

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

## “Η Φωτορύπανση και οι επιδράσεις της στην υγεία, οικονομία, φύση και επιστήμη”



**Επιβλέπων Καθηγητής :** ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**Σπουδαστής :** ΡΟΔΙΤΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ AM: 30226

ΑΘΗΝΑ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ – 2012



# Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων .....	2
Πίνακας Εικόνων .....	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά στοιχεία φωτορύπανση .....	7
1.1 Η φωτορύπανση ως μία αναδυόμενη έννοια .....	7
1.2 Φωτορύπανση: Ιστορικά στοιχεία και επισκόπηση επιδράσεων .....	9
1.3 Δομή πτυχιακής .....	17
Κεφάλαιο 2: Φως και φωτομετρία .....	19
2.1 Το ανθρώπινο σύστημα όρασης .....	19
2.2 Στοιχεία φωτομετρίας και νόμοι .....	22
2.2.1 Φωτεινή ένταση .....	22
2.2.2 Φωτεινή ροή .....	23
2.2.3 Φωτισμός (Illuminance) .....	24
2.2.4 Λαμπρότητα (Luminance) .....	25
2.2.5 Φωτεινή απόδοση .....	27
2.2.6 Ο νόμος του Lambert .....	27
2.3 Ραδιομετρικά μεγέθη .....	29
2.3.1 Ακτινοβόλος ισχύς .....	29
2.3.2 Επιφανειακή ακτινοβόλος ισχύς .....	29
2.4 Τεχνητές πηγές φωτός και τύποι λαμπτήρων .....	30
Κεφάλαιο 3: Είδη φωτορύπανσης και δράσεις αντιμετώπισης .....	38
3.1 Είδη φωτορύπανσης .....	38
3.2 Ζητήματα φωτορύπανσης στην επιστήμη .....	41
3.3 Ζητήματα οικολογικής φωτορύπανσης .....	43
3.4 Ζητήματα φωτορύπανσης στην υγεία .....	46
3.5 Περιβαλλοντικά ρίσκα και θέματα οικονομίας .....	48

3.6 Δράσεις αντιμετώπισης και επισκόπηση παγκόσμιας νομοθεσίας .....	50
3.6.1 Αυστραλία .....	50
3.6.2 Καναδάς.....	50
3.6.3 Χιλή.....	52
3.6.4 Τσεχία .....	53
3.6.5 Ευρωπαϊκή Ένωση.....	54
3.6.6 Φιλανδία .....	59
3.6.7 Νέα Ζηλανδία .....	60
3.6.8 Αγγλία.....	61
Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις φωτορύπανσης και ανάλυση δεδομένων .....	62
4.1 Ψηφιακή φωτογράφιση .....	62
4.2 Φασματο-φωτομετρία .....	64
4.3 Φωτομετρία ουρανού νύχτας .....	65
4.4 Καταγραφή φωτορύπανσης.....	67
4.5 Εκτιμήσεις φωτορύπανσης .....	70
4.6 Μοντελοποίηση δεδομένων φωτορύπανσης.....	71
4.6.1 Μοντέλο τεχνικής φωταγώγησης ουρανού του Garstang.....	71
4.6.2 Μοντέλο illumina.....	73
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση επιπτώσεων .....	75
5.1 Επιπτώσεις στην φυσιολογία των φυτών .....	75
5.2 Επιπτώσεις στην Φυσιολογία των ζώων, πουλιών και ψαριών .....	79
5.3 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη φυσιολογία.....	81
Κεφάλαιο 6: Επίλογος .....	83
6.1 Συμπεράσματα .....	83
Βιβλιογραφικές Αναφορές .....	84

## Πίνακας Εικόνων

**Εικόνα 1.1:** Παγκόσμιος άτλαντας φωτός από το πρόγραμμα DMSP

**Εικόνα 2.1:** Λειτουργικές ευαισθησίες του ματιού στο φάσμα. Στην φωτοπική όραση, όταν τα κωνία είναι ενεργά, η ευαισθησία του ματιού ακολουθεί την συνάρτηση  $V(\lambda)$  με ένα μέγιστο μήκος κύματος 555nm. Σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού, μόνο τα ραβδία είναι ενεργά και η φασματική ευαισθησία ακολουθεί την συνάρτηση  $V'(\lambda)$ , με ένα μέγιστο μήκος κύματος 505nm. Το  $V_{mes}(\lambda)$  είναι ένα παράδειγμα της πιθανής μεσοπικής (mesopic) φασματικής ευαισθησίας, καθώς δεν υπάρχει οριστική συνάρτηση για αυτήν ακόμα. Η συνάρτηση  $V_{10}(\lambda)$  είναι η φωτοπική φασματική ευαισθησία, για κάθε μεγάλο στόχο.

**Εικόνα 2.2:** Το φάσμα των τιμών φωτεινότητας, πέρα από το οποίο το σύστημα της όρασης λειτουργεί. Στα χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού, μόνο τα ραβδία είναι ενεργοποιημένα. Τα κωνία αρχίζουν να συμβάλλουν στην αντίληψη της όρασης στο επίπεδο τους φωτός της αστροφεγγιάς (φως αστεριών) και είναι οι μόνοι δέκτες που λειτουργούν, σε καταστάσεις μεγάλης φωτεινότητας

**Εικόνα 2.3:** Απεικόνιση της Λαμπρότητας και του φωτισμού

**Εικόνα 2.4:** Κατανομή της φωτεινής έντασης ( $I$ ) και της Λαμπρότητας ( $L$ ) σε μια επιφάνεια Lambertian

**Εικόνα 2.5:** Παραδείγματα διαφορετικών τύπων λαμπτήρων: a) παραδοσιακός λαμπτήρας πυρακτώσεως, b) λαμπτήρας ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης, c)

λαμπτήρας μετάλλων αλογόνων (MH) d) λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης (HPS),  
e) λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης (LPS)

**Εικόνα 2.6:** Παραδείγματα φάσματος διαφορετικών πηγών φωτός

**Εικόνα 2.7:** Παραδείγματα της κατανομής φασματικής ισχύος (SPD) διαφορετικών τύπων λαμπτήρων: (a) λαμπτήρας ατμού υδραργύρου υψηλής πίεσης, (b) λαμπτήρας μετάλλων αλογόνου (MH), (c) λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης (HPS), (d) λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης (LPS)

**Εικόνα 3.1:** Χρήσιμο φως και φωτορύπανση από μία κοινή πηγή φωτός

**Εικόνα 3.2:** Κατανομή των τεχνητού φωτός, ορατού από το διάστημα. Παρατηρούνται τέσσερις τύποι φωτός: (1) πόλεις, κωμοπόλεις και χωριά (άσπρα), (2) πυρκαγιές (κόκκινο), (3) φλόγες αερίου (πράσινες) και (4) σκάφη (μπλε)

**Εικόνα 3.3:** Η οικολογική και η αστρονομική φωτορύπανση

**Εικόνα 3.4:** Παραδείγματα αποδεκτών και μη αποδεκτών φωτιστικών σωμάτων, σύμφωνα με το τοπικό νομοθέτημα no. 0362 για τον φωτισμό της πόλης του Mississippi Mills

**Εικόνα 3.5:** Νομοθεσία για Φωτορύπανση στην Ιταλία

**Εικόνα 3.6:** Βασικές συστάσεις φωτισμού στις Κανάριες νήσους, όσον αφορά την κατανομή του φωτός, την γωνία καθώς και τον τύπο των λαμπτήρων.  
HPS = νατρίου υψηλής πίεσης, LPS = νατρίου χαμηλής πίεσης

**Εικόνα 4.1:** Φορητό φασματο-φωτόμετρο για την αποτύπωση της φωτορύπανσης

**Εικόνα 4.2:** Το Φορητό φωτόμετρο Unihedron Sky Quality Meter (SQM)

**Εικόνα 4.3:** Μέτρηση φωτεινότητας με το Unihedron Sky Quality Meter (SQM)

**Εικόνα 4.4:** Σκέδαση φωτός σύμφωνα με το μοντέλο του Garstang

**Εικόνα 4.5:** Μεθοδολογία οπτικής πυκνότητας αεροζόλ

## **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά στοιχεία φωτορύπανση**

### **1.1 Η φωτορύπανση ως μία αναδυόμενη έννοια**

Η φωτορύπανση είναι μια ταχύτατα αναδυόμενη και σχετικά νέα περιβαλλοντική έννοια.

Η φωτορύπανση προκαλείται κυρίως από την υπερβολική και ακατάλληλη εφαρμογή τεχνητού φωτισμού στο αστικό περιβάλλον.

Αρχικά, ο ορισμός της φωτορύπανσης είχε περιοριστεί μόνο στην όξυνση της λαμπρότητας του ουρανού την νύχτα, από τον προκαλούμενο φωτισμό [1].

Σήμερα η φωτορύπανση αναφέρεται επίσης σε προβλήματα που προκαλούνται από την υπερβολική, αδιάκριτη και ανεπαρκή χρήση του τεχνητού φωτός.

Η έννοια της φωτορύπανσης προέκυψε από αστρονομικές ανησυχίες που χρονολογούνται πίσω στη δεκαετία του 1950.



Ένας από τους πρώτους αστρονόμους που παρουσίασαν μια σχετική μελέτη ήταν ο F.M. Walker, ο οποίος μελέτησε τα παρόντα και τα πιθανά μελλοντικά αποτελέσματα του τεχνητού φωτισμού στις επίγειες οπτικές αστρονομικές παρατηρήσεις στην Καλιφόρνια και την Αριζόνα [2].

Η μελέτη αυτή απέδειξε ότι ο φωτισμός του ουρανού νύχτας από τις κοντινές πόλεις είχε επιπτώσεις τόσο στα σημαντικότερα παρατηρητήρια σε Καλιφόρνια και Αριζόνα, όσο και σε περιοχές που μπορούν να δημιουργηθούν μελλοντικά επίγεια οπτικά παρατηρητήρια.

Αποτέλεσμα αυτής της μελέτης ήταν η αστρονομική κοινότητα να αρχίσει να αναγνωρίζει ότι η φωτορύπανση είναι ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα για όλες τις χώρες και υπάρχει επείγουσα ανάγκη αντιμετώπισης της, ώστε να συνεχιστεί η ανάπτυξη της επίγειας αστρονομίας.

Το φαινόμενο της φωτορύπανσης είναι ένα αναπόφευκτο και αυξανόμενο πρόβλημα με την συνεχή παγκόσμια εκβιομηχάνιση και το ολοένα αυξανόμενο βιοτικό επίπεδο.

Η φωτορύπανση δεν έχει επιπτώσεις μόνο στην εξέταση των αστεριών κατά την νύχτα αλλά έχει επιπτώσεις και στην καθημερινή διαβίωση των περισσότερων ανθρώπων. Μελέτες και έρευνες έχουν δείξει ότι η φωτορύπανση δημιουργεί σημαντικές επιδράσεις στη βιολογία και την οικολογία των ειδών.

Οι ερευνητές Longcore και Rich προσδιόρισαν τη σημασία της φωτορύπανσης και πρότειναν να οριστεί το πρόβλημα που αναφέρεται ως την επίδραση του τεχνητού φωτός στα επίγεια και υδρόβια οικοσυστήματα [3] ως «οικολογική φωτορύπανση».

Υπάρχει ακόμα ένας αυξανόμενος αριθμός μελετών που δείχνει ότι το τεχνητό φως έχει σημαντικές δυσμενείς επιρροές στην ανθρώπινη υγεία. Δεδομένου ότι το φως είναι σημαντικό στην λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού, η υπερβολική έκθεση σε αυτό μπορεί να δημιουργήσει ποικίλες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, όπως για παράδειγμα κατάθλιψη, μείωση ποιότητας ύπνου, επαγρύπνηση κτλ [4].

## **1.2 Φωτορύπανση: Ιστορικά στοιχεία και επισκόπηση επιδράσεων**

Υπάρχουν δύο γενικές μορφές φωτός:

- το φυσικό φως (που προέρχεται από τον ήλιο) και
- το πάσης φύσεως τεχνητό φως.

Από την αρχή της ανθρώπινης ιστορίας, ο ήλιος είναι η αρχική πηγή φωτός που στηρίζει όλη τη ζωή.

Πριν από τη μαζική παραγωγή του τεχνητού φωτισμού, οι άνθρωποι εξαρτιόνταν από το φυσικό φως και έτσι έχτισαν το περιβάλλον και τη ζωή τους γύρω από αυτό.

Το τεχνητό φως αναπτύχθηκε ως τεχνολογική απάντηση για να φωτίσει τον κόσμο μετά από το σκοτάδι και για να ικανοποιήσει τις ανάγκες των ανθρώπων για μια σταθερότερη και ελέγξιμη μορφή φωτισμού.

Η ανάγκη για πιο ελέγξιμες και φορητές πηγές φωτός εκδηλώθηκε αρχικά με την κατασκευή φανών, λαμπτήρων πετρελαίου και κεριών. Οι πρώτοι φορητοί λαμπτήρες (με τη μορφή φανών) χρονολογούνται 30.000 έτη πίσω, πριν την Παλαιολιθική περίοδο, και φαίνονται σε έργα ζωγραφικής και χαράξεις σε σπηλιές που έχουν αποκαλυφθεί αρχαιολογικά.

Στο δέκατο όγδοο και δέκατο ένατο αιώνα, η εκβιομηχάνιση του φωτισμού (που τροφοδοτήθηκε από το φυσικό αέριο) οδήγησε στην εξέλιξη των πρώτων σύγχρονων συστημάτων φωτισμού οικοδόμησης. Αυτό ουσιαστικά σήμανε την αρχή του σύγχρονου τεχνητού φωτισμού. Ο φωτισμός με χρήση αερίου χρησιμοποιήθηκε για το φωτισμό των οδών, το εσωτερικό των κτηρίων κ.α..

Η εφεύρεση του ηλεκτρικού φωτισμού προς το τέλος του δέκατου ένατου αιώνα σηματοδότησε την νέα εποχή του φωτισμού. Η εφεύρεση του λαμπτήρα πυρακτώσεως από τον Joseph Swan το 1878 και τον Thomas Edison το 1879 έφερε την αλλαγή από το τεχνητό φως που παράγονταν μέσω των πτητικών καυσίμων στον ηλεκτρικό φωτισμό. [5]

Ο τεχνητός φωτισμός έγινε απαραίτητο συστατικό της ανθρώπινης ζωής και άλλαξε το ρόλο του φωτισμού. Εκτός από την ικανοποίηση των βασικών λειτουργικών αναγκών, το τεχνητό φως έγινε ένα μέσο με το οποίο οι άνθρωποι μπορούν να χειριστούν δημιουργικά ένα ευρύ φάσμα εικαστικών εφαρμογών, όπως π.χ. για να δώσει έμφαση σε αρχιτεκτονικά ορόσημα, διακοσμήσεις, διαφήμιση, μάρκετινγκ, κτλ.

Παρόλα αυτά, η αλόγιστη χρήση του τεχνητού φωτισμού άρχισε να προκαλεί ανησυχία. Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, οι αστρονόμοι ήταν οι πρώτοι που αναγνώρισαν τα αποτελέσματα της φωτορύπανσης, από σκοπιά παρέμβασης στις αστρονομικές παρατηρήσεις.

Ο συνδυασμός αύξησης του πληθυσμού και των πόλεων οδήγησε σε δραματική αύξηση της χρήσης του υπαίθριου φωτισμού. Οι πόλεις φωτίστηκαν με ένα αυξανόμενο ποσό τεχνητού φωτισμού. Ως αποτέλεσμα υπήρξε η αύξηση στον τεχνητό φωτισμό του ουρανού νύχτας.

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί, αναγνωρίζοντας τη σοβαρότητα της φωτορύπανσης και ζητώντας λύσεις για ένα βιώσιμο μέλλον. Ο στόχος εστιάζει κυρίως στον ορισμό αντικειμενικών μεγεθών μέτρησης της φωτορύπανσης για τη σύγκριση της ποιότητας του ουρανού νύχτας, σε διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις.

Οι έρευνες αυτές επικεντρώνονται στην ανάπτυξη διαφορετικών μεθοδολογιών για να διαμορφωθεί, να μετρηθεί και να συγκριθεί η φωτεινότητα του ουρανού νύχτας. Οι μέθοδοι χρησιμοποίησαν μια σειρά από οπτικές μετρήσεις, από απλές παρατηρήσεις με «γυμνά» μάτια, έως πολύ ακριβείς μετρήσεις, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένους εξοπλισμούς.

Ένας εμπειρικός τύπος αναπτύχθηκε στην Καλιφόρνια από τον F.M. Walker (γνωστός ως νόμος του Walker) για να υπολογίσει την ουράνια λάμψη, μετρώντας σε ζενίθια γωνία 45 μοιρών για μία αστική πηγή απόστασης  $d$  χιλιομέτρων:

$$I = 0.01 P d^{-2.5}$$

όπου

το  $I$  είναι η αύξηση της ουράνιας λάμψης σε σχέση με το φυσικό υπόβαθρο,

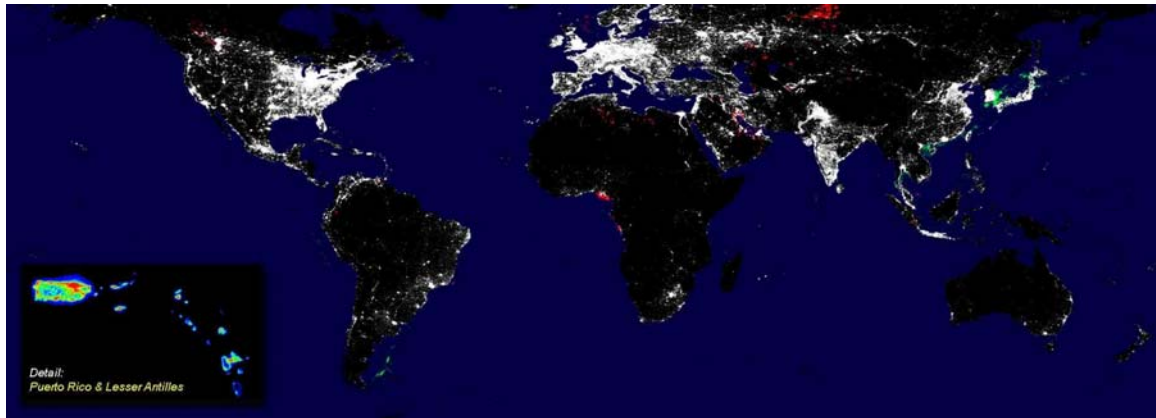
$P$  ο πληθυσμός της πόλης και

$d$  η απόσταση του κέντρου της πόλης σε χιλιόμετρα.

Η σχέση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη μεθοδολογιών που χρησιμοποιούν τον συνολικό πληθυσμό ενός τόπου πολλαπλασιασμένο με ένα δεδομένο αριθμό lumens/άτομο (μέγεθος που ουσιαστικά ορίζει τη μέση φωτορύπανση που προκαλείται ανά άτομο), για να υπολογιστεί η συνολική φωτεινότητα, και συνεπώς η φωτορύπανση.

Με την πρόοδο των δορυφόρων, ήταν δυνατό να παρασχεθούν δορυφορικές εικόνες και ποσοτικές μετρήσεις σχετικά με την εκπομπή φωτός από σχεδόν όλες τις χώρες στον κόσμο.

Ο πρώτος παγκόσμιος άτλαντας της τεχνητής φωτεινότητας ουρανού νύχτας παρουσιάστηκε το 2001 και παρέχει μια περιεκτική εικόνα της φωτορύπανσης ως πρόβλημα (εικόνα 1.1).



