.413 lumens	571 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	23,42	11,83
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	22,55	9,51
$\Phi_{not-use}$	7.566 lumens	640 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	73,45	13,27
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	70,71	10,67

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του μη χρήσιμου εκπεμπόμενου φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{not-use} = 7.566 - 640 = 6.926 \text{ lumens}$$

καθώς και εξοικονόμηση ισχύος 66 W (58%), οπότε προκύπτει ετήσιο ενεργειακό όφελος $\Delta E_3 = 264.990 \text{ Wh} \approx 265 \text{ KWh}$.

- Για το 4^ο ζεύγος φωτιστικών:

	CDS592 DF OO (συμβατικό - 169 W)	BGP430 T25 DK (LED – 61 W)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	11.411 lumens	6.131 lumens
Φ_{ULOR}	5.501 lumens	0 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	48,20	0
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	31,43	0
Φ₇₀₋₉₀	1.994 lumens	279 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	17,47	4,55
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	11,39	3,77
Φ_{not-use}	7.495 lumens	279 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	65,68	4,55
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	42,83	3,77

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του μη χρήσιμου εκπεμπόμενου φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{not-use} = 7.495 - 279 = 7.216 \text{ lumens}$$

καθώς και της καταναλισκόμενης ισχύος κατά 108 W (64%), οπότε προκύπτει ετήσιο ενεργειακό όφελος $\Delta E_4 = 433.620 \text{ Wh} \approx 433,6 \text{ KWh}$.

- Για το 5^ο ζεύγος φωτιστικών:

	HPB704 ACS (συμβατικό - 276 W)	BGP431 T25 DM (LED - 119 W)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	13.719 lumens	12.710 lumens
Φ_{ULOR}	1.288 lumens	0 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	9,40	0
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	5,85	0
Φ₇₀₋₉₀	2.644 lumens	1.119 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	19,30	8,78
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	12,02	7,51
Φ_{not-use}	3.932 lumens	1.119 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	28,69	8,78
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	17,87	7,51

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του μη χρήσιμου εκπεμπόμενου φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{not-use} = 3.932 - 1.119 = 2.813 \text{ lumens}$$

και της καταναλισκόμενης ισχύος κατά 157 W (57%), που αντιστοιχεί σε ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας $\Delta E_5 = 630.355 \text{ Wh} \approx 630 \text{ KWh}$.

5.4) Συνολικό ενεργειακό όφελος στην επικράτεια

Προκειμένου να υπολογιστεί το συνολικό ενεργειακό κέρδος για τη χώρα αν αντικατασταθούν οι 5 παραπάνω τύποι συμβατικών φωτιστικών που βρίσκονται εγκατεστημένα στην ελληνική επικράτεια θα πρέπει να γνωρίζουμε τον αριθμό τους. Με βάση στοιχεία του 2005 [1] στην Ελλάδα ήταν εγκατεστημένα 900.000 οδικά φωτιστικά, το 92% των οποίων λειτουργούσαν με λαμπτήρες ατμών υψηλής πίεσης. Είναι ασφαλές, επομένως, να θεωρήσουμε ότι 12 χρόνια μετά (και δεδομένου ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία λαμπτήρων παραμένει η πιο δημοφιλής) ο αριθμός τους ανέρχεται περίπου στο 1 εκατομμύριο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το εθνικό οδικό δίκτυο φωταγωγείται αποκλειστικά με φωτιστικά σχήματος κόμπρα (τα οποία χρησιμοποιούνται και μέσα στις πόλεις) τα οποία δεν εξετάστηκαν, με μια αυτοψία σε περιοχές της Αθήνας προκύπτουν ενδεικτικά ποσοστά (επί του συνόλου του 1 εκ.) για κάθε τύπο συμβατικού φωτιστικού που μελετήθηκε. Ο αντίστοιχος αριθμός φωτιστικών σωμάτων στην επικράτεια, πολλαπλασιαζόμενος με το ενεργειακό κέρδος που εξασφαλίζει η αντικατάσταση καθενός από αυτά με το αντίστοιχο φωτιστικό τεχνολογίας LED μας δίνει το συνολικό ενεργειακό όφελος για τη χώρα:

Μοντέλο φωτιστικού	Πλήθος φωτιστικών στην επικράτεια	Ενεργειακό όφελος / αντικαθιστάμενο φωτιστικό (kWh)	Συνολικό ετήσιο ενεργειακό όφελος (kWh)
1. CDS450 EB PR	20.000 (2%)	212,8 (67%)	4.256.000
2. Madison	20.000 (2%)	188,7 (56%)	3.774.000
3. CDS530 TB	100.000 (10%)	265 (58%)	26.500.000
4. CDS592 DF OO	50.000 (5%)	433,6 (64%)	21.680.000
5. HPB704 ACS	150.000 (15%)	630 (57%)	94.500.000

5.5) Αποτελέσματα στη συνολική φωτεινή ρύπανση

- Για το 1^ο ζεύγος φωτιστικών:

	CDS450 EB PR (συμβατικό)	BDP780 GRN30 (LED)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	5.507 lumens	2.417 lumens
Φ_{ULOR} (άμεση φωτεινή ρύπανση)	1.856 lumens	35 lumens
$\rho_{asph} \cdot \Phi_{0-70}$ (ανακλώμενο από την άσφαλτο φως)	217 lumens	146 lumens
$\rho_{amb} \cdot \Phi_{70-90}$ (ανακλώμενο από το περιβάλλον φως)	56 lumens	29 lumens
Φωτεινή Ρύπανση Φ_{sky}	2.128 lumens	210 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	38,65	8,69
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	32,25	6,99

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του συνολικού εκπεμπόμενου στον ουρανό φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{sky1} = 2.128 - 210 = 1.918 \text{ lumens (90\%)}$$

- Για το 2^ο ζεύγος φωτιστικών:

	MADISON (συμβατικό)	BDP780 GRN40 (LED)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	2.710 lumens	3.274 lumens
Φ_{ULOR} (άμεση φωτεινή ρύπανση)	652 lumens	37 lumens
$\rho_{asph} \cdot \Phi_{0-70}$ (ανακλώμενο από την άσφαλτο φως)	86 lumens	202 lumens
$\rho_{amb} \cdot \Phi_{70-90}$ (ανακλώμενο από το περιβάλλον φως)	84 lumens	35 lumens
Φωτεινή Ρύπανση Φ_{sky}	821 lumens	275 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	30,29	8,38
% της φωτεινής ροής ων λαμπτήρων	14,16	6,88

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του συνολικού εκπεμπόμενου στον ουρανό φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{sky2} = 821 - 275 = 546 \text{ lumens (67\%)}$$

- Για το 3^ο ζεύγος φωτιστικών:

	CDS530 TB (συμβατικό)	BDP780 GRN60 (LED)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	10.301 lumens	4.833 lumens
Φ_{ULOR} (άμεση φωτεινή ρύπανση)	5.153 lumens	69 lumens
$\rho_{asph} \cdot \Phi_{0-70}$ (ανακλώμενο από την άσφαλτο φως)	191 lumens	293 lumens
$\rho_{amb} \cdot \Phi_{70-90}$ (ανακλώμενο από το περιβάλλον φως)	241 lumens	57 lumens
Φωτεινή Ρύπανση Φ_{sky}	5.586 lumens	419 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	54,22	8,69
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	52,20	6,99

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του συνολικού εκπεμπόμενου στον ουρανό φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{sky3} = 5.586 - 419 = 5.167 \text{ lumens (92\%)}$$

- Για το 4^ο ζεύγος φωτιστικών:

	CDS592 DF 00 (συμβατικό)	BGP430 T25 DK (LED)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	11.411 lumens	6.131 lumens
Φ_{ULOR} (άμεση φωτεινή ρύπανση)	5501 lumens	0 lumens
$\rho_{asph} \cdot \Phi_{0-70}$ (ανακλώμενο από την άσφαλτο φως)	274 lumens	410 lumens
$\rho_{amb} \cdot \Phi_{70-90}$ (ανακλώμενο από το περιβάλλον φως)	199 lumens	27,89 lumens
Φωτεινή Ρύπανση Φ_{sky}	5.974 lumens	438 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	52,35	7,14
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	34,14	5,91