**Εικόνα 1.1:** Παγκόσμιος άτλαντας φωτός από το πρόγραμμα DMSP

Τα συμπεράσματα αποκαλύπτουν ότι η φωτορύπανση του ουρανού νύχτας δεν είναι περιορισμένη μόνο σε μεμονωμένες αναπτυγμένες χώρες αλλά έχει επιπτώσεις σχεδόν σε κάθε χώρα του κόσμου, ειδικότερα όμως

- στις Ηνωμένες Πολιτείες,
- την Ευρωπαϊκή Ένωση και
- την Ιαπωνία.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα 2/3 του παγκόσμιου πληθυσμού και το 99% του πληθυσμού στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρωπαϊκή Ένωση ζουν σε περιοχές όπου η φωτεινότητα του ουρανού νύχτας είναι επάνω από το κατώτατο όριο που έχει τεθεί.

Ακόμα, το 1/10 του παγκόσμιου πληθυσμού και το 1/6 του πληθυσμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν μπορεί πλέον να δει τον νυχτερινό ουρανό με γυμνό μάτι, λόγω της αυξημένης φωτεινότητας [7].

Η παραπάνω δορυφορική εικόνα (εικόνα 1.1) δίνει ένα ανησυχητικό σήμα για την έκταση της φωτορύπανσης στο περιβάλλον.

Ο ορισμός της φωτορύπανσης που δόθηκε αρχικά στην παρούσα εργασία, ως η αύξηση της λαμπρότητας του ουρανού νύχτας από τον προκαλούμενο από τον άνθρωπο φωτισμό, είναι στην πραγματικότητα πολύ περιορισμένη.

Η έννοια της φωτορύπανσης περιλαμβάνει πολλαπλάσια προβλήματα που προκαλούνται από την υπερβολική, αδιάκριτη και ανεπαρκή χρήση του τεχνητού φωτός. Κάποια από αυτά αναφέρονται παρακάτω [8]:

**Οχληρό φως (light trespass):** αναφέρεται στο φως που διαφεύγει πέρα από τα όρια των εγκαταστάσεων μέσα στις οποίες εκπέμπεται, προκαλώντας ενόχληση στους ανθρώπους στις γειτονικές εγκαταστάσεις [9]. Αυτή η πτυχή της φωτορύπανσης είναι υποκειμενική, δεδομένου ότι είναι δύσκολο να καθοριστεί πότε, που και πόσο φως είναι ανεπιθύμητο ή δεν χρειάζεται. Ένα συνηθισμένο πρόβλημα οχληρού φωτός εμφανίζεται όταν εισάγεται ισχυρό φως στο σπίτι, μέσω των παραθύρων, προκαλώντας διαταραχές, όπως στέρηση ύπνου.

**Υπερ-φωταγώγηση:** Η υπερ-φωταγώγηση οδηγεί σε άσκοπη απώλεια ενέργειας και συμβάλλει στο πρόβλημα ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

**Θάμβωση (glare):** η θάμβωση (έντονο φως) είναι μια οπτική αίσθηση που προκαλείται από την υπερβολική και ανεξέλεγκτη φωτεινότητα. Μπορεί να είναι από απλά ενοχλητική έως πλήρως αποπροσανατολιστική για τον άνθρωπο. Η θάμβωση είναι επίσης μία υποκειμενική έννοια, καθώς διαφορετικές ηλικιακές ομάδες έχουν διαφορετική ευαισθησία. Η θάμβωση προκαλείται από έντονες πηγές φωτός, όπως π.χ. φώτα αυτοκινήτων, προβολείς κτιρίων, διαφημίσεις κλπ.

**Συνορθύλευμα φωτός (light clutter):** Το συνορθύλευμα φωτός οφείλεται σε ομαδοποιήσεις διαφορετικών πηγών φωτός, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν σύγχυση, να αποσπάσουν την προσοχή, και ενδεχομένως να προκαλέσουν ατυχήματα. Είναι ιδιαίτερα εμφανές κατά μήκος δρόμων, με πολλούς φωτεινούς σηματοδότες καθώς και σημεία διαφήμισης.

**Ουράνια λάμψη:** Η ουράνια λάμψη αναφέρεται στην όξυνση της λαμπρότητας του ουρανού που προκαλείται από φυσικές και ανθρώπινες πηγές φωτός. Το τεχνητό φως που εκπέμπεται προς τα πάνω από τις πηγές φωτός του εδάφους επηρεάζει κυρίως την αύξηση της φωτεινότητας του ουρανού νύχτας. Δεδομένου ότι η ουράνια λάμψη εξαρτάται άμεσα από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες και το ποσό φωτός που κατευθύνεται προς τον ουρανό, το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα ορατό σε ανεπτυγμένες πόλεις μεγάλου πληθυσμού, κακών καιρικών συνθηκών, και σημαντικής μόλυνσης.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η φωτορύπανση είναι ένα σημαντικό φαινόμενο που έχει περιβαλλοντικές αλλά και κοινωνικές διαστάσεις.

Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει αποκαλύψει ότι η φωτορύπανση μπορεί να προκαλέσει δυσμενή αποτελέσματα στο περιβάλλον και το οικοσύστημα. Η μελέτη [3] επιβεβαίωσε ότι η ζωή εξελίσσεται σύμφωνα με τις φυσικές εναλλαγές φωτός και σκοταδιού, και η οποιαδήποτε αλλαγή τους, έχει σημαντικές επιπτώσεις στη συμπεριφορά των έμβιων όντων του πλανήτη μας.

Τα αποτελέσματα της οικολογικής φωτορύπανσης στη ζωική συμπεριφορά περιλαμβάνουν αλλαγές στον προσανατολισμό, τον αποπροσανατολισμό, απέχθεια προς το νέο περιβάλλον φωτός, κ.α., τα οποία μπορεί στη συνέχεια να έχουν επιπτώσεις στην αναπαραγωγή των οργανισμών.

Μια άλλη μελέτη έχει αποδείξει ότι η αναπαραγωγή των πουλιών επηρεάζεται χρονικά από την ποσότητα τεχνητού φωτός στην περιοχή αναπαραγωγής [10]. Έχει επίσης βρεθεί ότι οι θαλάσσιες χελώνες αποπροσανατολίζονται από τον φωτισμό των παραλιών, με επίδραση στην αναπαραγωγή τους [11].

Ακόμα, έρευνες αποκαλύπτουν ότι τουλάχιστον τέσσερα εκατομμύρια πουλιά πεθαίνουν κάθε έτος στις Ηνωμένες Πολιτείες από συγκρούσεις με φωτισμένους ουρανοξύστες, ενώ μεγάλος αριθμός θαλασσοπουλιών συντρίβεται κάθε χρόνο σε αλιευτικά σκάφη με ισχυρούς προβολείς [9].

Υπάρχει επίσης σε εξέλιξη ιατρική έρευνα για τα αποτελέσματα του υπερβολικού φωτός στους ανθρώπινους οργανισμούς και τη λειτουργία του ανθρώπινου σώματος.

Η έρευνα αυτή αποδεικνύει ότι η φωτορύπανση προκαλεί ποικίλα δυσμενή αποτελέσματα στην υγεία και την ψυχολογία του ανθρώπου. Η φωτορύπανση έχει συνδεθεί με φαινόμενα όπως

- η κατάθλιψη,
- η ποιότητα ύπνου,
- η επαγρύπνηση και
- η γενική υγεία.

Σύμφωνα με τη μελέτη [4], το φως είναι το αρχικό ερέθισμα για την ρύθμιση του βιολογικού ρολογιού, το οποίο ρυθμίζει το καθημερινό σχέδιο του σώματος. Επομένως, η διαφορετική έκθεση σε φως έχει σημαντικότερες επιπτώσεις στο συγχρονισμό του βιολογικού ρολογιού.

Επιπλέον, έχει προταθεί ότι η έκθεση σε αυξημένο φως κατά είναι τη διάρκεια της νύχτας είναι ένας πιθανός λόγος για τα υψηλότερα ποσοστά καρκίνου στήθους και του ορθού, στον αναπτυγμένο κόσμο τις ημέρες μας [12]. Αυτό οφείλεται στην καταστολή της παραγωγής μελατονίνης, μιας ορμόνης που παράγεται κανονικά κατά τη διάρκεια των πρώτων πρωινών ωρών που υπάρχει σκοτάδι. Περισσότερες μελέτες θα αναφερθούν στην συνέχεια της πτυχιακής.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν πλέον διάφορες οργανώσεις που είναι ενεργές ως προς την εκπαίδευση και την συνειδητοποίηση της φωτορύπανσης με στόχο τη βελτίωση την ποιότητα του τεχνητού φωτισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Αυτές οι οργανώσεις συνεργάζονται στενά με κατασκευαστές τεχνητού φωτισμού και με επιστημονικούς φορείς τεχνολογίας φωτισμού, με απώτερο σκοπό την σχεδίαση και κατασκευή υψηλότερα αποδοτικών πηγών φωτισμού και την προώθηση καλύτερων πρακτικών και πολιτικών φωτισμού.



Κάποιες από αυτές είναι η International Dark-Sky Association (IDA) [13], η International Astronomical Union (IAU) Commission 50 [14] κ.α. Επιπρόσθετα, εκτός από τις προσπάθειες των διεθνών οργανισμών στην προώθηση της συνειδητοποίησης της φωτορύπανσης, διάφορες χώρες σε όλο τον κόσμο εκτελούν επίσης σχετικές εκπαιδευτικές, ερευνητικές και αναπτυξιακές προσπάθειες, οι οποίες θα εξεταστούν στην συνέχεια της πτυχιακής.

### **1.3 Δομή πτυχιακής**

Η παρούσα πτυχιακή ακολουθεί μία συστηματική και ολιστική προσέγγιση ως προς την παρουσίαση του προβλήματος της φωτορύπανσης, περιλαμβάνοντας μία μεθοδική επισκόπηση της έννοιας της, των επιδράσεων της, και των πρακτικών αντιμετώπισης της.

Συγκεκριμένα, η πτυχιακή δομείται από τα παρακάτω κεφάλαια:

**Κεφάλαιο 1:** Το κεφάλαιο 1 εισάγει τον αναγνώστη στην έννοια της φωτορύπανσης, δίνοντας μία συνοπτική παρουσίαση της έννοιας της, των σχετικών ιστορικών στοιχείων σχετικά με την ανακάλυψη της, και μία επισκόπηση της σπουδαιότητας των επιδράσεων της.

**Κεφάλαιο 2:** Το κεφάλαιο 2 περιέχει μια εισαγωγή στη λειτουργία του ανθρώπινου συστήματος όρασης, και αναφέρει περιεκτικά τα στοιχεία φωτομετρίας και ραδιομετρίας τα οποία είναι απαραίτητα για την κατανόηση των μεγεθών και μετρήσεων που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια. Περιγράφονται επίσης λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά των κύριων τεχνητών πηγών φωτός που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος.

**Κεφάλαιο 3:** Το κεφάλαιο 3 αναφέρει και επεξηγεί τα είδη φωτορύπανσης που έχουν παρατηρηθεί, και αναλύει τα σχετικά ζητήματα επιστήμης, οικολογίας, οικονομίας και υγείας που ανακύπτουν. Περιέχει επίσης μία εκτενή επισκόπηση των τρεχόντων δράσεων και πολιτικών αντιμετώπισης του φαινομένου της φωτορύπανσης σε παγκόσμιο επίπεδο.

**Κεφάλαιο 4:** Το κεφάλαιο 4 αναλύει τις διαθέσιμες τεχνικές μέτρησης δεδομένων φωτορύπανσης και τους τρόπους επεξεργασίας και μοντελοποίησης τους. Πολύ σημαντικά, αναφέρει τις έρευνες που έχουν διεξαχθεί πρόσφατα ανά τον κόσμο και τα αποτελέσματά τους, με στόχο να δώσει στον αναγνώστη μία κατατοπιστική επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης ως προς την φωτορύπανση παγκοσμίως.

**Κεφάλαιο 5:** Στο κεφάλαιο 5 αναφέρονται λεπτομερώς, συζητούνται και αναλύονται οι διάφορες επιδράσεις της φωτορύπανσης στην φυσιολογία και την υγεία των έμβιων οργανισμών. Επεξηγούνται τα αποτελέσματα πρόσφατων σχετικών ερευνών, και αναφέρονται οι τρέχουσες κατευθυντήριες γραμμές ως προς την αντιμετώπιση των βλαβερών συνεπειών της φωτορύπανσης.

**Κεφάλαιο 6:** Το κεφάλαιο αυτό κλείνει την πτυχιακή, δίνοντας συμπεράσματα και αναφέροντας μελλοντικές κατευθύνσεις σχετικής έρευνας και πολιτικής.

## **Κεφάλαιο 2: Φως και φωτομετρία**

### **2.1 Το ανθρώπινο σύστημα όρασης**

Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να δει το φως μόνο στο ορατό φάσμα και έχει διαφορετικές ευαισθησίες στο φως διαφορετικών μηκών κύματος.

Το ανθρώπινο μάτι αποτελείται από τρεις τύπους φωτοδεκτών:

- ραβδία αμφιβληστροειδούς,
- κωνία αμφιβληστροειδούς και
- φωτοευαίσθητα αμφιβληστροειδικά κύτταρα γαγγλίων (ipRGC) [15].

Τα ραβδία και τα κωνία είναι αρμόδια για τις οπτικές αντιδράσεις του αμφιβληστροειδούς στο φως ενώ τα ipRGCs καθορίζουν τους ανθρώπινους κυκλικούς ρυθμούς, στον εξωτερικό ελαφρύ/σκοτεινό κύκλο [16].

Το σύστημα των ραβδίων είναι εξειδικευμένο για την όραση σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού.

Όταν μόνο τα ραβδία είναι ενεργοποιημένα, η όραση αποκαλείται scotopic (σκοτοπτική). Με ενεργά μόνο τα κωνία, δεν είναι δυνατόν να αισθανθείς τις διαφορές των χρωμάτων, ούτε να γίνουν ακριβείς οπτικές διακρίσεις μεταξύ αντικειμένων.

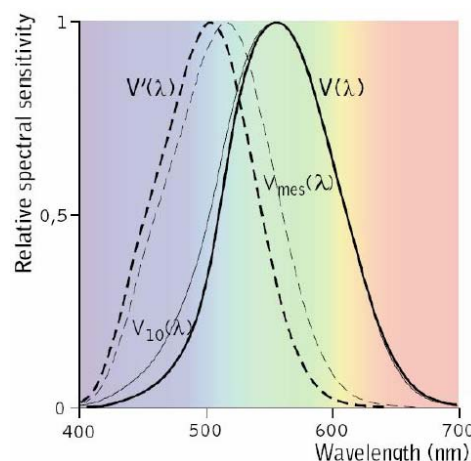
Το σύστημα των κωνίων έχει πολύ υψηλή χωρική ανάλυση (ανάλυση του χώρου), με μεγάλη ευαισθησία στην αντίληψη των χρωμάτων. Σε επίπεδο φωτισμού όμοιο με αυτό των αστεριών (αστροφεγγιά), τα κωνία μόλις αρχίζουν να συμβάλλουν στην όραση.

Η συμβολή των κωνίων στην όραση γίνεται όλο και πιο σημαντική, καθώς τα επίπεδα φωτισμού αυξάνονται.

Σε πολύ υψηλά επίπεδα φωτισμού, όπως στο φως του ήλιου, μόνο τα κωνία είναι ενεργά ενώ τα ραβδία είναι σχεδόν απενεργοποιημένα [17]. Αυτή η όραση αποκαλείται photopic (φωτοπική).

Η όραση μεταξύ της scotopic και της photopic αποκαλείται mesopic (μεσοπική όραση), η οποία χαρακτηρίζεται από τη συμβολή τόσο των ραβδίων όσο και των κωνίων.

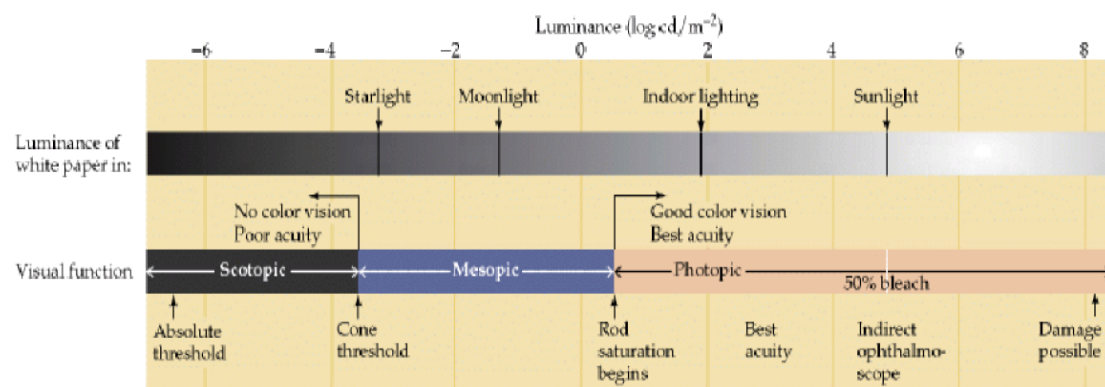
Το κατ' εκτίμηση ανώτερο όριο της φωτεινότητας για την μεσοπική (mesopic) όραση είναι 310 cd/m<sup>2</sup> [18]. Η εικόνα 2.1 παρουσιάζει το ακριβές φάσμα της ανθρώπινης όρασης, υπό διαφορετικές καταστάσεις φωτισμού [19].



**Εικόνα 2.1:** Λειτουργικές ευαισθησίες του ματιού στο φάσμα. Στην φωτοπική όραση, όταν τα κωνία είναι ενεργά, η ευαισθησία του ματιού ακολουθεί την συνάρτηση  $V(\lambda)$  με ένα μέγιστο μήκος κύματος 555nm. Σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού, μόνο τα

ραβδία είναι ενεργά και η φασματική ευαισθησία ακολουθεί την συνάρτηση  $V'(\lambda)$ , με ένα μέγιστο μήκος κύματος 505nm. Το  $V_{mes}(\lambda)$  είναι ένα παράδειγμα της πιθανής μεσοπικής (mesopic) φασματικής ευαισθησίας, καθώς δεν υπάρχει οριστική συνάρτηση για αυτήν ακόμα. Η συνάρτηση  $V_{10}(\lambda)$  είναι η φωτοπική φασματική ευαισθησία, για κάθε μεγάλο στόχο [19].

Η εικόνα 2.2 παρουσιάζει μια εκτίμηση της διαφορετικής λειτουργίας της όρασης, στη λογαριθμική κλίμακα της φωτεινότητας.



**Εικόνα 2.2:** Το φάσμα των τιμών φωτεινότητας, πέρα από το οποίο το σύστημα της όρασης λειτουργεί. Στα χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού, μόνο τα ραβδία είναι ενεργοποιημένα. Τα κωνία αρχίζουν να συμβάλλουν στην αντίληψη της όρασης στο επίπεδο τους φωτός της αστροφεγγιάς (φως αστεριών) και είναι οι μόνοι δέκτες που λειτουργούν, σε καταστάσεις μεγάλης φωτεινότητας [15].

## **2.2 Στοιχεία φωτομετρίας και νόμοι**

Η φωτομετρία είναι η μέτρηση της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε μονάδες όπως οι μονάδες lumen/lux/κλπ., ή η μέτρηση της λαμπρότητας. Η μέτρηση πραγματοποιείται με ένα όργανο με περιορισμένη και προσεκτικά βαθμολογημένη φασματική απόκριση.

Οι μονάδες μέτρησης lux/lumen/κλπ χρησιμοποιούν την τυποποιημένη καμπύλη απόκρισης του ματιού, ενώ η αστρονομική φωτομετρία χρησιμοποιεί φίλτρα, με τυποποιημένες καμπύλες φασματικής απόκρισης, π.χ. UBVRI [20,21].

### **2.2.1 Φωτεινή ένταση**

Στη φωτομετρία, η φωτεινή ένταση είναι το μέτρο της πυκνότητας της φωτεινής ισχύος που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός προς μια κατεύθυνση, βασισμένη στη φωτοπική φασματική καμπύλη ευαισθησίας  $V(\lambda)$ , ένα τυποποιημένο πρότυπο της ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού.

Η μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης στο σύστημα SI είναι η καντέλα (cd). Μια καντέλα ορίζεται ως η φωτεινή ένταση μιας μονοχρωματικής πηγής φωτός 540 THz, που έχει ακτινοβολία ένταση το  $1/683$  Watt ανά στερακτίνο ή περίπου 1.464 mW/sr.

Η συχνότητα των 540 THz αντιστοιχεί σε ένα μήκος κύματος περίπου 555 nm, το οποίο είναι πράσινο φως κοντά στο μέγιστο της απόκρισης του ματιού. Δεδομένου ότι υπάρχουν περίπου 12.6 στερακτίνα σε μια σφαίρα, η συνολική ακτινοβολία ένταση θα ήταν περίπου 18.40 mW, εάν η πηγή εκπέμπει φως ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Ένα τυπικό κερί παράγει κατά προσέγγιση μια καντέλα φωτεινής έντασης [22].

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

Όπου

$I$  = Φωτεινή ένταση [cd]

$\Phi$  = Φωτεινή Ροή (ή Ισχύς) [lm]

$\omega$  = Στερεά γωνία του ακτινοβολούντος φωτός [sr] [sterad]

### 2.2.2 Φωτεινή ροή

Στη φωτομετρία, φωτεινή ροή ή φωτεινή Ισχύς είναι το μέτρο της προσπίπτουσας ισχύος του φωτός. Διαφέρει από την εκπεμπόμενη ροή, το μέτρο δηλ. της συνολικής ισχύος του εκπεμπόμενου φωτός, στο ότι η φωτεινή ροή αντιπροσωπεύει την ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού στην προσπίπτουσα ισχύ του φωτός.

Η μονάδα μέτρησης της φωτεινής ροής στο σύστημα SI είναι το lumen (lm). Ένα lumen ορίζεται ως η φωτεινή ροή του φωτός που παράγεται από μια πηγή που εκπέμπει μια καντέλα φωτεινής έντασης πάνω από μια στερεά γωνία ενός στερακτινίου (sterad). Σε άλλα συστήματα μονάδων μέτρησης, η φωτεινή ροή μπορεί να έχει μονάδες της ισχύος.

Η φωτεινή ροή χρησιμοποιείται συχνά ως ένα αντικειμενικό μέτρο της χρήσιμης ισχύος που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός. Η φωτεινή ροή μπορεί να υπολογιστεί από την ακτινοβολούμενη ισχύ (σε Watts) με τον παρακάτω τύπο:



$$\Phi = K_m \cdot \int_{380nm}^{770nm} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Όπου

$\Phi$  = Φωτεινή Ροή (ή Ισχύς) [lm]

$K_m$  = 0,683 lm/Watt

$\Phi_{e,\lambda}$  = Ακτινοβολούμενη ισχύς [Watts]

$V(\lambda)$  = καμπύλη ευαισθησίας φάσματος για τη φωτοπική όραση (εικόνα 2.1),  
«συνάρτηση φωτεινής επάρκειας»

### 2.2.3 Φωτισμός (Illuminance)

Στη φωτομετρία, ο φωτισμός προδιαγράφεται σαν την ποσότητα του φωτός που φωτίζει μια επιφάνεια.

Η βασική μονάδα μέτρησης είναι το lux. Μια επιφάνεια έχει φωτισμό 1 lux όταν λαμβάνει 1 lumen φωτεινή ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας.

Θεωρείστε μια μικρή επιφάνεια ενός κομματιού ταινίας που είναι 1 mm<sup>2</sup>. Για φως με μήκος κύματος 540 nm, υπάρχουν 3,8 x 10<sup>15</sup> φωτόνια ανά δευτερόλεπτο ανά μονάδα lumen. Ένας φωτισμός στην ταινία 1 lux θα ήταν ισοδύναμος με 3,8 x 10<sup>2</sup> φωτόνια ανά δευτερόλεπτο, σε μια επιφάνεια 1 mm<sup>2</sup>.

Η συνολική έκθεση φωτός στην ταινία βρίσκεται με τον πολλαπλασιασμό του φωτισμού (σε lux) με το χρόνο έκθεσης (σε δευτερόλεπτα) και εκφράζεται σε μονάδες luxseconds [24].

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{L_{\pi}}{\rho} = \frac{I}{d^2} \cdot sr$$

Όπου

$E$  = Φωτισμός [lx]

$\Phi$  = Φωτεινή Ροή (ή Ισχύς) [lm]

$A$  = Εμβαδόν της επιφάνειας [m<sup>2</sup>]

$L_{\pi}$  = Λαμπρότητα [cd/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = συντελεστής ανακλαστικότητας της επιφάνειας [%]

$I$  = Φωτεινή ένταση [cd]

$d$  = Απόσταση μεταξύ της πηγής του φωτός και της επιφάνειας

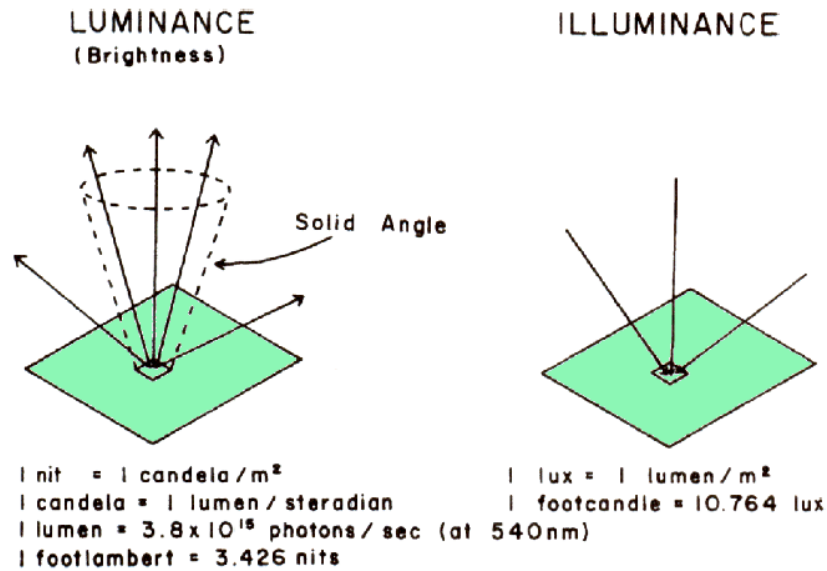
## 2.2.4 Λαμπρότητα (Luminance)

Στη φωτομετρία, η Λαμπρότητα (συνχά αποκαλούμενη και ως φωτεινότητα) περιγράφει την ποσότητα του φωτός που εκπέμπεται από την επιφάνεια της πηγής φωτός.

Η βασική μονάδα μέτρησης της Λαμπρότητας (ή φωτεινότητας) είναι η καντέλα ανά τετραγωνικό μέτρο της περιοχής πηγής.

Ένας άλλος παράγοντας που καθορίζει την Λαμπρότητα είναι η συγκέντρωση του φωτός σε μια δεδομένη κατεύθυνση. Αυτό μπορεί να περιγραφεί σε έναν κώνο ή μια στερεά γωνία που μετριέται σε μονάδες των στερακτινίων (sr) [24].

Μερικές φορές η μονάδα μέτρησης stilb [sb] χρησιμοποιείται για την μέτρηση της Λαμπρότητας, όπου ένα stilb είναι ισοδύναμο με  $10.000 \text{ cd/m}^2$ .



**Εικόνα 2.3:** Απεικόνιση της Λαμπρότητας και του φωτισμού [24].

$$L = \frac{I_{\theta}}{A \cdot \cos(\theta)} = \frac{\rho \cdot E}{\pi}$$

Όπου

L = Λαμπρότητα [cd/m<sup>2</sup>]

I<sub>θ</sub> = Φωτεινή ένταση σε γωνία θ από την επιφάνεια [cd]

A = Εμβαδόν της επιφάνειας [m<sup>2</sup>]

θ = Η γωνία μεταξύ της επιφάνειας και την κατεύθυνσης του φωτός

ρ = συντελεστής ανακλαστικότητας της επιφάνειας [%]

E = Φωτισμός [lx]

### 2.2.5 Φωτεινή απόδοση

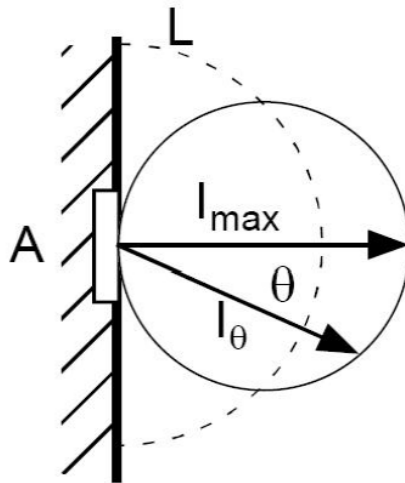
Η φωτεινή απόδοση είναι ένα χαρακτηριστικό των πηγών φωτός, το οποίο προσδιορίζει την αναλογία της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που είναι χρήσιμη για την ανθρώπινη όραση. Είναι ο λόγος της εκπεμπόμενης φωτεινής ροής προς την ακτινοβολούμενη ροή.

Η φωτεινή απόδοση συσχετίζεται με τη συνολική απόδοση μιας πηγής φωτός, αλλά η συνολική απόδοση μιας πηγής φωτός εξαρτάται επίσης από το ποσό της ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα (είτε στο ορατό φάσμα είτε όχι).

Στο σύστημα μέτρησης SI, η φωτεινή απόδοση έχει μονάδες μέτρησης το lumen ανά Watt ( $\text{lm/W}$ ). Η φωτοπική φωτεινή απόδοση έχει πιθανή μέγιστη τιμή  $683 \text{ lm/W}$ , για την περίπτωση του μονοχρωματικού φωτός, σε μήκος κύματος  $555 \text{ nm}$ . Η σκοτοπική φωτεινή απόδοση φθάνει σε μέγιστο  $1700 \text{ lm/W}$  για το περιορισμένης ζώνης φως, μήκους κύματος  $507 \text{ nm}$  [25].

### 2.2.6 Ο νόμος του Lambert

Ένας Lambertian εκπομπός είναι μια πηγή φωτός που είναι σύμφωνη με το νόμο του Lambert, ο οποίος αναφέρει ότι η λαμπρότητα μιας επιφάνειας είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση. Η λαμπρότητα της επιφάνειας μπορεί να εκφραστεί σε καντέλες ανά τετραγωνικό μέτρο προβολής (εικόνα 2.4 [26], δηλ. ανά τετραγωνικών μέτρο επιφάνειας κάθετο στην κατεύθυνση του φωτός).



**Εικόνα 2.4:** Κατανομή της φωτεινής έντασης ( $I$ ) και της Λαμπρότητας ( $L$ ) σε μια επιφάνεια Lambertian [26].

Η λαμπρότητα μιας επίπεδης πηγής φωτός Lambertian (σε καντέλες) είναι:

$$I_{\max} = L \cdot A = \frac{I_{\theta}}{\cos(\theta)}$$

Όπου

$I_{\max}$  = Μέγιστη φωτεινή ένταση [cd]

$L$  = Λαμπρότητα [cd/m<sup>2</sup>]

$I_{\theta}$  = Φωτεινή ένταση σε γωνία  $\theta$  από την επιφάνεια [cd]

$A$  = Εμβαδόν της επιφάνειας Lambert [m<sup>2</sup>]

$\theta$  = Η γωνία μεταξύ της επιφάνειας και την κατεύθυνσης του φωτός

## **2.3 Ραδιομετρικά μεγέθη**

Η ραδιομετρία είναι η μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με συχνότητες μεταξύ  $3 \times 10^{11}$  και  $3 \times 10^{16}$  Hz. Το φάσμα αυτό αντιστοιχεί σε μήκη κύματος μεταξύ 0.01 και 1000 μικρόμετρων ( $\mu\text{m}$ ), και περιλαμβάνει το υπεριώδες, το ορατό και το υπέρυθρο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η μόνη πραγματική διαφορά μεταξύ της ραδιομετρίας και της φωτομετρίας που αναφέρθηκε παραπάνω, είναι ότι η ραδιομετρία περιλαμβάνει ολόκληρο το οπτικό φάσμα ακτινοβολίας, ενώ η φωτομετρία περιορίζεται στο ορατό φάσμα όπως αυτό καθορίζεται από την απόκριση του ματιού.

### **2.3.1 Ακτινοβόλος ισχύς**

Η ακτινοβόλος ισχύς (ή απλά η ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας) είναι η παράγωγος της εκπεμπόμενης ακτινοβολητικής ενέργειας με το χρόνο ( $dE/dt$ ) μετριέται σε Watt (W). Χρησιμοποιείται κυρίως για πηγές συνεχούς ακτινοβολίας και όχι παλμικές.

### **2.3.2 Επιφανειακή ακτινοβόλος ισχύς**

Η επιφανειακή ακτινοβόλος ισχύς είναι ουσιαστικά η επιφανειακή πυκνότητα της ακτινοβόλου ισχύος και ως εκ τούτου μετριέται σε  $\text{W}/\text{m}^2$ . Είναι το αντίστοιχο ραδιομετρικό μέγεθος του Φωτισμού (illuminance) στη φωτομετρία, που αναφέρθηκε παραπάνω.

Αν μία σημειακή πηγή ακτινοβολεί ομογενώς σε όλες τις διευθύνσεις και δεν υπάρχει απορρόφηση, τότε η επιφανειακή ακτινοβολία ισχύς μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή.

Τέλος είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η ακτινοβολία ισχύς δεν ταυτίζεται με την απορροφούμενη ισχύ, καθότι φωτόνια διαφορετικού μήκους κύματος απορροφούνται με διαφορετικούς συντελεστές. Για παράδειγμα φωτόνια διαφορετικού μήκους κύματος αλλά με ίδια συνολική ισχύ προκαλούν διαφορετικά επίπεδα φωτοσύνθεσης στα φυτά.

## **2.4 Τεχνητές πηγές φωτός και τύποι λαμπτήρων**

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται στον εξωτερικό φωτισμό. Κάθε τύπος είναι κατάλληλος για τις αντίστοιχες εφαρμογές.

Οι μηχανικοί που κάνουν Φωτομετρικές Αναλύσεις και Μελέτες Φωτισμού πρέπει να αξιολογήσουν πολλούς παράγοντες, κατά την διαδικασία της επιλογής των κατάλληλων λαμπτήρων, όπως

- τα εκτιμώμενα αποτελέσματα φωτεινότητας κάθε λαμπτήρα,
- την γήρανση του κάθε λαμπτήρα (το πώς δηλαδή μειώνεται η απόδοση της φωτεινής ροής του λαμπτήρα με το χρόνο),
- την απόδοση του λαμπτήρα,
- το κόστος τους,
- το χρόνο ζωής τους,
- το χρώμα τους,
- το μέγεθός τους,
- τα χαρακτηριστικά εκκίνησής τους,
- περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως τα επικίνδυνα υλικά και τέλος

- τη διαθεσιμότητα των εξαρτημάτων τους [27].

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο κοινοί τύποι λαμπτήρων (απεικονίζονται στην εικόνα 2.5) που χρησιμοποιούνται στον εξωτερικό φωτισμό και αναλύονται οι βασικές τεχνικές προδιαγραφές τους.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων λαμπτήρων, όσον αφορά την φωτορύπανση, αναλύονται σε επόμενα κεφάλαια. Οι νεώτερες τεχνολογίες φωτισμού, όπως οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LEDs), οι επαγωγικοί λαμπτήρες και άλλοι, δεν αναφέρονται.



**Εικόνα 2.5:** Παραδείγματα διαφορετικών τύπων λαμπτήρων: a) παραδοσιακός λαμπτήρας πυρακτώσεως, b) λαμπτήρας ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης, c) λαμπτήρας μετάλλων αλογόνων (MH) d) λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης (HPS), e) λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσεως (LPS) [28].

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως είναι οι πιο συνηθισμένοι λαμπτήρες για οικιακή χρήση, τόσο για εσωτερικό όσο και για εξωτερικό φωτισμό. Το φως παράγεται από την ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα νήμα βολφραμίου που βρίσκεται εντός του λαμπτήρα, σε κενό.



Τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων πυρακτώσεως είναι το χαμηλό κόστος αγοράς, τόσο για τους λαμπτήρες όσο και για τα φωτιστικά σώματα, η μεγάλη διαθεσιμότητα, η ευρεία ποικιλία τόσο σε λαμπτήρες όσο και σε φωτιστικά, η έλλειψη περιόδου προθέρμανσης κατά την εκκίνηση του λαμπτήρα και τέλος η έλλειψη επιβλαβών αποβλήτων.

Τα μειονεκτήματα των λαμπτήρων πυρακτώσεως είναι η μικρή διάρκεια ζωής (οι περισσότεροι έχουν διάρκεια ζωής λιγότερο από μερικές χιλιάδες ώρες), η χαμηλή απόδοση (περίπου 8-20 lumens/watt) με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος ενεργειακής χρήσης και το κόστος του κύκλου ζωής, η έλξη των εντόμων και τέλος η υψηλή παραγωγή θερμότητας. Γενικά η χρήση των λαμπτήρων πυρακτώσεως πρέπει να αποφεύγεται [27].

Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι επίσης πολύ συνηθισμένοι για χρήση οικιακού φωτισμού, αλλά κυριαρχούν σε χρήσεις φωτισμού γραφείων ενώ περιστασιακά συναντιούνται σε εξωτερικές εγκαταστάσεις φωτισμού, συνήθως όμως σε μικρές ή παλαιότερες εγκαταστάσεις. Το φως παράγεται από την φθορίζουσα επικάλυψη που υπάρχει στο εσωτερικό του λαμπτήρα και που ενεργοποιούνται από την υπεριώδη ακτινοβολία που παράγεται από ένα ηλεκτρικό τόξο, μέσω χαμηλής πίεσεως (περίπου 2/1000 ατμοσφαιρική πίεση) και μίγματος αερίων, συμπεριλαμβανομένου ατμού υδραργύρου.

Τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων φθορισμού περιλαμβάνουν τη χαμηλή αρχική δαπάνη τόσο για τους λαμπτήρες όσο και για τα φωτιστικά συγκρινόμενα με τους άλλους τύπους λαμπτήρων, την υψηλή απόδοση σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως (40-70 lumen/Watt κατά μέση τιμή), την εκκίνηση χωρίς περίοδο προθέρμανσης, την καλή απόδοση χρώματος και την μακρά διάρκεια ζωής (10.000, 20.000 ώρες).

Τα μειονεκτήματα των λαμπτήρων φθορισμού περιλαμβάνουν τις υψηλότερες αρχικές δαπάνες έναντι των λαμπτήρων πυρακτώσεως, το μεγάλο μέγεθος των λαμπτήρων, τη χαμηλή απόδοση (σε σχέση με τους άλλους τύπους λαμπτήρες παρακάτω), την έλξη των εντόμων και τέλος τα επικίνδυνα απόβλητα υδραργύρου [27]. Σημαντικό μειονέκτημα των λαμπτήρων φθορισμού είναι η κακή απόδοσή τους

στα κρύα κλίματα, όπως στο Σκανδιναβικό χειμώνα, που ουσιαστικά περιορίζει τη χρήση τους στον εξωτερικό φωτισμό.

Οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου (ή αλλιώς λαμπτήρες υψηλής πίεσεως υδραργύρου) ήταν οι πρώτοι ευρέως χρησιμοποιούμενοι λαμπτήρες μεγάλης έντασης. Το φως παράγεται κατά τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου, μέσα σε ένα μικρό σωλήνα γεμάτο με ατμούς υδραργύρου σε υψηλή πίεση (24 ατμόσφαιρες).

Αν και είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί και με μεγάλους χρόνους ζωής σε σχέση με τους λαμπτήρες τεχνολογίας πυρακτώσεως, έχουν πολλά μειονεκτήματα σε σχέση με άλλες πηγές φωτισμού, όπως τη χαμηλή φωτεινή απόδοση, τη φτωχή απόδοση χρώματος και την υψηλή παραγωγή υπερϊώδους ακτινοβολίας. Οι λαμπτήρες ατμού υδραργύρου έχουν σχεδόν πλήρως αντικατασταθεί στις νέες εφαρμογές από τους πιο αποδοτικούς λαμπτήρες μετάλλων αλογόνου και τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης.

Ένα ασυνήθιστο χαρακτηριστικό αυτών των λαμπτήρων είναι ότι σπάνια «καίγονται», αντί αυτού όμως εξασθενούν σε όλο και χαμηλότερη απόδοση κατά τη διάρκεια των ετών ή ακόμα και των δεκαετιών, ενώ καταναλώνουν ποσό ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με αυτό που καταναλώναν αρχικά [27].

Οι λαμπτήρες μετάλλων αλογόνου είναι παρόμοιοι με τους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου αλλά με επιπλέον την προσθήκη μικρών ποσοτήτων μετάλλων αλογόνου, όπως scandium, sodium, dysprosium, holmium και thulium iodide (σκάνδιου, νατρίου, dysprosium, όλμιου και θούλιου). Το φως παράγεται όπως και στο λαμπτήρα ατμών υδραργύρου, από τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μέσα σε ένα μικρό σωλήνα που είναι γεμάτος με ατμούς αλογόνου και μέταλλου υδραργύρου, σε ατμοσφαιρική πίεση 24 ατμοσφαιρών.

Οι πολλές διαφορετικές ποικιλίες των λαμπτήρων μετάλλων αλογόνου δίνουν μια ευρεία γκάμα λαμπτήρων με ελαφρώς διαφορετικά χαρακτηριστικά χρώματος, αν και σε γενικές γραμμές είναι άσπροι ή άσπρο-μπλε. Η τεχνολογία εξελίσσεται καθημερινά και νέοι τύποι λαμπτήρων μετάλλων αλογόνου εμφανίζονται τακτικά. Εκτός από μια σχετικά απότομη κάμψη στην ένταση του φωτός με το πέρασμα του

χρόνου (σε σχέση π.χ. με τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης), πολλοί λαμπτήρες μετάλλων αλογόνου αλλάζουν και το χρώμα τους, με το πέρασμα του χρόνου. Οι λαμπτήρες μετάλλων αλογόνου χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στον εξωτερικό φωτισμό καταστημάτων, όπου το άσπρο φως με την καλή απόδοση χρώματος απαιτείται όπως π.χ. τα καταστήματα εμπορίας αυτοκινήτων και τους θόλους πρατηρίων βενζίνης.

Τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων μετάλλων αλογόνου περιλαμβάνουν την υψηλή φωτεινότητα (3500 170.000 lumen κατά μέση τιμή), την υψηλή απόδοσή τους έναντι των λαμπτήρων πυρακτώσεως και αυτών του ατμού υδραργύρου (μέσος όρος 45 με 90 lumen/Watt) και την καλή απόδοσης χρώματος.

Τα μειονεκτήματα των λαμπτήρων μετάλλων αλογόνου περιλαμβάνουν την γενικότερη χαμηλή διατήρηση της φωτεινής απόδοσης σε σχέση με τους λαμπτήρες χαμηλής και υψηλής πίεσεως νατρίου, την μικρότερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τους λαμπτήρες υψηλής πίεσεως νατρίου, τις συχνές αλλαγές στο χρώμα, την παραγωγή υπεριώδους ακτινοβολίας, αν δεν υπάρχουν επαρκή φίλτρα και τέλος τα επικίνδυνα απόβλητα υδραργύρου [27].

Οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιημένοι λαμπτήρες για φωτισμό οδοστρώματος και χώρων στάθμευσης, αν και σε κάποιες περιπτώσεις οι λαμπτήρες μετάλλων αλογόνου είναι δημοφιλέστεροι. Το φως παράγεται κατά την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μέσα σε ένα μικρό σωλήνα γεμάτο με ατμό νατρίου, σε περίπου 1/4 ατμοσφαιρικής πίεσης, ενώ απαιτείται ένα ballast και επιπλέον μια προθέρμανση περίπου 10 λεπτών για να φτάσουν το μέγιστο της απόδοσης.

Τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης περιλαμβάνουν μακροχρόνια διάρκεια ζωής, την ευρεία γκάμα φωτεινών λαμπτήρων απόδοσης (2000 120.000 lumen κατά μέση τιμή), την υψηλή απόδοση και την καλή διατήρηση της φωτεινής έντασης, έναντι όλων των υπολοίπων τύπων λαμπτήρων ( εκτός από τους λαμπτήρες χαμηλής πίεσεως νατρίου), τη μικρή μείωση της απόδοσης του χρώματος σε σχέση με τους λαμπτήρες χαμηλής πίεσεως νατρίου και τέλος τη μεγάλη διαθεσιμότητα τόσο των λαμπτήρων όσο και των φωτιστικών συσκευών.

Τα μειονεκτήματα των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης περιλαμβάνουν τη χειρότερη απόδοση του χρώματος σε σχέση με τους λαμπτήρες μετάλλων αλογόνου, την χειρότερη διατήρηση της απόδοσης σε σχέση με τους λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης και τέλος την δημιουργία επικίνδυνων αποβλήτων υδραργύρου [27].

Οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ευρώπη και σε μερικές Αμερικανικές πόλεις, ιδιαίτερα σε εκείνες που βρίσκονται κοντά σε ερευνητικές αστρονομικές εγκαταστάσεις και σε εκείνες που ενδιαφέρονται ιδιαίτερα για τα ενεργειακά ζητήματα και τους δημοτικούς ηλεκτρικούς λογαριασμούς. Το φως παράγεται από τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μέσα σε ένα σωλήνα γεμάτο με ατμό νατρίου σε περίπου 6 εκατομμυριοστά της ατμοσφαιρικής πίεσης. Ένα ballast απαιτείται και επιπλέον 7-15 λεπτά για να φθάσουν σε πλήρη απόδοση. Το φως που παράγεται από τους λαμπτήρες LPS είναι σχεδόν μονοχρωματικό σε μήκος κύματος κοντά σε 589 nm. Αν και το μάτι είναι πολύ ευαίσθητο σε αυτό το μήκος κύματος (που οδηγεί στην υψηλή απόδοση των λαμπτήρων LPS), δεν μπορεί να διακρίνει τα χρώματα, όταν το LPS φως είναι η μόνη διαθέσιμη πηγή φωτός. Ο φωτισμός νατρίου χαμηλής πίεσης προτιμάται εκεί που η κατανάλωση ενέργειας και οι δαπάνες για αυτήν είναι μια σημαντική παράμετρος, ενώ ταυτόχρονα η λεπτομερή διάκριση χρώματος είτε δεν απαιτείται, είτε παρέχεται από άλλο φωτισμό.

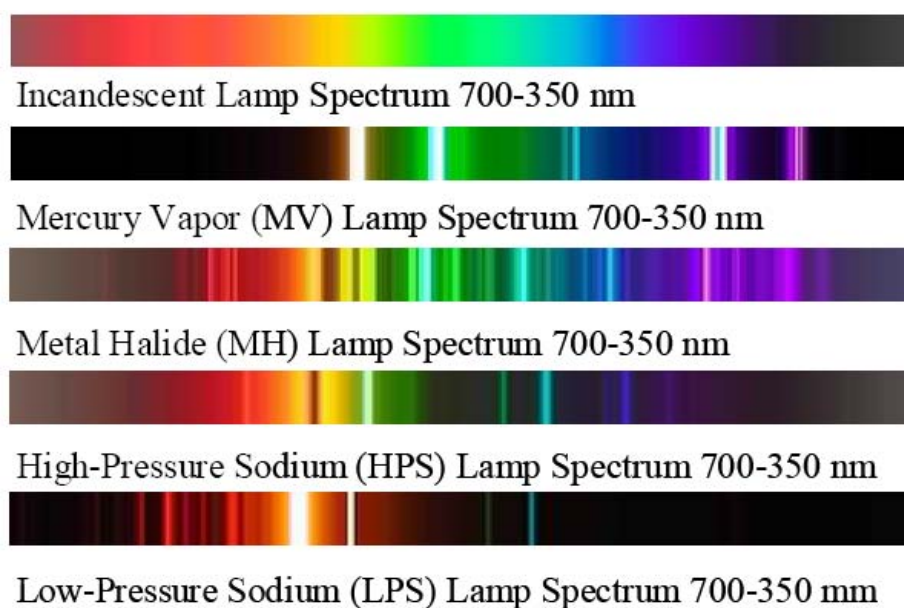
Τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης περιλαμβάνουν την υψηλή φωτεινή απόδοση και τη χαμηλή ενεργειακή χρήση, την καλή ορατότητα και τη χαμηλή διάχυση του φωτός, την ελάχιστη επιρροή στα έντομα και στην υπόλοιπη φύση και τέλος στην έλλειψη επικίνδυνων αποβλήτων υδραργύρου.

Τα μειονεκτήματα των λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης περιλαμβάνουν την έλλειψη απόδοσης χρώματος, την πιο σύντομη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων και το υψηλό κόστος αντικατάστασης αυτών σε σχέση με τους λαμπτήρες HPS και τέλος το μεγάλο μέγεθος των λαμπτήρων, για λαμπτήρες μεγάλης απόδοσης [27].

Ο φωτισμός με λαμπτήρες «νέου» ή λαμπτήρες «φωτεινών σωλήνων» είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για πολλές πηγές φωτός γυάλινων σωλήνων μικρής διαμέτρου,

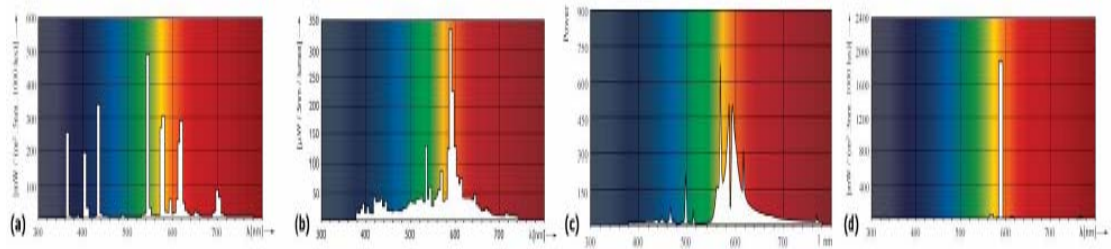
που κυρίως χρησιμοποιούνται για διακοσμητικούς λόγους και για λόγους σηματοδότησης. Το φως παράγεται από τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του αερίου, παράγοντας φως με ένα χρώμα ή ένα φάσμα, χαρακτηριστικό του αερίου ή των αερίων καθώς και του οποιοδήποτε επιστρώματος φωσφόρων υπάρχει μέσα στο σωλήνα. Δεδομένου ότι ο φωτισμός τύπου σωλήνων χρησιμοποιείται για εφαρμογές που εκμεταλλεύονται την ευελιξία της μορφής χρώματος, σε τεχνολογικές εφαρμογές και όχι για εφαρμογές φωτισμού περιοχών, δεν είναι απαραίτητο να συγκριθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του, με τις πηγές φωτισμού που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Αλλά, τέτοιος φωτισμός μπορεί να φέρει σημαντικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπως στην αρχιτεκτονική χώρων και δεν πρέπει να αγνοηθεί στους τύπους φωτισμού [27].

Στις εικόνες 2.6 και 2.7 απεικονίζεται η σύγκριση των φασματικών ιδιοτήτων των πιο κοινών τύπων λαμπτήρων [28].



**Εικόνα 2.6:** Παραδείγματα φάσματος διαφορετικών πηγών φωτός

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα φάσματα των λαμπτήρων τύπου φθορισμού (που δεν παρουσιάζεται στις εικόνες) και των λαμπτήρων μετάλλων αλογόνου μπορούν να διαφέρουν πολύ, ανάλογα με το μίγμα διαφορετικών υλικών φθορισμού.



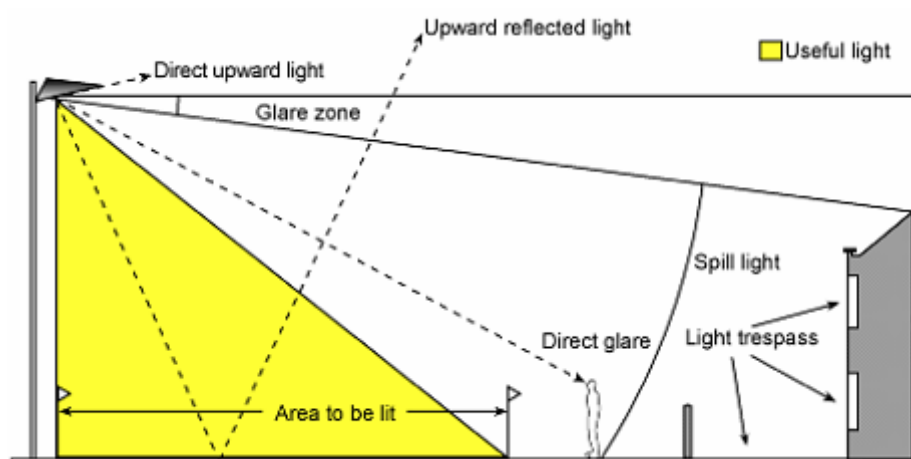
**Εικόνα 2.7:** Παραδείγματα της κατανομής φασματικής ισχύος (SPD) διαφορετικών τύπων λαμπτήρων: (a) λαμπτήρας ατμού υδραργύρου υψηλής πίεσης, (b) λαμπτήρας μετάλλων αλογόνου (MH), (c) λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης (HPS), (d) λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσεως (LPS) [28].

## Κεφάλαιο 3: Είδη φωτορύπανσης και δράσεις αντιμετώπισης

### 3.1 Είδη φωτορύπανσης

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας, η φωτορύπανση είναι μια ανεπιθύμητη συνέπεια λόγω υπέρμετρου υπαίθριου φωτισμού που έχει αποτελέσματα την ουράνια λάμψη, την θάμβωση, το οχληρό φως κ.α.

Για παράδειγμα, μια απεικόνιση του χρήσιμου φωτός αλλά και της φωτορύπανσης που παράγεται από μία κοινή πηγή φωτός φαίνεται στην εικόνα 3.1:



Εικόνα 3.1: Χρήσιμο φως και φωτορύπανση από μία κοινή πηγή φωτός [29].

Η φωτορύπανση μπορεί να διαιρεθεί σε δύο βασικές κατηγορίες, σε «αστρονομική φωτορύπανση» και «οικολογική φωτορύπανση».

- Η αστρονομική φωτορύπανση αναφέρεται στην αύξηση της λαμπρότητας του ουρανού, με άμεσο αποτέλεσμα η φωτεινότητα καθώς και η διακριτική ικανότητα των αστεριών και των υπόλοιπων ουράνιων σωμάτων να μειώνεται (εξαιτίας του γήινου φωτός που κατευθύνεται προς τον ουρανό).
- Η οικολογική φωτορύπανση αναφέρεται στο τεχνητό φως που προκαλεί τη φυσική εναλλαγή φωτός και σκοταδιού, με σοβαρές επιπτώσεις στην οικολογία (φυτά, ζώα και άνθρωποι).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η φωτορύπανση δεν έχει μόνο αστρονομικές και οικολογικές επιπτώσεις αλλά επιπλέον τίθενται θέματα ενέργειας και βιώσιμης ανάπτυξης.

Σε έρευνες που έχουν γίνει, έχει διαπιστωθεί ότι εξαιτίας της σπαταλιούνται τεράστια ποσά ενέργειας, όπως π.χ. στο τέλος της δεκαετίας του '90 το ποσό της φωτεινότητας του ουρανού αντιστοιχούσε σε 15 εκατομμύρια KWh πάνω από το Σαπόρο της Ιαπωνίας, 29 εκατομμύρια KWh πάνω από το Λονδίνο και 38 εκατομμύρια KWh πάνω από το Παρίσι [30].

Βάσει ερευνών, το ποσό ενέργειας που χρησιμοποιείτε για το δημόσιο υπαίθριο φωτισμό στο Ελσίνκι της Φινλανδίας είναι 170 εκατομμύρια KWh [31]. Έτσι, ολόκληρο το Ελσίνκι θα μπορούσε να φωτιστεί με το «απόβλητο» φως του Παρισιού για πάνω από 5 ημέρες.

Γενικότερα το φως που κατευθύνεται προς τον ουρανό υπολογίζεται ότι κοστίζει δισεκατομμύρια ευρώ κάθε έτος [32]. Η σπαταλούμενη αυτή ενέργεια σημαίνει μεγαλύτερες εκπομπές του CO<sub>2</sub>.



Η Philips έχει υπολογίσει πως με αντικατάσταση των παλαιών λαμπτήρων ατμού υδραργύρου με λαμπτήρες σύγχρονης τεχνολογίας φωτισμού θα μπορούσε να υπάρξει μείωση στις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 3.5 εκατομμύρια τόνους κάθε έτος.

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύονται τα είδη της φωτορύπανσης και δίνεται μία συνοπτική επισκόπηση της υπάρχουσας σχετικής νομοθεσίας.

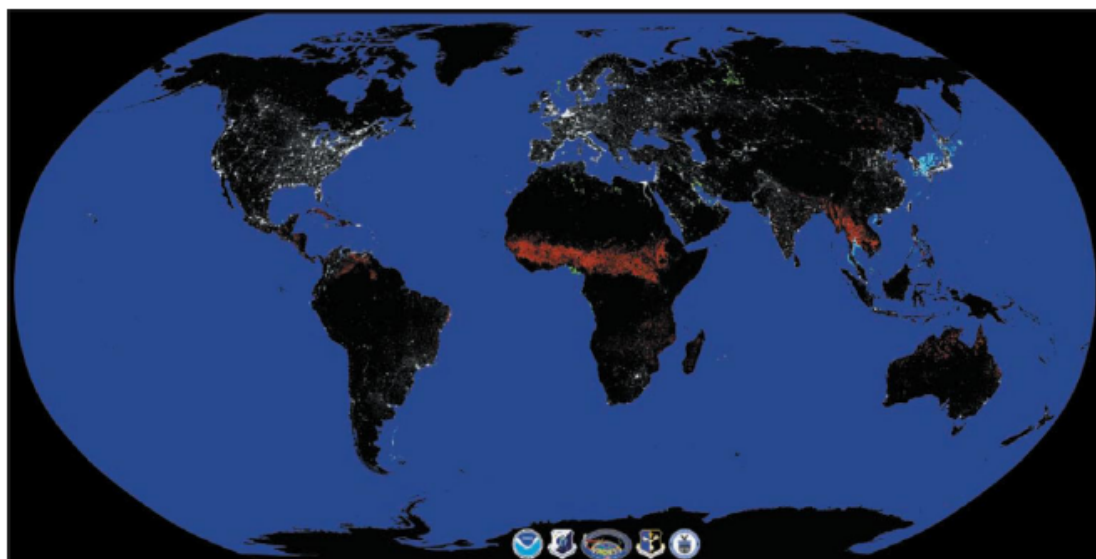
### 3.2 Ζητήματα φωτορύπανσης στην επιστήμη

Η αστρονομική φωτορύπανση χαρακτηρίζεται από την φωτεινότητα του ουρανού και τη μειωμένη δυνατότητα να παρατηρηθούν τα ουράνια αντικείμενα (αστέρια και άλλα ουράνια σώματα).