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του συνολικού εκπεμπόμενου στον ουρανό φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{sky4} = 5.974 - 438 = 5.536 \text{ lumens (93\%)}$$

- Για το 5^ο ζεύγος φωτιστικών:

	HPB704 ACS (συμβατικό)	BGP431 T25 DM (LED)
Φωτεινή Ροή Φωτιστικού	13.719 lumens	12.710 lumens
Φ_{ULOR} (άμεση φωτεινή ρύπανση)	1288 lumens	0 lumens
$\rho_{asph} \cdot \Phi_{0-70}$ (ανακλώμενο από την άσφαλτο φως)	684 lumens	814 lumens
$\rho_{amb} \cdot \Phi_{70-90}$ (ανακλώμενο από το περιβάλλον φως)	264 lumens	112 lumens
Φωτεινή Ρύπανση Φ_{sky}	2.236 lumens	926 lumens
% της φωτεινής ροής του φωτιστικού	16,32	7,26
% της φωτεινής ροής των λαμπτήρων	10,17	6,22

Επομένως, αντικατάσταση του συμβατικού φωτιστικού από το φωτιστικό LED θα επιφέρει μείωση του συνολικού εκπεμπόμενου στον ουρανό φωτός κατά

$$\Delta\Phi_{sky} = 2.236 - 926 = 1.310 \text{ lumens (59\%)}$$

5.6) Συνολική μείωση της φωτεινής ρύπανσης στην επικράτεια

Με βάση τα στοιχεία της παραγράφου 5.4 για τον εκτιμώμενο συνολικό αριθμό των 5 συγκεκριμένων συμβατικών μοντέλων φωτιστικών προκύπτει με αναγωγή ο ακόλουθος πίνακας για τη συνολική μείωση της φωτορρύπανσης Φ_{sky} που θα προσφέρει η μετάβαση σε φωτιστικά τεχνολογίας LED:

Μοντέλο φωτιστικού	Πλήθος φωτιστικών στην επικράτεια	Μείωση της Φ_{sky} / αντικαθιστάμενο φωτιστικό (lumens)	Συνολική μείωση της Φ_{sky} (lumens)
1. CDS450 EB PR	20.000 (2%)	1.918 (90%)	38.360.000
2. Madison	20.000 (2%)	546 (67%)	10.920.000
3. CDS530 TB	100.000 (10%)	5.167 (92%)	516.700.000
4. CDS592 DF OO	50.000 (5%)	5.536 (93%)	276.800.000
5. HPB704 ACS	150.000 (15%)	1.310 (59%)	196.500.000

5.7) Συνοπτικά αποτελέσματα

Τα οφέλη από την αντικατάσταση όλων των φωτιστικών των παραπάνω 5 συμβατικών τύπων με σύγχρονα φωτιστικά τύπου LED, τόσο στη μείωση της συνολικής φωτεινής ρύπανσης όσο και στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας της χώρας συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα:

Ζεύγη φωτιστικών	Μείωση της συνολικής φωτεινής ρύπανσης Φ_{sky} (lumens)	Εξοικονόμηση ενέργειας (kWh ετησίως)
1ο Ζεύγος	38.360.000 (90%)	4.256.000 (67%)
2ο Ζεύγος	10.920.000 (67%)	3.774.000 (56%)
3ο Ζεύγος	516.700.000 (92%)	26.500.000 (58%)
4ο Ζεύγος	276.800.000 (93%)	21.680.000 (64%)
5ο Ζεύγος	196.500.000 (59%)	94.500.000 (57%)
ΣΥΝΟΛΟ	1.039.280.000 (83%)	150.710.000 (58%)