Αυτό οφείλεται κυρίως λόγω της μεγάλης λαμπρότητας του ουρανού της νύχτα (εικόνα 3.2 [34,38]).

Το φυσικό συστατικό της ουράνιας λάμψης έχει πέντε κύριες πηγές:

- το φως του ήλιου που ανακλάται από το φεγγάρι και τη γη,
- την ασθενή λάμψη του αέρα στην ανώτερη ατμόσφαιρα,
- το φως του ήλιου που ανακλάται από τη διαπλανητική σκόνη,
- την αστροφεγγιά και
- το φως από τα εξασθενημένα αστέρια και νεφελώματα (ουράνια αντικείμενα ή διάχυτες μάζες διαπλανητικής σκόνης).



**Εικόνα 3.2:** Κατανομή των τεχνητού φωτός, ορατού από το διάστημα. Παρατηρούνται τέσσερις τύποι φωτός: (1) πόλεις, κωμοπόλεις και χωριά (άσπρα), (2) πυρκαγιές (κόκκινο), (3) φλόγες αερίου (πράσινες) και (4) σκάφη (μπλε) [34,38].

Οι ερασιτέχνες αστρονόμοι χαρακτηρίζουν τον ουρανό της νύχτας, βάσει του αστεριού με την λιγότερη φωτεινότητα, που είναι ορατό με γυμνό μάτι.

Αυτό είναι ένα απλό κριτήριο που εξαρτάται από την οπτική δυνατότητα του παρατηρητή δηλαδή την οξύτητα της όρασής του.

Επίσης εξαρτάται από το χρόνο, την προσπάθεια και την εμπειρία για να δει τα αστέρια με μικρή φωτεινότητα.

Ένας τρόπος για τους ερασιτέχνες αστρονόμους να υπολογίσουν με αντικειμενικότητα τη φωτεινότητα του ουρανού την νύχτα, είναι με χρήση της κλίμακας σκοτεινού ουρανού του Bortle [36].

Αυτή είναι μία κλίμακα 9 επιπέδων που βασίζεται στη τιμή φωτεινότητας κάποιων συγκεκριμένων αστρικών αντικειμένων.

Οι επαγγελματίες αστρονόμοι αντίθετα, μετρούν την φωτεινότητα του σκοτεινού ουρανού, χρησιμοποιώντας αστρονομικό εξοπλισμό.

Το όργανο που χρησιμοποιούν για να κάνουν τις μετρήσεις είναι το φωτοηλεκτρικό φωτόμετρο.

Οι μετρήσεις αυτές γίνονται συνήθως στο ζενίθ (το ζενίθ είναι το υψηλότερο σημείο στον ουρανό, ακριβώς επάνω από το σημείο παρατήρησης).

### 3.3 Ζητήματα οικολογικής φωτορύπανσης

Η οικολογική φωτορύπανση ορίζεται σαν τον είδος της φωτορύπανσης που καθορίζει την ποσότητα του φυσικού φωτός στα επίγεια και υδρόβια οικοσυστήματα [38].

Υπάρχουν πολλές αναφορές (στην βιβλιογραφία και στο internet) των οικολογικών επιρροών της φωτορύπανσης [40,42]. Από αυτές, η πιο πρόσφατη είναι του Longcore et al. [38]

Αντίθετα με την αστρονομική φωτορύπανση, στην οικολογική φωτορύπανση το φως δεν είναι απαραίτητο να είναι ιδιαίτερα φωτεινό ή να έχει κατεύθυνση προς τον ουρανό, ώστε να επηρεάσει τα οικοσυστήματα.

Το φως δηλ. στην οικολογική φωτορύπανση, δεν είναι απαραίτητο να συμβάλει στην λάμψη του ουρανού, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3.



**Εικόνα 3.3:** Η οικολογική και η αστρονομική φωτορύπανση [38].

Οι πηγές της οικολογικής φωτορύπανσης που επηρεάζουν τα οικοσυστήματα περιλαμβάνουν

- τη λάμψη του ουρανού,
- τα φωτισμένα κτήρια και τους ουρανοξύστες,
- τα φώτα των δρόμων,
- τα φώτα στα σκάφη,
- τα φώτα ασφάλειας,
- τα φώτα στα οχήματα,
- τις φλόγες στις πλατφόρμες πετρελαίου,
- τα φώτα στα υποθαλάσσια ερευνητικά σκάφη.

Στην βιβλιογραφία και στο internet αναφέρεται ότι τα ζώα που υφίστανται την οικολογική φωτορύπανση συνήθως αποπροσανατολίζονται.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα είτε να προσελκύονται, είτε να απωθούνται από το έντονο φως, με άμεσες συνέπειες

- στην αναζήτηση τροφής,
- στην αναπαραγωγή,
- στην επικοινωνία
- καθώς και σε άλλες κρίσιμες συμπεριφορές τους [38].

Οι οικολόγοι αναφέρουν ένα ακόμα πρόβλημα, στην προσπάθειά τους να μετρήσουν τα οικολογικά αποτελέσματα της φωτορύπανσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο με τα μεγέθη της φωτομετρίας, ο φωτισμός σε μια επιφάνεια μετρείται σε lux. Το lux είναι μια μονάδα μέτρησης προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης όρασης.

Οι άλλοι οργανισμοί, αντιλαμβάνονται το φως διαφορετικά απ' ότι ο άνθρωπος (π.χ. τα πράσινα φυτά αντανακλούν περισσότερο το πράσινο μέρος του φάσματος).

Αυτό έχει αποτέλεσμα οι έρευνες στην οικολογική φωτορύπανση να πρέπει να περιλαμβάνουν τον αντίστοιχο προσδιορισμό της ποσότητας της έκθεσης στο φως, στους διαφορετικούς οργανισμούς [38].

Για να είναι ακριβείς οι έρευνες, θα πρέπει να μετρούν τον φωτισμό σε φωτόνια ανά τετραγωνικό μέτρο και ανά δευτερόλεπτο, για τις αντίστοιχες μετρήσεις των μηκών κύματος του προσπίπτοντος φωτός.

Σαν παράδειγμα αναφέρεται η εργασία GAL et al. [44], στην οποία έχουν υπολογίσει την καμπύλη απόκρισης των γαρίδων στον φωτισμό και αναφέρουν τον φωτισμό σε lux, προσαρμοσμένο στη φασματική ευαισθησία των συγκεκριμένων ειδών.

Ένα παράδειγμα για το πώς η χρήση του lux αγνοεί τις βιολογικά σχετικές πληροφορίες του εκάστοτε είδους, είναι οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης (HPS):

- Οι λαμπτήρες HPS προσελκύουν τους σκώρους, λόγω της παρουσίας ακτινοβολίας υπεριώδους μήκους κύματος.
- Αντίθετα, οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης (LPS) της ίδιας έντασης που δεν παράγουν ακτινοβολία υπεριώδους μήκους κύματος, δεν προσελκύουν τους σκώρους [45].

### **3.4 Ζητήματα φωτορύπανσης στην υγεία**

Ο υπερβολικός φωτισμός έχει σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου, παρουσιάζοντας συμπτώματα όπως πονοκέφαλοι και αϋπνίες.

Το ανθρώπινο σώμα έχει ανάγκη από χρόνο παραμονής στο σκοτάδι, για να συντελεστούν διάφορες λειτουργίες του. Δυστυχώς όμως το σύγχρονο αστικό περιβάλλον μειώνει αυτή τη δυνατότητα [46].

Σύμφωνα με μια αμερικανική επιστημονική έρευνα (Λάουρα Φόνκεν, Ράντι Νέλσον - περιοδικό “Behavioural Brain Research”), ο τεχνητός φωτισμός στους δρόμους και τις γειτονιές όλη τη νύχτα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη νοητική και ψυχική υγεία των ανθρώπων. Οι άνθρωποι μπορεί να εμφανίσουν σημαντικά προβλήματα υγείας, μέχρι και να εμφανίσουν κατάθλιψη

Σύμφωνα με την Φόνκεν, το ίδιο πρόβλημα εμφανίζεται και σε όσους εργάζονται νυχτερινές βάρδιες καθώς και σε όσους παρακολουθούν τηλεόραση μέχρι αργά τη νύχτα.

Ακόμα επισήμανε ότι τα έντονα φώτα σε πολλά νοσοκομεία το βράδυ, ιδίως στις μονάδες εντατικής θεραπείας, ίσως επιδεινώνουν την υγεία ορισμένων ασθενών [47].

Οι έρευνες εκτιμούν ότι η επιδείνωση του προβλήματος της κατάθλιψης στις σύγχρονες κοινωνίες συνδέεται και με την αύξηση του ηλεκτροφωτισμού στις πόλεις.

Επιπλέον, έρευνα που βασίστηκε σε πειράματα σε ποντίκια επιβεβαίωσε ότι όσα ζούσαν σε ένα φωταγωγημένο δωμάτιο όλο το 24ωρο, εμφάνισαν περισσότερα

καταθλιπτικά συμπτώματα, σε σχέση με όσα ζούσαν σε ένα φυσιολογικό κύκλο διαδοχής φωτός-σκοταδιού.

Επιπρόσθετα διαπιστώθηκε ότι όσα πειραματόζωα είχαν την επιλογή να ξεφύγουν από το συνεχές φως και να καταφύγουν σε ένα σκοτεινό μέρος, είχαν μειωμένα συμπτώματα κατάθλιψης.



### **3.5 Περιβαλλοντικά ρίσκα και θέματα οικονομίας**

Η φωτορύπανση πηγάζει κυρίως από σπατάλη ενέργειας. Τα πραγματικά αίτια του προβλήματος είναι τόσο ο υπερβολικός όσο και ο λανθασμένος φωτισμός.

Μεγάλα ποσά ενέργειας σπαταλούνται είτε για φωτισμό που πάει χαμένος (π.χ. στοχεύοντας τον ουρανό), είτε για φωτισμό χώρων όπου δεν είναι απαραίτητος.

Πολύ συνηθισμένη είναι η σπατάλη ενέργειας από το ίδιο το κράτος και τους δημόσιους φορείς για το φωτισμό των δημόσιων χώρων και κτηρίων.

Η επιβάρυνση αυτή αφενός ζημιώνει όλους τους πολίτες οικονομικώς, αφετέρου αποτελεί σπατάλη πολύτιμων ενεργειακών πόρων. [46]

Η ενέργεια που καταναλώνεται στον εξωτερικό φωτισμό δεν είναι με ακρίβεια γνωστή.

- Ο οδικός φωτισμός υπολογίζεται ότι αντιπροσωπεύει το 1% της συνολικής φωτεινής ενέργειας.
- Ο εξωτερικός φωτισμός (για τα σπίτια, το εμπόριο, τη βιομηχανία και τις υπόλοιπες παρόμοιες χρήσεις), δαπανά ένα άγνωστο ποσό ενέργειας.
- Οι απώλειες της φωτεινής ενέργειας επίσης δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν.

Με τον όρο «απώλειες φωτεινής ενέργειας» ορίζεται κάθε μη χρήσιμο φως. Μεγάλο τμήμα αυτού του μη χρήσιμου φωτός οφείλεται σε φωτιστικά που στοχεύουν πάνω από τον ορίζοντα.

Με την τεχνολογία των δορυφορικών επισκοπήσεων από τους δορυφόρους (π.χ. από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων), εκτιμάται ότι οι απώλειες της φωτεινής ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ 1–2‰ της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτή η εκτίμηση αφορά το τμήμα της φωτεινής ενέργειας που «συλλαμβάνεται» από τους δορυφόρους. Δηλαδή, σε φως που κατευθύνεται προς τον ουρανό άμεσα, ή έμμεσα (με ανάκλαση στο έδαφος ή με σκέδαση στα σωματίδια της ατμόσφαιρας).

### **3.6 Δράσεις αντιμετώπισης και επισκόπηση παγκόσμιας νομοθεσίας**

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται μερικοί από τους νόμους και κανονισμούς σχετικά με την φωτορύπανση [48] που υπάρχουν αναρτημένοι στο διαδίκτυο.

#### **3.6.1 Αυστραλία**

Στα Αυστραλιανά πρότυπα AS 42821997 [49], αναφέρονται τα όρια για τις αντίστοιχες παραμέτρους φωτισμού, ώστε να περιοριστούν όλα τα επιπρόσθετα αποτελέσματα της φωτορύπανσης, μέσα σε ανεκτά επίπεδα.

Οι οδηγίες είναι προσανατολισμένες κυρίως σε νέες εγκαταστάσεις, όμως παρέχονται και κάποιες συμβουλές για επανορθωτικά μέτρα που μπορούν να ληφθούν στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις.

Τα πρότυπα αναφέρονται επίσης στις πιθανές επιδράσεις των συστημάτων φωτισμού στους κατοίκους των αντίστοιχων περιοχών.

#### **3.6.2 Καναδάς**

Με το τοπικό νομοθέτημα (αριθ. 0362), η εταιρία φωτισμού της πόλης του Μισισσιπή ρυθμίζει τον υπαίθριο φωτισμό και ελέγχει την φωτορύπανση της περιοχής [50].

Το τοπικό νομοθέτημα αναφέρεται κυρίως στον τύπο του φωτιστικού σώματος που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί, για διάφορες εφαρμογές, όπως, για φωτισμό

- σε κτήρια και οικοδομήματα,
- σε πάρκα ψυχαγωγίας,

- σε χώρους στάθμευσης,
- σε φυσικά τοπία,
- σε διαφημιστικές πινακίδες,
- στους δρόμους,
- στις διαβάσεις πεζών,
- σε αγροτικές περιοχές,
- σε βιομηχανικές περιοχές κτλ.

Ο προτεινόμενος τύπος λαμπτήρων για υπαίθριο φωτισμό είναι ο λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης (LPS), αλλά αποδεκτός θεωρείται και ο λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης (HPS).

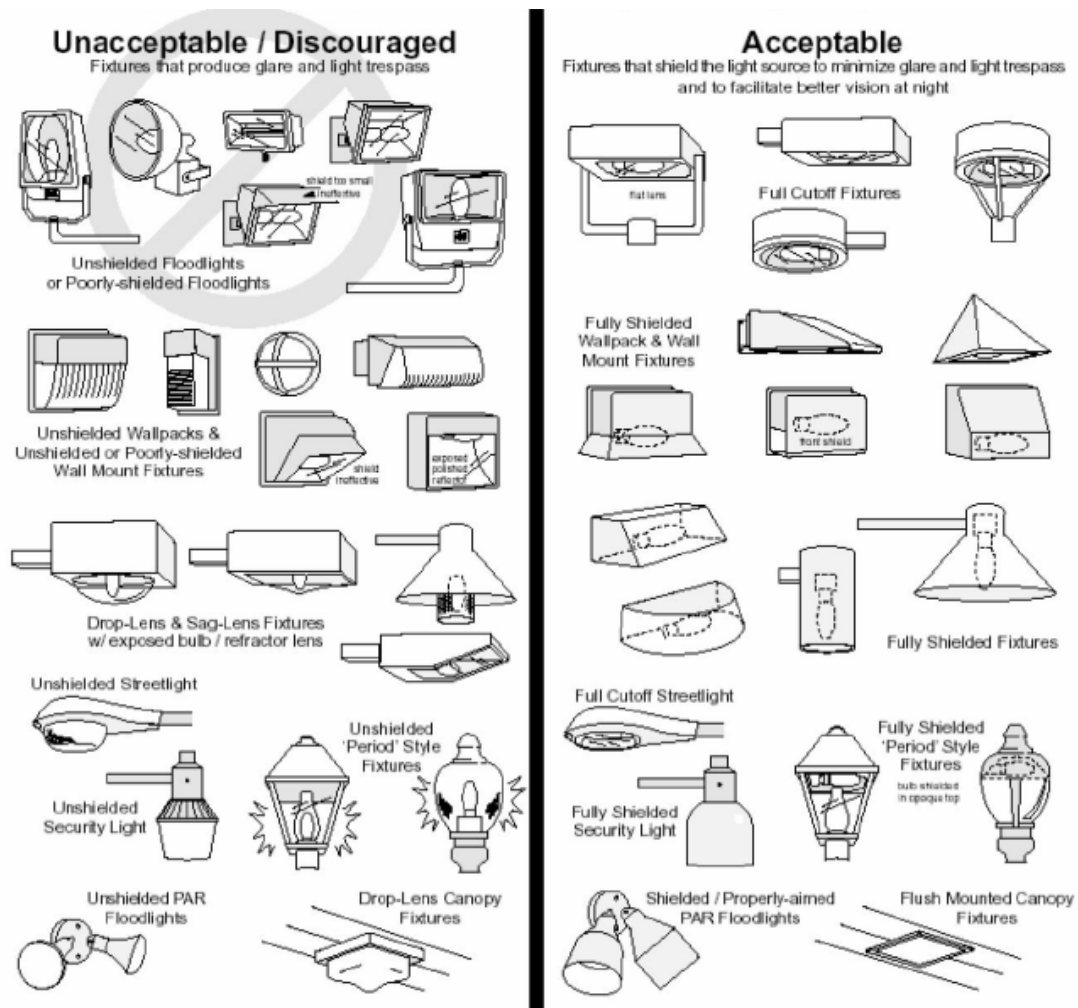
Η χρήση άλλου λαμπτήρα υψηλής έντασης (HID) (π.χ. μετάλλων αλογόνου, ατμών υδραργύρου κτλ), γίνεται αποδεκτή υπό προϋποθέσεις.

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως καθώς και οι λαμπτήρες φθορισμού είναι επίσης αποδεκτοί, υπό αυστηρές προϋποθέσεις,

Τέλος η χρήση των λαμπτήρων αλογόνου χαλαζία δεν συστήνεται.

Το τοπικό νομοθέτημα δηλώνει ότι ο δημοτικός υπαίθριος φωτισμός δρόμων πρέπει να έχει φωτιστικά FullCutOff και να εγκαθίστανται σύμφωνα με τα πρότυπα IESNA.

Μερικά παραδείγματα των αποδεκτών φωτιστικών σωμάτων δίνονται στην εικόνα 3.4.



**Εικόνα 3.4:** Παραδείγματα αποδεκτών και μη αποδεκτών φωτιστικών σωμάτων, σύμφωνα με το τοπικό νομοθέτημα no. 0362 για τον φωτισμό της πόλης του Mississippi Mills [50].

### 3.6.3 Χιλή

Η Χιλή διαθέτει επίσης κανονισμούς σχετικά με τα όρια εκπομπής (D.S. N° 686/98 [51]) για την φωτορύπανση. Η νομοθεσία αυτή οφείλεται κυρίως στον μεγάλο αριθμό αστρονομικών παρατηρητηρίων (π.χ. Cerro Pachón, Cerro Tololo) που διαθέτει [52].

Τα πρότυπα ορίζουν ότι ένας λαμπτήρας με ένταση φωτεινής ροής ίση ή μικρότερη από 15000 lm δεν μπορεί να εκπέμψει περισσότερο από το 0.8% της ονομαστικής φωτεινής ροής του, επάνω από το οριζόντιο επίπεδο, όταν εγκαθίσταται σε ένα φωτιστικό σώμα.

Για λαμπτήρες με φωτεινή ροή μεγαλύτερη από 15000 lm, δεν θα πρέπει να εκπέμπουν περισσότερο από το 1.8% της ονομαστικής φωτεινής ροής τους, επάνω από το οριζόντιο επίπεδο, όταν εγκαθίσταται σε ένα φωτιστικό σώμα.

Οι λαμπτήρες που προορίζονται για χρήση σε εξωτερικό φωτισμό πρέπει να περιορίσουν το φάσμα τους στο τμήμα της ορατής ακτινοβολίας (350 έως 760 nm) και η απόδοση της φωτεινής ροής δεν μπορεί να είναι λιγότερη από 80 lm/W (επισημαίνεται ότι δεν επιτρέπεται η χρήση των λαμπτήρων ατμού υδραργύρου).

Διαφορετικά όρια εκπομπής δίνονται για συσκευές προβολέων.

Λαμπτήρες με φωτεινή ροή μικρότερη από 9000 lm δεν μπορεί να εκπέμπουν περισσότερο από το 5% της ονομαστικής ροής τους επάνω από τα οριζόντια επίπεδα, ενώ λαμπτήρες ισχυρότερους από 9000 lm αντιμετωπίζονται ως κανονικοί λαμπτήρες.

### **3.6.4 Τσεχία**

Ο Τσεχικός νόμος σχετικά με την προστασία της ατμόσφαιρας περιλαμβάνει την πρόληψη από την φωτορύπανση [53].

Το σχέδιο των κανονισμών ακολουθεί στενά το νόμο Lombardy όπου ο κανόνας για 0 cd/klm (δηλ., FS πλήρως προστατευμένο) είναι το βασικό μέρος του. Ο νόμος

προβλέπει δημοτικό πρόστιμο από 500 CZK έως 150000 (~185360 €) σε οποιοδήποτε πρόσωπο παραβιάζει έστω και μια από τις υποχρεώσεις που τίθενται από το νόμο.

Η υποχρέωση από το νόμο ορίζεται ως εξής: «Κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων εντός περιοχών που τίθενται υπό τον κανονισμό εφαρμογής του νόμου, καθένας είναι υποχρεωμένος να υπακούσει τις υποδείξεις του δήμου και σύμφωνα με αυτές, να λάβει τα απαραίτητα μέτρα για να αποτρέψει την φωτορύπανση της ατμόσφαιρας».

### 3.6.5 Ευρωπαϊκή Ένωση

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχει το πρότυπο EN 12464 (2) [54], το οποίο θέτει οδηγίες για την φωτορύπανση.

Αυτό το έγγραφο καθορίζει τις απαιτήσεις φωτισμού για όλους τους χώρους, από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ως τους σιδηροδρόμους.

Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν νόμοι ή κανονισμοί που να προδιαγράφουν τις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν οι εγκαταστάσεις εξωτερικού φωτισμού (υπαίθριος φωτισμός). Επομένως, ο μελετητής των εγκαταστάσεων φωτισμού είναι αναγκασμένος να ανατρέξει σε διεθνείς κανονισμούς και οδηγίες.

Στην ελληνική νομοθεσία υπάρχουν διάσπαρτες ρυθμίσεις που περιορίζονται κυρίως, στον έλεγχο της θάμβωσης:

- Σύμφωνα με τον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας (Κ.Ο.Κ.) απαγορεύεται η τοποθέτηση οποιασδήποτε πινακίδας ή συσκευής, η οποία μπορεί να προκαλέσει θάμβωση στους χρήστες των αυτοκινητοδρόμων [55]. Δυστυχώς, όμως, στον Κ.Ο.Κ. δεν υπάρχει ορισμός της θάμβωσης και δεν τίθεται κανένας ποσοτικός περιορισμός.

- Στην εγκύκλιο του ΥΠΕΧΩΔΕ Δ13/0/281/22/2-3-1990, που αφορά στις απαιτήσεις του φωτισμού κυκλοφοριακών συνδέσεων στο οδικό δίκτυο, υπάρχει η μοναδική ποσοτική προδιαγραφή, σε ολόκληρη την ελληνική τεχνική νομοθεσία, όσον αφορά στη θάμβωση.

Η λέξη «φωτορύπανση» συναντάται για πρώτη φορά στο προεδρικό διάταγμα του 1999, που αφορά στην προστασία του Εθνικού Θαλάσσιου Πάρκου Ζακύνθου [56].

Στο διάταγμα αυτό αναφέρεται ότι στο Θαλάσσιο Πάρκο Ζακύνθου «.. επιβάλλεται η λήψη μέτρων για τον περιορισμό ... της φωτορύπανσης». Μόνο που ούτε η φωτορύπανση ορίζεται, ούτε τα κατάλληλα μέτρα προσδιορίζονται.

Περιφερειακοί νόμοι ενάντια στην φωτορύπανση έχουν επιβληθεί σε 13 περιοχές της Ιταλίας (Lombardia 17/00, EmiliaRomagna 113/03, Marche 10/02, Lazio 23/00, Campania 13/02, Veneto 22/97, Toscana 37/00, Piemonte 31/00, Valle d'Aosta 17/98, Basilicata 41/00, Abruzzo 12/05, Umbria 20/05, Puglia 15/05).

Επιπλέον, τρία Ιταλικά τεχνικά πρότυπα αναφέρονται στην φωτορύπανση (UNI10819, UNI10439, UNI9316) [59].

Οι νόμοι που επιβάλλονται στην Ιταλία στις διάφορες περιοχές παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.





**Εικόνα 3.5:** Νομοθεσία για Φωτορύπανση στην Ιταλία[59].

Ακολούθως αναφέρονται τα βασικά σημεία των κανονισμών:

- Οι κανονισμοί πρέπει να εφαρμοστούν σε ολόκληρη την Ιταλία χωρίς υποδιαίρεσεις σε «προστατευόμενες ζώνες», καθώς η φωτορύπανση επεκτείνεται πολύ μακριά από τις πηγές της.
- Οι κανονισμοί πρέπει να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε νέα εγκατάσταση φωτισμού, είτε δημόσια είτε ιδιωτική.
- Όταν υπάρχει ένας τυποποιημένος κανόνας για την ασφάλεια, η μέση τιμή της φωτεινότητας ή της έντασης της φωτεινής ροής δεν πρέπει να ξεπεράσει την ελάχιστη τιμή που απαιτείται για την ασφάλεια (π.χ. δρόμος, πεζόδρομος και περιοχές εργασίας). Για τα υπόλοιπα είδη φωτισμού, η μέγιστη φωτεινότητα ορίζεται σε 1 cd/m<sup>2</sup> (π.χ. φωτισμός κτηρίων).

- Οι φωτεινές εκπομπές σε μικρές γωνίες επάνω από τον ορίζοντα (45 μοίρες) πρέπει να περιοριστούν, επειδή έχουν πολύ σημαντικές επιπτώσεις στην φωτορύπανση.
- Η άμεση ανοδική εκπομπή φωτός από τα φωτιστικά σώματα πρέπει να περιοριστεί σε 0 cd ανά 1000 lumen φωτεινής ροής που εκπέμπονται από το φωτιστικό σώμα, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση επάνω από τον ορίζοντα, για σχεδόν οποιοδήποτε είδος εγκατάστασης φωτισμού.
- Τα κτήρια και τα μνημεία πρέπει να φωτίζονται από πάνω προς τα κάτω, με τα ίδια όρια που δίνονται ανωτέρω για τις ανοδικές εκπομπές φωτισμού.
- Μόνο λαμπτήρες με την μέγιστη δυνατή απόδοση για την δεδομένη χρήση πρέπει να χρησιμοποιούνται. Αυτοί οι λαμπτήρες παράγουν λιγότερη φωτορύπανση εξωτερικά της φωτοπικής ζώνη και εντός της σκοτοπικής ζώνη.
- Οι προς τα πάνω κατευθυνόμενες φωτεινές ακτίνες απαγορεύονται, επειδή αποσπούν την προσοχή των οδηγών και διακινδυνεύουν την οδική ασφάλεια.
- Οι μελέτες φωτισμού για οποιονδήποτε χώρο είναι υποχρεωτικές, εκτός από τις χαμηλής ισχύος οικιακές εγκαταστάσεις με λιγότερα από 5 φωτιστικά σώματα.

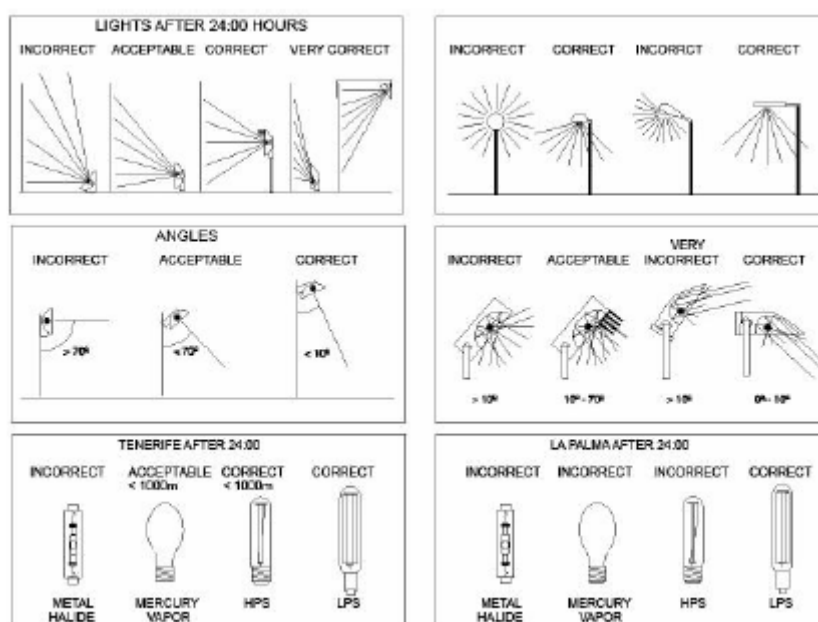
Στην Ισπανία, υπάρχουν περιφερειακοί νόμοι που ισχύουν για τις αντίστοιχες αυτόνομες περιοχές.

Στις Κανάριες νήσους υπάρχει ο νόμος 31/1988 της 31ης Οκτωβρίου [61] που ρυθμίζει την φωτορύπανση, την ηλεκτρομαγνητική ρύπανση που προέρχεται κυρίως από τους πομπούς καθώς και την ατμοσφαιρική ρύπανση,

Η νομοθεσία επιβάλλει ότι καμία βιομηχανία ή γενικότερα δραστηριότητα ή υπηρεσία δεν επιτρέπεται να παραγάγει ατμοσφαιρικούς ρύπους επάνω από ύψος 1500 m στα νησιά Tenerife και La Palma.

Ο νόμος συστήνει τη χρήση των λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης στον υπαίθριο φωτισμό, καθώς εκπέμπουν μόνο στη ζώνη του ορατού φάσματος. Ο επιβλαβέστερος λαμπτήρας στον υπαίθριο φωτισμό είναι ο λαμπτήρας μετάλλων αλογόνου και θεωρείται ως λανθασμένη επιλογή. Αυτό οφείλεται στο υψηλό περιεχόμενο UV ακτινοβολίας, το οποίο είναι έντονα διασκορπισμένο στην ατμόσφαιρα ενώ ταυτόχρονα είναι ασήμαντο για το φωτισμό.

Η επισκόπηση των κανονισμών φαίνεται στην εικόνα 3.6.



**Εικόνα 3.6:** Βασικές συστάσεις φωτισμού στις Κανάριες νήσους, όσον αφορά την κατανομή του φωτός, την γωνία καθώς και τον τύπο των λαμπτήρων. HPS = νάτριου υψηλής πίεσης, LPS = νατρίου χαμηλής πίεσης [61].

Στην Καταλωνία, ο νόμος 6/2001 της 31ης Μαΐου [62,63] ρυθμίζει την φωτορύπανση. Ο σκοπός του νόμου είναι

- να υποδείξει τους βέλτιστους όρους φωτορύπανσης για το περιβάλλον (ζώα, φυτά και οικοσυστήματα γενικά),

- να προωθηθεί την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας,
- να ελαχιστοποιήσει την φωτορύπανση

ώστε να διατηρηθεί η δυνατότητα να εξακολουθεί να φαίνεται ο νυχτερινός ουρανός.

### **3.6.6 Φιλανδία**

Ο Φινλανδικός νόμος προστασίας του περιβάλλοντος (4.2.2000/86) [58] δεν δίνει πολύ λεπτομερείς κανονισμούς σχετικά με την φωτορύπανση.

Ο νόμος αναφέρεται στην περιβαλλοντική ρύπανση που σχετίζεται με την ανθρώπινη δραστηριότητα (χημικές ουσίες, ενέργεια, θόρυβος, δονήσεις, ακτινοβολία, φωτισμός, θερμότητα ή μυρωδιά) που μπορεί είτε χωριστά είτε σε συνδυασμό να προκαλέσει:

- κίνδυνο υγείας
- ζημία στο περιβάλλον
- περιορισμό των φυσικών πόρων
- μείωση των πολιτιστικών αξιών
- καταστροφή ιδιοκτησίας
- ή άλλη παρόμοια ζημία

στη δημόσια ή ιδιωτική περιουσία

### 3.6.7 Νέα Ζηλανδία

Το νομαρχιακό συμβούλιο του Golden Bay έχει ψηφίσει το ακόλουθο παράρτημα για τον υπαίθριο κανονισμό φωτισμού (Νέα Ζηλανδία, Νοεμβρίου 1989):

«Ο σκοπός του κανονισμού είναι να υποδείξει τους τύπους, τα είδη, την κατασκευή, την εγκατάσταση και τη χρήση των υπαίθριων φωτιστικών σωμάτων, καθώς και των συστημάτων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ ταυτόχρονα θα διατηρούν το φυσικό περιβάλλον» [60].

Οι γενικές αρχές του κανονισμού είναι παρόμοιες με τις αρχές άλλων κανονισμών σχετικά με το φωτισμό.

Οι τύποι φωτισμού χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την ανάγκη διάχυσης του χρώματος του φωτός:

- Η πρώτη κατηγορία, όπου η διάχυση του χρώματος είναι ασήμαντη (οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπουδήποτε, εφ' όσον βέβαια ικανοποιούν τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου τύπου λαμπτήρων)
- Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα φώτα πηγής λέιζερ καθώς και παρόμοιες πηγές φωτός υψηλής έντασης που χρησιμοποιούνται για την διαφήμιση ή την ψυχαγωγία (όπου δεν μπορούν να προβληθούν επάνω από το οριζόντιο επίπεδο)

Η χρησιμοποίηση προβολέων για λόγους διαφήμισης ή ψυχαγωγίας δεν επιτρέπεται.

Εξαίρεση αποτελεί

- ο φωτισμός για τη ναυσιπλοΐα, το λιμένα και το αεροδρόμιο, όπου απαιτείται επιπρόσθετος φωτισμός για την ασφαλή λειτουργία των σκαφών και των αεροπλάνων, και
- ο φωτισμός έκτακτης ανάγκης από την αστυνομία, την πυροσβεστική και τις υπόλοιπες αρχές διάσωσης.

### 3.6.8 Αγγλία

Στην Αγγλία (UK) ο κανονισμός Somerset (20012015) [66] υποδεικνύει το πώς επιθυμούν να αναπτυχθεί η χώρα κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών.

Ο στόχος του κανονισμού όσον αφορά την φωτορύπανση και τον θόρυβο είναι: «δραστική μείωση του θορύβου και της φωτορύπανσης από τα επίπεδα του 1999».

Η ευθύνη για την εφαρμογή των κανονισμών κατά της φωτορύπανσης μεταβιβάζεται στις κατά τόπους αρχές:

«Οι τοπικές αρχές πρέπει να προσδιορίσουν τα χειρότερα παραδείγματα ύπαρξης φωτορύπανσης στην περιοχή τους. Εν συνεχεία θα πρέπει να δώσουν συμβουλές τόσο για την μείωση του φαινομένου όσο και για την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Μια δημόσια εκστρατεία ευαισθητοποίησης του κόσμου σχετικά με τον θόρυβο και την φωτορύπανση πρέπει να οργανωθεί από τις τοπικές αρχές.»

## **Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις φωτορύπανσης και ανάλυση δεδομένων**

### **4.1 Ψηφιακή φωτογράφιση**

Η μέτρηση της κίρκαδικής φωτεινότητας (δηλαδή της φωτεινότητας που συμβάλει στην διατήρηση των καθημερινών ρυθμών των βιολογικών λειτουργιών) μπορεί να γίνει με ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, ακόμα και «μη-επιστημονικές» κάμερες που όμως μπορούν να παρέχουν τις φωτογραφίες σε ακατέργαστη (ασυμπιεστη) μορφή.

Για παράδειγμα ο Hollan [70] σύγκρινε δύο εμπορικές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές (Fuji S5000 και Cannon EOS D60) για την αντιστοιχία της ευαισθησίας των μπλε εικονοκυττάρων (pixels) με το φάσμα δράσης του ανθρώπινου οπτικού συστήματος.

Το φάσμα σύγκρισης που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ήταν μια σύνθετη γραφική παράσταση που διαμορφώθηκε από διάφορες σχετικές μελέτες [71-77].

Η μελέτη του Hollan απέδειξε ότι τουλάχιστον μερικές CCD φωτογραφικές μηχανές μπορούν να μετρήσουν επιτυχώς την καταστολή της μελατονίνης από φως.

Δεδομένου ότι αυτή η μελέτη αφορά έρευνα σκοτο-βιολογίας (δηλαδή μελέτη της επιρροής του σκοταδίου στις βιολογικές λειτουργίες), η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ποσοτικοποιήσει τις επιπτώσεις της φωτορύπανσης στην ανθρώπινη και ζωική φυσιολογία [77, 78].

Παραδείγματος χάριν, 5% του τσεχικού πληθυσμού θεωρεί το ανεπιθύμητο τεχνητό φως από υπαίθριες πηγές ως μια από τις δύο κύριες αιτίες των προβλημάτων ύπνου τους [79].



## 4.2 Φασματο-φωτομετρία

Πρόσφατη μελέτη [80] παρουσιάζει την χρήση ενός φορητού φασματο-φωτόμετρου για την μέτρηση της φωτορύπανσης (βλ. εικόνα 4.1).



**Εικόνα 4.1:** Φορητό φασματο-φωτόμετρο για την αποτύπωση της φωτορύπανσης

Φορητό φασματο-φωτόμετρο για την αποτύπωση της φωτορύπανσης

Τα βασικότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά του παρουσιαζόμενου οργάνου είναι:

- 1) φασματική κάλυψη μήκους κύματος από 400 nm έως 1000nm,
- 2) μικρό βάρος και φορητότητα,
- 3) μικροί χρόνοι μέτρησης,
- 4) καλή ισορροπία μεταξύ φασματικής ευαισθησία και γρήγορου χρόνου έκθεσης,
- 5) απόλυτη βαθμονόμηση,
- 6) δυνατότητα χαρτογράφησης ουρανού μέσω πολλαπλών μετρήσεων και αυτόματη καταμέτρηση γεωγραφικών συντεταγμένων και ύψους

7) χαμηλό κόστος

Η συσκευή παρέχει χάρτες φωτεινότητας ουρανού νύχτας σε οποιαδήποτε φωτομετρική ζώνη του ορατού φάσματος και στο φως των κύριων τύπων λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος.

### 4.3 Φωτομετρία ουρανού νύχτας

Η μέτρηση της φωτεινότητας του ουρανού μπορεί να πραγματοποιηθεί και με απλά, φθηνά φορητά φωτόμετρα. Ένα παράδειγμα είναι το Unihedron Sky Quality Meter (SQM) [81] το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως από αστρονόμους. Το φωτόμετρο αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 4.2.