5.8) Εφαρμογή προγράμματος adaptive lighting

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων τεχνολογίας LED είναι η δυνατότητα προσαρμογής των επιπέδων φωτισμού κατά το δοκούν, είτε αυτόματα με τη χρήση αισθητήρων είτε μέσω ενός απομακρυσμένου κεντρικού συστήματος διαχείρισης. Δεδομένου ότι οι ανάγκες φωτισμού κάθε δρόμου αλλάζουν κατά τη διάρκεια του 24ώρου (αλλά και του έτους) ανάλογα με το φυσικό φως, τον καιρό, την κυκλοφορία των οχημάτων κλπ, ένα σύστημα διαχείρισης του οδοφωτισμού θα προσέφερε εξοικονόμηση ενέργειας όταν οι συνθήκες επιτρέπουν χαμηλότερα επίπεδα τεχνητού φωτός (σύμφωνα πάντα με τα διεθνή πρότυπα ασφαλείας).

Ένα τέτοιο σύστημα έχει εφαρμοστεί σε εγκατάσταση οδοφωτισμού στην πόλη της Ιεράπετρας [40] και εξασφαλίζει ακόμη μεγαλύτερα οφέλη όσον αφορά τη φωτεινή ρύπανση, αλλά και την κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με χρήση απλώς φωτιστικών LED στη θέση των παλαιών συμβατικών που αντικαταστάθηκαν. Συγκεκριμένα, με την εφαρμογή προγράμματος adaptive lighting επιτεύχθηκε μείωση κατά 18,4% της καταναλισκόμενης για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι η εκπεμπόμενη φωτεινή ροή μεταβάλλεται κατά προσέγγιση ανάλογα με την ισχύ για όλα τα φωτιστικά LED (όπως άλλωστε αποδείχθηκε και από τις μετρήσεις στα φωτιστικά της συγκεκριμένης εγκατάστασης στην Ιεράπετρα), ανάλογη θα είναι και η μείωση στη φωτεινή ρύπανση, αφού αυτή είναι ευθέως ανάλογη της

συνολικής εκπεμπόμενης φωτεινής ροής. Επομένως, αν θεωρήσουμε το συγκεκριμένο ποσοστό αντιπροσωπευτικό, τότε η αξιοποίηση ενός συστήματος adaptive lighting για τα φωτιστικά LED που επελέγησαν να αντικαταστήσουν τα παλαιά συμβατικά στην παρούσα μελέτη θα επέφερε τα ακόλουθα επιπρόσθετα οφέλη:

Ζεύγη φωτιστικών	Επιπρόσθετη μείωση της συνολικής φωτεινής ρύπανσης Φ_{sky} (lumens)	Επιπρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας (kWh ετησίως)
1ο Ζεύγος	772.800	384.137
2ο Ζεύγος	1.012.000	546.701
3ο Ζεύγος	7.709.600	3.545.864
4ο Ζεύγος	4.029.600	2.253.402
5ο Ζεύγος	25.557.600	13.196.664
ΣΥΝΟΛΟ	39.081.600	199.267.678

Έτσι τα συνολικά οφέλη από την αντικατάσταση των εξεταζόμενων 5 τύπων συμβατικών φωτιστικών με φωτιστικά τύπου LED εξοπλισμένα με σύστημα adaptive lighting θα διαμορφώνονταν ως εξής:

Ζεύγη φωτιστικών	Συνολική μείωση της συνολικής φωτεινής ρύπανσης Φ_{sky} (lumens)	Συνολική εξοικονόμηση ενέργειας (kWh ετησίως)
1ο Ζεύγος	39.132.800 (92%)	4.640.137 (73%)
2ο Ζεύγος	11.932.000 (73%)	4.320.701 (64%)
3ο Ζεύγος	524.409.600 (94%)	30.045.864 (66%)
4ο Ζεύγος	280.829.600 (94%)	23.933.402 (71%)
5ο Ζεύγος	222.057.600 (66%)	107.696.664 (65%)
ΣΥΝΟΛΟ	1.078.361.600 (86%)	170.636.768 (66%)

Επίλογος

Σε μια εποχή που η ανάγκη για εξοικονόμηση φυσικών πόρων και μείωση του αντίκτυπου της ανθρώπινης δραστηριότητας στο φυσικό περιβάλλον γίνεται ολοένα και πιο πιεστική, κρίνεται αναγκαία η συνεχής έρευνα και δημιουργία πιο αποδοτικών τεχνολογιών σε όλους τους τομείς. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνεται ο φωτισμός οδών και εξωτερικών χώρων, που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του ανθρώπινου πολιτισμού.

Όπως έγινε φανερό στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οδικών φωτιστικών που λειτουργούν με λαμπτήρες LED τα καθιστούν ανώτερα των παλαιότερων τεχνολογιών, όσον αφορά τόσο την κατανάλωση ενέργειας όσο και τη φωτεινή ρύπανση που αναπόφευκτα προκαλεί μια εγκατάσταση τεχνητού νυκτερινού φωτισμού. Τα ποσοστά μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και του ανεπιθύμητου φωτός στον ουρανό είναι τόσο εντυπωσιακά (και γίνονται ακόμη μεγαλύτερα με την αξιοποίηση της τεχνολογίας adaptive lighting), ώστε πρέπει αναμφισβήτητα να εξεταστεί σοβαρά η πιθανότητα αντικατάστασης των παλιών μοντέλων με σύγχρονα. Δεδομένου ότι οι τύποι των συμβατικών φωτιστικών που μελετήθηκαν αντιστοιχούν κατ' εκτίμηση στο 34% των εγκατεστημένων στην Ελλάδα οδικών φωτιστικών, είναι ευνόητο ότι τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη θα είναι πολύ μεγαλύτερα αν η μελέτη επεκταθεί και στους τύπους που αντιπροσωπεύουν το υπόλοιπο 66% των οδικών φωτιστικών της χώρας.

Βέβαια, όπως σε κάθε μεγάλης κλίμακας τεχνικό έργο, για ένα τέτοιο εγχείρημα απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και αξιολόγηση των αναγκών των τοπικών κοινωνιών, ώστε τα οφέλη της δράσης να μην υπερκαλύπτονται από τις αρνητικές συνέπειες. Σίγουρα το αρχικό κόστος αγοράς των νέων φωτιστικών και εγκατάστασής τους – σε μια εποχή βαθιάς οικονομικής κρίσης για τη χώρα - είναι η παράμετρος που θα ληφθεί πρώτα υπόψη (παρόλο που σε περιοχές ιδιαίτερα επιβαρυνμένες από τη φωτορρύπανση πιστεύουμε ότι τα οφέλη της καταφυγής σε φωτιστικό εξοπλισμό νέας τεχνολογίας αποτελούν βάσιμη δικαιολογία για μια τέτοια δαπάνη).

Όπως, όμως, έγινε φανερό στο 3ο κεφάλαιο, οι συνέπειες της φωτεινής ρύπανσης δεν αφορούν μόνο την κατανάλωση ενέργειας, ούτε φυσικά την ικανότητά μας να

διακρίνουμε τον έναστρο ουρανό. Το είδος του φωτός που παράγουν οι λαμπτήρες LED είναι (προς το παρόν, τουλάχιστον) πολύ διαφορετικό από αυτό στο οποίο μέχρι τώρα καταφεύγαμε για να φωτίσουμε το περιβάλλον μας, και διαθέτει χαρακτηριστικά που μπορούν να επηρεάσουν με απρόβλεπτο τρόπο τόσο τη βιολογία του ανθρώπου όσο και το φυσικό περιβάλλον, με διαταραχή των υφιστάμενων ισορροπιών χλωρίδας και πανίδας. Γι' αυτό σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετάζεται σφαιρικά η αποδοτικότητα και επίδραση του οδικού φωτισμού στο συγκεκριμένο τοπικό επίπεδο, και η έμφαση να δίνεται στη μείωση των επιπέδων φωτός, ώστε αυτά να μην υπερβαίνουν τα ορισμένα από τους διεθνείς κανονισμούς επίπεδα ασφαλείας. Μόνο έτσι θα εξισορροπηθούν κατά το δυνατόν οι ανάγκες για ποιότητα ζωής για τους πολίτες, ελάφρυνση του κρατικού προϋπολογισμού και μείωση της αρνητικής επίδρασης της ανθρώπινης δραστηριότητας στο φυσικό περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