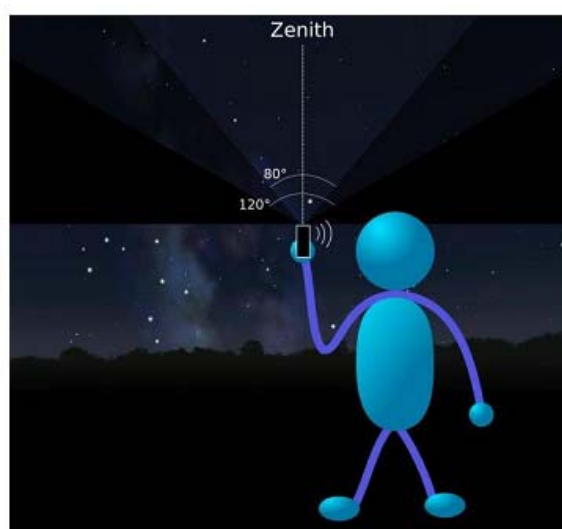


**Εικόνα 4.2:** Το Φορητό φωτόμετρο Unihedron Sky Quality Meter (SQM)

Ο παραπάνω μετρητής χρησιμοποιεί ως αισθητήρα μία φωτοδίοδο (TAOS TSL237 [82]) που καλύπτεται με φίλτρο ακτινοβολίας IR της Hoya [83]. Έχει αποτελεσματική στερεά γωνία 1.532 στερακτινίων [82] έτσι δεν είναι ένας μετρητής σημείων δεδομένου ότι δέχεται ένα κωνικό εύρος φωτός (~ 80 μοίρες διάμετρος).

Η συσκευή μετρά τη φωτεινότητα ενός καθορισμένου εύρους του ουρανού που στην συνέχεια μπορεί να μετατραπεί σε λαμπρότητα (καντέλες ανά τετραγωνικό μέτρο).

Η εικόνα 4.3 δείχνει την μέθοδο μέτρησης με αυτό το όργανο.



**Εικόνα 4.3:**  
φωτεινότητας με  
Quality Meter

Μέτρηση  
το Unihedron Sky  
(SQM)

Ο παραπάνω μετρητής εξετάστηκε και χαρακτηρίστηκε λεπτομερώς από τον Pierantonio Cinzano [85] του Ιδρύματος Επιστήμης & Τεχνολογίας Φωτορύπανσης (ISTIL/LPLAB).

Συγκεκριμένα το SQM αναλύθηκε με συνθετικές φωτομετρικές μετρήσεις για να συσχετισθεί και αποτιμηθεί η απόδοση του σε σχέση με τα υπόλοιπα κύρια συστήματα που χρησιμοποιούνται στις μελέτες φωτορύπανσης. Συμπερασματικά βρέθηκε ότι η υπό μελέτη συσκευή (καθώς και οι παρόμοιες της) είναι χρήσιμες και ακριβείς ως προς την μέτρηση και αποτίμηση της φωτορύπανσης.

#### **4.4 Καταγραφή φωτορύπανσης**

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα παγκόσμιο κίνημα με σκοπό την καταγραφή της φωτορύπανσης σε παγκόσμια κλίμακα, με βάση απλές μετρήσεις του αριθμού των αστεριών που διακρίνονται στον αστερισμό του Ωρίωνα.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται από παρατηρητές με γυμνό μάτι, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων, μια φορά κάθε χρόνο. Οι μετρήσεις των παρατηρητών καταγράφονται σε συγκεκριμένη φόρμα και υποβάλλονται στην ιστοσελίδα του κινήματος [[www.globeatnight.org](http://www.globeatnight.org)].

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων που διαρκεί μερικές εβδομάδες, οι διοργανωτές δημοσιεύουν τον παγκόσμιο χάρτη με τα επίπεδα φωτορύπανσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα τελευταία 4 χρόνια, έχουν υποβληθεί πάνω από 35.000 μετρήσεις από 100 έθνη.

Βάσει των δημοσιευμένων αποτελεσμάτων, εκτιμάται ότι στο άμεσο μέλλον, περισσότεροι από τους μισούς κατοίκους της γης θα κατοικούν σε περιοχές όπου το φως των πόλεων θα καλύπτει το νυχτερινό ουρανό και το φως των αστεριών θα χαθεί για πάντα.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το έντυπο παρατήρησης (checklist) που πρέπει να συμπληρώσει κάθε παρατηρητής και να υποβάλει στην ιστοσελίδα του κινήματος.

## Φυλλάδιο Παρατήρησης

Ημερομηνία: \_\_\_\_\_ 2011 (Φεβρουάριος 21-Μάρτιος 6)

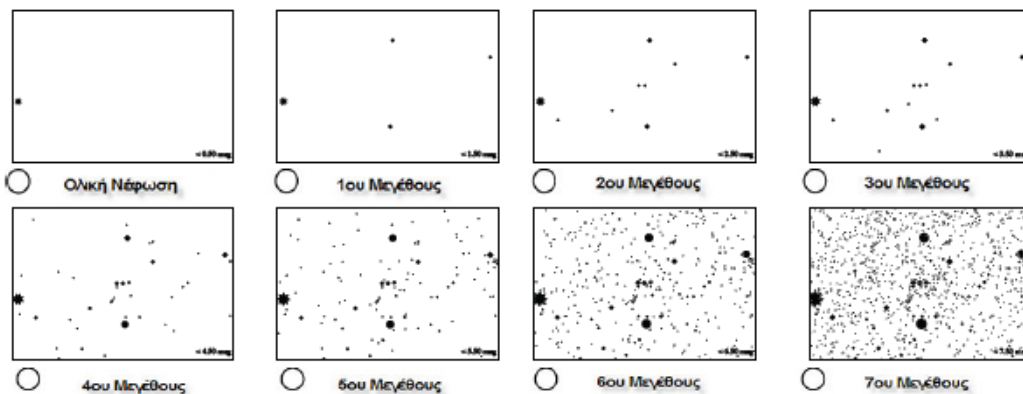
Ώρα Παρατήρησης: \_\_\_\_:\_\_\_\_ μ.μ. (Τοπική Ώρα) Χώρα: Greece

Γεωγραφικό Πλάτος (Lat): \_\_\_\_ μοίρες \_\_\_\_ λεπτά \_\_\_\_ δευτ. Βόρεια

Γεωγραφικό Μήκος (Lon): \_\_\_\_ μοίρες \_\_\_\_ λεπτά \_\_\_\_ δευτερόλεπτα Ανατολικά

Σχόλια για την τοποθεσία (π.χ. Υπάρχει μία λάμπα φωτισμού 50 μέτρα μακριά)

Πίνακες Μεγέθους: Ταιριάξτε τον ουρανό σας με έναν από τους πίνακες μεγέθους:



Υπολογίστε την νέφωση του ουρανού

\_\_\_\_\_ Καθαρός \_\_\_\_\_ Νεφοκάλυψη  $\frac{1}{4}$  του ουρανού

\_\_\_\_\_ Νεφοκάλυψη  $\frac{1}{2}$  του ουρανού \_\_\_\_\_ Νεφοκάλυψη  $> \frac{1}{2}$  του ουρανού

Τώρα μπείτε στην ιστοσελίδα <http://www.globeatnight.org> και πατήστε στο κουμπί REPORT για να περάσετε τις μετρήσεις σας. Σε περίπτωση που δυσκολεύεστε μπορούμε να το κάνουμε για εσάς στείλτε μας φαξ στο 00302825083274. Επίσης μπορείτε να επισκεφτείτε το [www.darksky.gr](http://www.darksky.gr) για να μάθετε περισσότερα για την φωτορύπανση.

Για την συμπλήρωση του παραπάνω εντύπου, κάθε παρατηρητής πρέπει να λάβει υπόψη του τα ακόλουθα:

1. Με χρήση GPS, πρέπει να καταγράψει την θέση που βρίσκεται και πραγματοποιεί την μέτρηση

2. Μετά τις 19.00, θα πρέπει να εντοπίσει τον αστερισμό του Ωρίωνα, αφού πρώτα περιμένει 10 περίπου λεπτά, ώστε να προσαρμοστούν τα μάτια του στο σκοτάδι
3. Θα πρέπει να προσδιορίσει την φωτορύπανση στην περιοχή της μέτρησης, με βάση την πλησιέστερη εικόνα που βρίσκεται στο φυλλάδιο (checklist)
4. Η μέτρηση μπορεί να επαναληφθεί για διαφορετικά σημεία της ευρύτερης περιοχής, με απόσταση περίπου ενός Km

## 4.5 Εκτιμήσεις φωτορύπανσης

Οι Cinzano, Falchi και Elvidge επισήμαναν ότι βάσει ερευνών τους (Cinzano et al., 2001) ο καθαρός έναστρος ουρανός έχει σχεδόν εξαφανιστεί λόγω της αύξησης της χρήσης του τεχνητού φωτισμού.

Σύμφωνα με την ίδια έρευνα, τα 2/3 του παγκόσμιου πληθυσμού ζουν με φωτορύπανση, ενώ το πρόβλημα είναι πιο σοβαρό σε Ευρώπη, Ιαπωνία και ΗΠΑ.

Ενδεικτικά αναφέρονται χώρες, όπου το ποσοστό του πληθυσμού τους ζει κάτω από επίπεδο φωτεινότητας μεγαλύτερο από τα επιτρεπόμενα όρια:

Χώρα	$\geq 0.11b_n$	$\geq 0.33b_n$	$\geq b_n$	$\geq 3b_n$	$\geq 9b_n$	$\geq 27b_n$	$\geq b_p$	$\geq b_{fg}$	$\geq b_m$	$\geq b_{fm}$	$\geq b_{mw}$	$\geq b_e$
Αφγανιστάν	11	8	1	0	0	0	12	8	1	0	0	0
Αλβανία	50	39	27	7	0	0	53	39	27	5	0	0
Αυστραλία	71	69	68	62	37	1	71	69	68	60	48	8
Βέλγιο	100	100	100	96	52	8	100	100	100	94	76	21
Καναδάς	97	94	90	83	71	46	97	94	90	82	77	59
Κίνα	54	41	29	13	5	1	55	40	29	12	7	2
Γαλλία	100	95	84	67	41	12	100	95	84	64	51	22
Γερμανία	100	100	94	66	25	0	100	100	94	60	40	5
Ελλάδα	90	80	70	54	41	17	91	80	70	52	44	31
Σιγκαπούρη	100	100	100	100	100	60	100	100	100	100	100	95
Ηνωμένο Βασίλειο	100	98	94	79	40	4	100	98	94	74	55	15
ΗΠΑ	99	97	93	83	62	30	99	97	93	81	71	44
Ζάμπια	38	36	12	0	0	38	36	32	32	11	4	0

**Πηγή:** Cinzano P., Falchi F., Elvinge C. D., *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*, 2001.

\* Όπου  $b_n$ : είναι ο λόγος μεταξύ της τεχνητής φωτεινότητας και της φυσικής φωτεινότητας,  $b_p$ : αυτό είναι το κατώφλι για να θεωρηθεί ο νυκτερινός ουρανός φωτορυσσασμένος (10 per cent  $b_n$  Smith 1979), η φωτεινότητα του ουρανού  $b_{fg}$  μετριέται με φεγγάρι ενός τετάρτου στις κατάλληλες αστρονομικές θέσεις ( $90 \mu \text{cd m}^{-2}$  e.g. Walker 1987), η φωτεινότητα  $b_m$  του νυκτερινού ουρανού όταν η φάση της σελήνης βρίσκεται στο πρώτο τέταρτο σε ύψος  $15^\circ$  και με μηδενική φωτορύπανση ( $252 \mu \text{cd m}^2$  based on Krisciunas & Schaefer 1991), η φωτεινότητα  $b_{fm}$  του ουρανού όταν πλησιάζει η πανσέληνος στις κατάλληλες αστρονομικές θέσεις ( $890 \mu \text{cd m}^2$  e.g. Walker 1987),  $b_{mw}$  είναι το κατώφλι ορατότητας του Γαλαξία για ένα μέσο κανονικό παρατηρητή ( $6 b_n$  estimate) και τέλος το κατώφλι  $b_e$  δείχνει την οξυδέρκεια του ματιού κατά τη διάρκεια της νύχτας ( $4452 \mu \text{cd m}^2$  Garstang 1986).

## **4.6 Μοντελοποίηση δεδομένων φωτορύπανσης**

Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί και αναπτυχθεί για την μοντελοποίηση της φωτορύπανσης και την επεξεργασία σχετικών δεδομένων. Το μοντέλο του Garstang [86] που προτάθηκε το 1984 είναι το πιο σύνηθες και αποτελεί τη βάση για πολλά μοντέλα που αναπτύχθηκαν μεταγενέστερα.

Χρησιμοποιεί διάφορες παραμέτρους σχετικά με το μέγεθος της υπό μελέτη πόλης και την πυκνότητα του πληθυσμού της, και αναλύεται εκτενώς παρακάτω. Διάφορα πιο νέα, αλλά λιγότερο χρησιμοποιούμενα (τουλάχιστον επί του παρόντος) μοντέλα επίσης συζητούνται.

### **4.6.1 Μοντέλο τεχνικής φωταγώγησης ουρανού του Garstang**

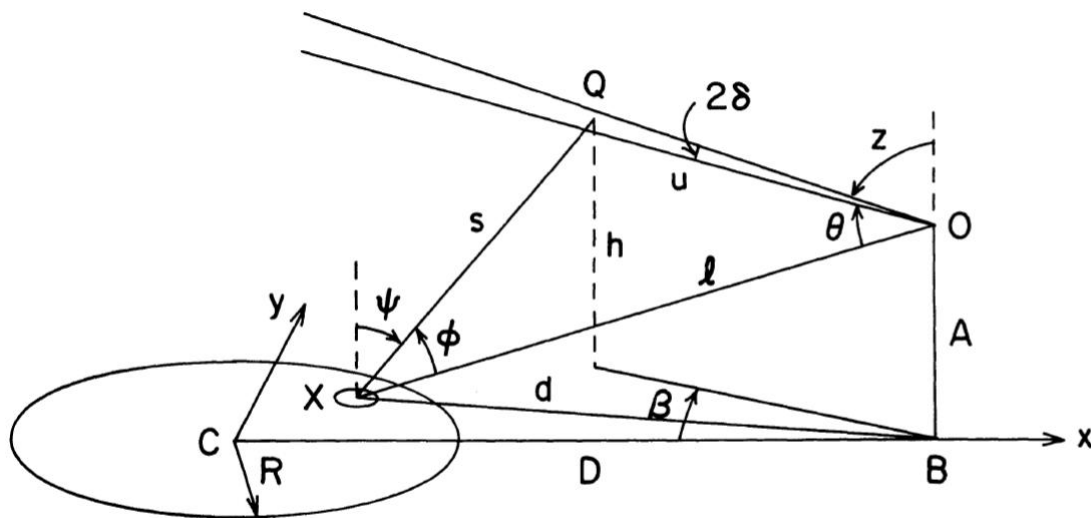
Το μοντέλο του Garstang [86] είναι ένα από τα πρώτα πλήρη μοντέλα φωτορύπανσης που λαμβάνει υπόψη φυσικές πραγματικές παραμέτρους για την πρόβλεψη της φωτεινότητας του ουρανού.

Πριν από την πρόταση αυτού του μοντέλου, είχαν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές μετρήσεις φωτορύπανσης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές [87, 92-94], αλλά λιγιστές προσπάθειες να κατασκευασθεί ένα μοντέλο που θα εξηγεί αυτές τις παρατηρήσεις [95-99].

Το μοντέλο απεικονίζεται στην εικόνα 4.4. Η πόλη εξομοιώνεται από μία κυκλική περιοχή με ομοιογενή φωτεινότητα κέντρου  $C$  και ακτίνας  $R$ . Ο παρατηρητής βρίσκεται στο σημείο  $O$ , σε ύψος  $A$  πάνω από την πόλη και απόσταση  $D$  από το κέντρο της (μετρούμενη στο επίπεδο της πόλης  $BC$ ).



Η πόλη έχει ύψος  $H$  σε σχέση με τη θάλασσα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πραγματικές πόλεις ξεφεύγουν από το μοντέλο αυτό εξαιτίας εξαιρετικά φωτεινών περιοχών τους, όπως π.χ. εμπορικά κέντρα, γήπεδα κτλ. Στο μοντέλο του Garstang, ο πληθυσμός  $P$  και η ακτίνα  $R$  των πόλεων βρίσκονται από γεωγραφικές πηγές δεδομένων.



**Εικόνα 4.4:** Σκέδαση φωτός σύμφωνα με το μοντέλο του Garstang

Αρχικά είχε προταθεί ότι ο τεχνητός φωτισμός παράγει  $L$  lumens ανά άτομο του πληθυσμού της πόλης, οπότε το συνολικό ποσό φωτός ισούται με  $L \times P$  lumens. Παρόλα αυτά, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, χρειάζεται διόρθωση του παραπάνω απλού τύπου εξαιτίας των ιδιαίτερα φωτεινών περιοχών που μπορεί να υπάρχουν σε μία πόλη. Έτσι, μετά από αρκετές προσπάθειες, δημιουργήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$LP = L_0 P \left( \frac{P}{100,000} \right)^{0.1}$$

, όπου  $LP$  το ολικό ποσό φωτός,  $P$  ο πληθυσμός και  $L_0$  μία σταθερά εκπομπής φωτός.

Ο εκθέτης  $0.1$  είναι αρκετά αβέβαιος και μπορεί να παραληφθεί στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Ο παράγοντας  $(P/100,000)$  είναι παράγοντας μεγέθυνσης της

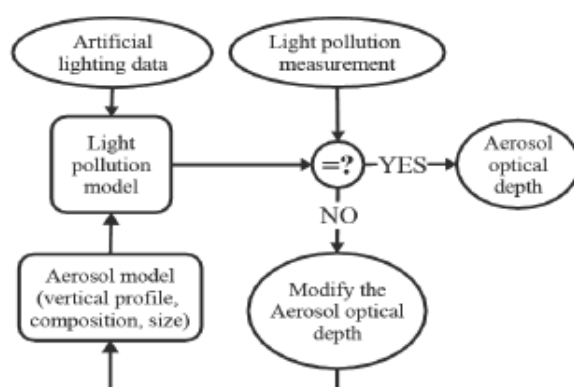
φωτεινότητας. Υπονοείται ότι μόνο ένα ποσοστό  $F$  του φωτός που παράγεται στην πόλη ακτινοβολείται προς τον ουρανό, και το υπόλοιπο ( $1/F$ ) ακτινοβολείται οριζόντια ή προς το έδαφος.

#### 4.6.2 Μοντέλο illumina

Στην μελέτη [100] παρουσιάστηκε μία νέα μέθοδος με το όνομα Illumina η οποία συνδέει πειραματικές μετρήσεις φωτεινότητας ουρανού με προβλέψεις από ένα μοντέλο φωτορύπανσης.

Το μοντέλο υπολογίζει σκέδαση φωτός λόγω των σωματιδίων της ατμόσφαιρας (αεροζόλ), καθώς και απορρόφηση φωτός από αυτά. Λαμβάνεται υπόψη η ανομοιογένεια στην εκπομπή φωτός, η φασματική εξάρτηση, και η τοπολογία του εδάφους και οι επιπτώσεις της στη σκέδαση του εκπεμπόμενου προς τα κάτω φωτός.

Η εικόνα 4.5 απεικονίζει την μεθοδολογία οπτικής πυκνότητας αεροζόλ (Aerosol Optical Density) που χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές:



**Εικόνα 4.5:** Μεθοδολογία οπτικής πυκνότητας αεροζόλ

Η φασματική μέτρηση της φωτορύπανσης γίνεται με το φασματογράφο της αναφοράς [101] ο οποίος είναι ένας τυπικός φασματογράφος με μεγάλη σχισμή και φράγμα

περίθλασης. Η μέτρηση βασίζεται στον διαχωρισμό μερικών κύριων φασματικών γραμμών που είναι χαρακτηριστικές για συγκεκριμένους τύπους λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται συχνά σε δρόμους και εμπορικούς χώρους.