- [1] P. Van Tichelen, T. Geerken, B. Jansen , M. Vanden Bosch, V. Van Hoof, L. Vanhooydonck, A. Vercauteren, *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs - Final Report Lot 9: Public street lighting*, Study for the European Commission DGTREN unit D3, January 2007
- [2] National Lighting Product Information Program, *Light pollution*, Lighting answers, Vol. 7, Is. 2, March 2003 (Revised February 2007), Rensselaer Polytechnic Institute
- [3] Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies, *A method for estimating discomfort glare from exterior lighting systems*, ASSIST Recommends..., Vol. 9, Is. 1, April 2011
- [4] R. Dick, A. Weeks, *Fighting light pollution in the Ottawa area*, The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Vol. 91, No. 5, October 1997
- [5] Commission Internationale de l'Éclairage, *Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations*, Technical report CIE No. 150, 2003
- [6] X. Κουτρούλης, *Φωτορύπανση*, Περισκόπιο της Επιστήμης, Τεύχος 267, Δεκέμβριος 2002
- [7] International Dark-Sky Association, *Light Pollution and Limiting Magnitude*, Information Sheet No. 120, March 1997, <http://www.darksky.org>
- [8] K. Narisada, D. Schreuder, *Light Pollution Handbook, Volume I*, Astrophysics and Space Science Library, Springer Science & Business Media, 2004

- [9] C. Luginbuhl et al, *From the Ground Up II: Sky Glow and Near-Ground Artificial Light Propagation in Flagstaff, Arizona*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121:204–212, February 2009
- [10] D. A. Schreuder, *Light trespass countermeasures*, Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 17, IAU Colloquium 112, 1991, D.L. Crawford, Ed., p. 25.
- [11] The Royal Commission on Environmental Pollution, *Artificial light in the environment*, 2009, <https://www.gov.uk>
- [12] A. Gutierrez-Escolar, A. Castillo-Martinez, J. M. Gomez-Pulido, J. M. Gutierrez-Martinez, Z. Stapic, J. A. Medina-Merodio, *A Study to Improve the Quality of Street Lighting in Spain*, Energies, Vol. 8, Is. 2, February 2015
- [13] A. Hänel, *The situation of light pollution in Germany*, Preserving the Astronomical Sky, Proceedings of the IAU Symposium, Vol. 196, 2001, R. J. Cohen and W. T. Sullivan, III, eds.
- [14] P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 328, 2001
- [15] F. Falchi, P. Cinzano, D. Duriscoe, C. C. M. Kyba, C. D. Elvidge, K. Baugh, B. A. Portnov, N. A. Rybnikova, R. Furgoni, *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances, Vol. 2, Is. 6, June 2016
- [16] P. Cinzano, *Light pollution and the situation of the night sky in Europe, in Italy and in Veneto*, Light pollution and the protection of the night environment, Proceedings of the IDA Regional Meeting “Venice: Let’s save the night”, 2002
- [17] C. Aubrecht, M. Stojan-Dolar, A. de Sherbinin, M. Jaiteh, T. Longcore, C. Elvidge, *Lighting governance for protected areas and beyond – Identifying the urgent need for sustainable management of artificial light at night*, December 2010, <http://www.earthzine.org>

- [18] CieloBUIO - Coordinamento per la protezione del cielo notturno, *Legge della Regione Lombardia n. 38 del 21/12/2004*, <http://www.cielobuio.org>
- [19] F. Falchi, P. Cinzano, C. D. Elvidge, D. M. Keith, A. Haim, *Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility*, *Journal of Environmental Management*, 2011, doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.029
- [20] M. S. Rea, J. D. Bullough, C. R. Fay, J. A. Brons, J. Van Derlofske, E. T. Donnell, *Review of the safety benefits and other effects of roadway lighting*, Final report prepared for the National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of The National Academies, June 2009
- [21] R. Steinbach, C. Perkins, L. Tompson, S. Johnson, B. Armstrong, J. Green, C. Grundy, P. Wilkinson, P. Edwards, *The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis*, *Journal of Epidemiology and Community Health*, July 2015, <http://jech.bmj.com>
- [22] P. R. Boyce, N. H. Eklund, B. J. Hamilton, L. D. Bruno, *Perceptions of Safety at Night in Different Lighting Conditions*, *Lighting Research and Technology*, 32(2), 2000
- [23] E. N. Morrow, S. A. Hutton, *The Chicago Alley Lighting Project: Final Evaluation Report*, Research and Analysis Unit, Illinois Criminal Justice Information Authority, April 2000
- [24] The Institution of Lighting Engineers, *Domestic Security Lighting, Friend or Foe*, 2003, <http://www.ile.org.uk>
- [25] K. J. Navara, R. J. Nelson, *The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences*, *Journal of Pineal Research*, Vol. 43, Is. 3, October 2007

- [26] N. Kronfeld-Schor, D. Dominoni, H. de la Iglesia, O. Levy, E. D. Herzog, T. Dayan, C. Helfrich-Forster, *Chronobiology by moonlight*, Proceedings of the Royal Society B, Vol. 280, Is. 1765, August 2013
- [27] H. Raine, J. J. Borg, A. Raine, S. Bairner, M. B. Cardona, *Light pollution and its effect on Yelkouan Shearwaters in Malta; causes and solutions*, December 2007, <http://ec.europa.eu/environment/life/>
- [28] R. H. French-Constant, R. Somers-Yeates, J. Bennie, T. Economou, D. Hodgson, A. Spalding, P. K. McGregor, *Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom*, Proceedings of the Royal Society B, Vol. 283, Is. 1833, June 2016, <https://www.gov.uk>
- [29] D. Blask, G. Brainard, R. Gibbons, S. Lockley, R. Stevens, M. Motta, *Light Pollution: Adverse Health Effects of Nighttime Lighting*, Report 4 of the Council on Science and Public Health, 2012
- [30] Illinois Coalition for Responsible Outdoor Lighting, *How Bright the Night? Light and Human Health*, www.illinoislighting.org/health2.html
- [31] L. K. Fonken, R. J. Nelson, *Illuminating the deleterious effects of light at night*, F1000 Medicine Reports 2011, <http://f1000.com/reports/m/3/18>
- [32] The Institution of Lighting Engineers, *Guidance notes for the reduction of light pollution*, 2000 (Revised 05/03), <http://www.ile.org.uk>
- [33] P. Cinzano, *Technical measures for an effective limitation of the effects of light pollution*, Light pollution and the protection of the night environment, Proceedings of the IDA Regional Meeting “Venice: Let’s save the night”, 2002
- [34] Illuminating Engineering Society of North America, *The IESNA lighting handbook – Reference and application*, 9th Edition (July 2000)
- [35] Φ. Β. Τοπαλής, Λ. Οικονόμου, Σ. Κουρτέση, *Φωτοτεχνία*, εκδ. Τζιόλα

- [36] Smart Lighting Engineering, *Smart Light: Street and Urban*, <http://www.sleprojects.com>
- [37] R. Gibbons, F. Guo, A. Medina, T. Terry, J. Du, P. Lutkevich, Q. Li, *Design Criteria for Adaptive Roadway Lighting*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-14-051, July 2014
- [38] M. H. Hilton, *A Comparison of Full and Partial Lighting on Two Sections of Roadway*, (VHTRC 80-R52), Virginia Highway & Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 1980.
- [39] The Institution of Lighting Professionals, *Guidance Notes for the Reduction of Obtrusive Light GN01:2011*, <https://www.theilp.org.uk>
- [40] D. P. T. Nikolaou, V. D. Tsiouri, A. L. Tsenekidis, V. A. Evangelopoulos, *Energy efficiency improvement of a LED street lighting installation: An adaptive lighting case study in the town of Ierapetra, Crete*, Proceedings of the 6th Balkan Light Conference, September 2015