Με αυτό τον τρόπο είναι σχετικά εύκολο να κατηγοριοποιηθούν οι κύριες πηγές φωτορύπανσης. Επιπλέον, οι φυσικοί παράγοντες λαμπρότητας του ουρανού (όπως π.χ. φεγγαρόφως, αστέρια κλπ) είναι εύκολο να αφαιρεθούν. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε σε εκτενή μελέτη φωτορύπανσης στην Καλιφόρνια, Γιούτα και Αριζόνα της Αμερικής [102].

Σύμφωνα με τους ερευνητές που το πρότειναν [100], η μέθοδος Illumina είναι μια σημαντική καινοτομία σε σχέση με τις παλαιότερες μεθόδους της δεκαετίας του 80 (όπως π.χ. του Garstang που αναλύθηκε προηγουμένως).

Για παράδειγμα, λαμβάνει υπόψη την ανοιμοιογένεια και πολυπλοκότητα πραγματικών περιβαλλόντων, σε αντίθεση π.χ. με το μοντέλο του Garstang που θεωρεί γωνιακές εκπομπές φωτός και ομοιογενείς ανακλάσεις από το έδαφος.

## **Κεφάλαιο 5: Ανάλυση επιπτώσεων**

### **5.1 Επιπτώσεις στην φυσιολογία των φυτών**

Η φυσιολογία των φυτών επηρεάζεται από τα σήματα που δέχονται από το περιβάλλον τους. Τα σήματα περιλαμβάνουν επιθέσεις από έντομα, τη βοσκή από μεγαλύτερα φυτοφάγα ζώα, τις αλλαγές στην θερμοκρασία, τις αλλαγές στη διαθεσιμότητα του νερού, τις αλλαγές στην ωσμωτική πίεση, τις αλλαγές στο φωτισμό κτλ.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η ευαισθησία των φυτών στους διαφορετικούς τύπους φωτισμού καθώς και οι τρόποι αντίδρασής τους στην έκθεσή τους στο φως.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι φωτοϋποδοχέων στους ιστούς των φυτών: φυτοχρώματα, κρυπτοχρώματα και φωτοϋποδοχείς τύπου phototropins. Όλοι οι

παραπάνω φωτοϋποδοχείς είναι υπεύθυνοι για την φυσιολογία και την ανάπτυξη των φυτών.

Οι φωτοϋποδοχείς λειτουργούν σαν μεταφορείς μηνυμάτων που παρέχουν στιγμιαίες πληροφορίες για τον έλεγχο μορφολογικών και φυσιολογικών λειτουργιών των φυτών.

Ο φυτοχρωμικός φωτοϋποδοχέας (φυτοχρώματα) είναι ένα φωτοηλεκτρικό κύτταρο, μια χρωστική ουσία δηλαδή που τα φυτά χρησιμοποιούν για να ανιχνεύουν το φως. Οι φυτοχρωμικές αυτές πρωτεΐνες απορροφούν κυρίως το ερυθρό και μακράν ερυθρό, είναι δηλαδή ευαίσθητα στο φως στη περιοχή του κόκκινου και του πολύ κόκκινου μέρους του ορατού φάσματος.

Πολλά ανθοφόρα φυτά χρησιμοποιούν τους συγκεκριμένους φωτοϋποδοχείς για να ρυθμίσουν το χρόνο της ανθοφορίας, με βάση το μήκος της ημέρας και της νύχτας. Ρυθμίζει επίσης και άλλα χαρακτηριστικά όπως την βλάστηση των σπόρων, την επιμήκυνση των φυτωρίων, το μέγεθος, το σχήμα και τον αριθμό των φύλλων, την σύνθεση της χλωροφύλλης κτλ. Τα φυτοχρώματα βρίσκονται στα φύλλα των περισσότερων φυτών.

Ο κρυπτοχρωμικός φωτοϋποδοχέας (κρυπτοχρώματα) είναι μια κατηγορία κυττάρων που λαμβάνουν φως στην περιοχή του μπλε μέρους του ορατού φάσματος, είναι δηλαδή ομάδα χρωστικών που απορροφούν το μπλε και το υπεριώδες φως.

Αποτελούν κύτταρα που ρυθμίζουν τη βλαστική ικανότητα, την επιμήκυνση, το φωτοπεριοδισμό και άλλες αντιδράσεις των φυτών. Τα κρυπτοχρώματα εμπλέκονται επίσης στην ανίχνευση των μαγνητικών πεδίων, σε έναν μεγάλο αριθμό φυτών.

Οι φωτοϋποδοχείς τύπου phototropins είναι ουσιαστικά αγγελιοφόροι (messengers) για την κατεύθυνση που θα πάρουν τα φυτά, προς την ανεύρεση φωτός, με στόχο την ανάπτυξή τους.

Οι φωτοϋποδοχείς παρέχουν την δυνατότητα στα φυτά να αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο, σε τέσσερις βασικές παραμέτρους του περιβάλλοντος φωτισμού:

- στην φασματική ποιότητα του φωτός,
- στην ένταση,
- στην κατεύθυνση και
- στην χρονική διάρκεια του φωτισμού τους.

Οι φωτοϋποδοχείς άλλοτε ενεργούν με ανεξάρτητο τρόπο μεταξύ τους, άλλοτε συμπληρωματικά, μερικές φορές συνεταιριστικά και μερικές φορές ανταγωνιστικά. Μερικές από αυτές τις αντιδράσεις τους είναι πολύ ευαίσθητες ακόμα και στο ελαφρύ φωτισμό, σε επίπεδα δηλαδή φωτισμού που μόλις είναι αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι, ενώ άλλες αντιδράσεις ενεργοποιούνται μόνο στις υψηλές εντάσεις φωτισμού.

Μεταξύ των πολλών διαδικασιών που επηρεάζονται από το φως είναι η βλάστηση των φυτών, η επιμήκυνση των φύλλων, η άνθιση, η ανάπτυξη των λουλουδιών τους, η καρποφορία, η διακοπή της παραγωγής φύλλων ή ακόμα και η αποκοπή των φύλλων τους. Ο φωτοπεριοδισμός θεωρείται η σημαντικότερη επίδραση του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού στη φυσιολογία των φυτών.

Ο τρόπος με τον οποίο ο τεχνητός φωτισμός επηρεάζει την φωτοπεριοδικότητα και την φυσιολογία των φυτών είναι σχεδόν τυχαίος. Γενικά, οι πιθανές οικολογικές συνέπειες των αλλαγών στα φυτά από τους αβιοτικούς παράγοντες (θερμοκρασία, υγρασία, φως), κατά την διάρκεια της άνθισής τους, δεν μελετώνται εύκολα.

Οι Cathey και Campbell (1975) [87, 88] μελέτησαν την επίδραση πέντε διαφορετικών τύπων λαμπτήρων, με ένταση φωτισμού περίπου 10 lux, που χρησιμοποιούνται για υπαίθριο φωτισμό, σε μια ευρεία ποικιλία διαφορετικών φυτών για χρονική διάρκεια 16 ωρών. Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα είναι

- λαμπτήρες πυρακτώσεως,
- λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσεως,
- λαμπτήρες μετάλλων αλογόνου,
- λαμπτήρες φθορισμού και
- λαμπτήρες ατμών υδραργύρου

Τα αποτελέσματα τις παραπάνω έρευνας συνοψίζονται ως εξής:

- Παρατηρήθηκε καθυστέρηση στην ανθοφορία κάποιων φυτών ημέρας, τύπου “short day”
- Η φυτική αύξηση ενισχύθηκε σε διάφορα φυτά τύπου δέντρων
- Παρατηρήθηκε ενίσχυση της ανθοφορίας κάποιων φυτών ημέρας τύπου “long day”
- Μερικά είδη δεν παρουσίασαν καμία μετρήσιμη μεταβολή.

Σχετικά με τους τύπους των λαμπτήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα, η αντίδραση των φυτών στον φωτισμό ήταν μεγαλύτερη στους λαμπτήρες πυρακτώσεως, αμέσως μετά στους λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσεως, στους λαμπτήρες μετάλλου αλογόνου, στους λαμπτήρες φθορισμού και τέλος στους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου [87].

Από τα παραπάνω συμπεραίνονται ότι ο τεχνητός φωτισμός έχει σημαντικές επιπτώσεις στα φυτά. Πολλά φυτά χάνουν τα φύλλα τους και πεθαίνουν είτε λόγω της αύξησης της διάρκειας της ημέρας, είτε λόγω της διακοπής της σκοτεινής νύχτας από την φωτορύπανση.

## **5.2 Επιπτώσεις στην Φυσιολογία των ζώων, πουλιών και ψαριών**

Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί ήδη για την αποτύπωση των επιδράσεων της φωτορύπανσης στη φυσιολογία των ζώων. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εξέταση των περιπτώσεων των ζώων, ο τρόπος που αντιλαμβάνονται το φως (και οι επακόλουθες λειτουργίες που ρυθμίζονται από αυτό) μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τον αντίστοιχο τρόπο που αντιλαμβάνονται το φως οι άνθρωποι.

Επιπλέον, οι περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούν μήκη κύματος που έχουν μεγάλη σημασία στην ανθρώπινη όραση. Όμως υπάρχουν οργανισμοί που βλέπουν σε διαφορετικό φάσμα από τον άνθρωπο, οπότε οι μελέτες περί των οικολογικών επιπτώσεων της φωτορύπανσης θα πρέπει να γίνουν πιο ειδικευμένες ως προς τους οργανισμούς που μελετούν.

Οι πιο χαρακτηριστικές μελέτες σε θηλαστικά, έχουν εστιάσει στα αποτελέσματα του νυκτερινού φωτισμού στην κερκαδική λειτουργία (δηλαδή στα προβλήματα διατήρησης των καθημερινών ρυθμών των βιολογικών λειτουργιών). Οι περισσότερες από αυτές έχουν πραγματοποιηθεί σε εργαστηριακές συνθήκες [88].

Μόνο δύο μελέτες [89, 90] έχουν συγκρίνει το τεχνητό φως με το φως της ημέρας σε επίπεδο αποτελεσμάτων τους στο κερκαδικό ρολόι.



Οι περιπτώσεις των θηλαστικών δεν αναλύονται περισσότερο, καθώς η εργαστηριακή φύση των περισσότερων μελετών χρήζει περισσότερης διερεύνησης. Πράγματι, πολλές μελέτες αμφισβητούν την εγκυρότητα τέτοιων μεθοδολογιών [91 -93]

Σχετικά με τα πουλιά, πολλά είδη μεταναστεύουν κατά τη διάρκεια της νύχτας. Έχει ήδη παρατηρηθεί και επιβεβαιωθεί, ότι ο τεχνητός φωτισμός αποσπά την προσοχή τους και τα αποπροσανατολίζει [94, 95]

Το οπτικό σύστημα των πουλιών διαφέρει σημαντικά από το ανθρώπινο οπτικό σύστημα, καθώς τα πουλιά διαθέτουν 7 διαφορετικούς τύπους φωτοανιχνευτικών κυττάρων (σε αντίθεση με τους 3 τύπους του ανθρώπου) [96].

Οι επιπλέον φωτοανιχνευτές στα πουλιά δίνουν τη δυνατότητα όρασης στο υπεριώδες μέρος του φάσματος [97, 98], και επίσης αλλάζουν την ευαισθησία στο ορατό. Έτσι, τα πουλιά αντιλαμβάνονται το περιβάλλον με διαφορετικό τρόπο απ' ότι ο άνθρωπος, κάτι το οποίο δυσκολεύει την ακριβή κατανόηση των επιπτώσεων της φωτορύπανσης στη φυσιολογία τους. Παρόλα αυτά κάποιες γενικές αρχές ως προς την προστασία των πουλιών από τεχνητές πηγές φωτισμού είναι αναγκαίο να ληφθούν. Παράδειγμα αποτελούν η τοποθέτηση ασπίδων φωτός σε πηγές που εκπέμπουν προς τον ουρανό ή συσκευές διάχυσης σε ψηλά κτίρια, γέφυρες κτλ.

Η ολοένα αυξανόμενη χρήση τεχνητού φωτισμού από τον άνθρωπο, επίσης επηρεάζει πολλούς υδροβιότοπους (είτε στη θάλασσα ή σε λίμνες) και άρα τα ψάρια που ζουν σε αυτούς [99], καθότι η πλειονότητα των πόλεων παγκοσμίως βρίσκεται κοντά σε κάποια θάλασσα ή λίμνη. Τα ψάρια μπορούν να συνηθίζουν και να προσαρμόζονται σε μικρό ποσοστό φωτός κατά τη διάρκεια της νύχτας [100], αλλά η φωτορύπανση έχει αλλάξει δραστικά την ένταση και το φάσμα του φωτός στο οποίο πλέον εκτίθενται.

Διάφορες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε πολλά είδη ψαριών (π.χ. τόνος, σολομός, μπακαλιάρος, πέστροφα κτλ) και έχει βρεθεί ότι η πλειονότητα των βιολογικών λειτουργιών τους όπως και η μετανάστευσή τους εξαρτάται από το φως, και επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη τεχνητού φωτός. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια, είτε πρόκειται για ψάρια αλμυρού είτε για ψάρια γλυκού νερού [101].

### **5.3 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη φυσιολογία**

Ορισμένες επιπτώσεις στην ανθρώπινη φυσιολογία αναλύθηκαν και σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας πτυχιακής. Όπως ειπώθηκε, παρά τη διαθεσιμότητα του τεχνητού (ηλεκτρικού) φωτός κατά τη διάρκεια ενός και πλέον αιώνα, τα πιθανά δυσμενή αποτελέσματά του στον άνθρωπο μόνο μερικώς έχουν γίνει κατανοητά έως τώρα [102].

Πρόσφατες έρευνες που επικεντρώνονται στη σύνδεση μεταξύ του φωτός και του καρκίνου έχουν δείξει ότι το φως και ειδικά ο φωτισμός νύχτας μπορούν πραγματικά να αποτελέσουν ένα μείζον ζήτημα δημόσιας υγείας [103, 104]. Οι βιομηχανικές χώρες παρουσιάζουν πενταπλάσιο ή ακόμα υψηλότερο κίνδυνο καρκίνου του μαστού από τις λιγότερες βιομηχανικές χώρες [105], και υπάρχει αυξανόμενη υποστήριξη της άποψης ότι η κερκαδική διαταραχή λόγω των διάφορων πτυχών της σύγχρονης ζωής είναι σημαντικοί παράγοντες στην αύξηση του καρκίνου του μαστού [106-108].

Μελέτες σε εργαζόμενους νυχτερινής βάρδιας (που εκτίθενται σε τεχνητό φωτισμό σε ώρες που θα επικρατούσε σκοτάδι) έχουν δείξει υψηλό κίνδυνο καρκίνου του μαστού [109-111], ενώ μελέτες σε τυφλές γυναίκες έχουν δείξει μειωμένο κίνδυνο [112-114].

Η πλειοψηφία των πρόσφατων ερευνών στρέφεται στο ρόλο του υπερβολικού φωτός κατά τη διάρκεια της νύχτας, παρά στο ρόλο της απουσίας σκοταδιού κατά τη διάρκεια της νύχτας. Σχετικά με το πώς οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται τον ανεπιθύμητο τεχνητό φωτισμό από υπαίθριες πηγές κατά τη διάρκεια της νύχτας, έρευνα στην Τσεχία αποκάλυψε ότι 5% του πληθυσμού θεωρεί το ανεπιθύμητο τεχνητό φως ως μια από τις δύο κύριες αιτίες των προβλημάτων ύπνου τους.

Περαιτέρω 7% παραπονέθηκε για αυξημένα ποσά φωτός που δεν μειώνονται αλλά αντιθέτως ολοένα και αυξάνονται, ενώ 20% έχει ήδη λάβει μέτρα μείωσης της

φωτορύπανσης των κρεβατοκάμαρων τους, ώστε αυτές να είναι σε σκοτεινά επίπεδα. Εντούτοις, 5% του τσεχικού πληθυσμού αισθάνεται δυστυχισμένο που χάνει το πλήρες φυσικό φως του πρωινού, λόγω των εμποδίων που έχει θέσει ενάντια στον τεχνητό φωτισμό νύχτας. Οι συντάκτες της έρευνας προτείνουν ένα επίπεδο φωτός κατώτατων ορίων (ένταση φωτισμού προσώπου) κάτω από ένα millilux.

Οι περισσότερες μελέτες σχετικά με το ρόλο του σκοταδιού στην ανθρώπινη φυσιολογία έχουν γίνει σε ανθρώπους που εργάζονται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στις μελέτες αυτές δεν είναι όμως γνωστό αν οι επιβλαβείς επιπτώσεις του τεχνητού φωτισμού οφείλονται στις προκαλούμενες κίρκαδικές αλλαγές και διαταραχές [115-117] ή οφείλονται στην παρουσία φυσικού φωτός κατά τη διάρκεια του ύπνου των εργαζομένων, ο οποίος πραγματοποιείται αναγκαστικά σε πρωινές ώρες [118].

Περισσότερες μελέτες είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν για την ακριβή ταυτοποίηση των βλαβερών συνεπειών της φωτορύπανσης στη φυσιολογία καθώς και στις βιολογικές δραστηριότητες του ανθρώπου.

## **Κεφάλαιο 6: Επίλογος**

### **6.1 Συμπεράσματα**

Η κατανόηση των οικολογικών αποτελεσμάτων της φωτορύπανσης είναι σε πρώιμο στάδιο και χρειάζεται επειγόντως περαιτέρω έρευνα, με ταυτόχρονη διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ επιστημόνων, φυσικών, μηχανικών, ιατρών, βιολόγων και οικολόγων.

Σε ότι αφορά τις περιβαλλοντικές πτυχές της φωτορύπανσης, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε τομείς όπως η μέτρηση των χαρακτηριστικών του φωτός και η κατανόηση των τροπικών και υδρόβιων οικοσυστημάτων [38].

Όσον αφορά την ανθρώπινη φυσιολογία, υπάρχει ήδη έντονη έρευνα που εξετάζει την πιθανή καρκινογόνο επίδραση του τεχνητού φωτισμού της νύχτας, αλλά η γνώση σχετικά με την επιρροή των σκοτεινών περιόδων ή των «σκοτεινών στιγμών» στην ανθρώπινη φυσιολογία είναι μάλλον άγνωστη.

Κάποια έρευνα τέλος αφιερώνεται σε μελέτες σχετικά με τα καθεστώτα εργασίας σε νυχτερινές βάρδιες και τον τρόπο που αυτές επιδρούν στην ανθρώπινη φυσιολογία.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Berry, Richard L. "Light Pollution in Southern Ontario." *The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 70, no. 3 (1976): 97-115
- [2] Walker, Merle F. "The California Site Survey." *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 82 (1970): 672-698, Walker, Merle F, «Light Pollution in California and Arizona." *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 85, no. 507 (1973): 508-519
- [3] Longcore, T., and C. Rich. "Ecological Light Pollution." *Frontiers in Ecology and the Environment* 2, no. 4 (2004): 191-198.
- [4] Rea, M.S., M.G. Figueiro, and J.D. Bullough. "Circadian Photobiology: An Emerging Framework for Lighting Practice and Research." *Lighting Research and Technology* 33, no. 3 (2002): 177-190.
- [5] Major, Mark, Jonathan Speirs, and Anthony Tischhauser. *Made of Light: The Art of Light and Architecture*. Birkhauser, 2005.
- [6] Garstang, P.A. "Model for Night Illumination." *Publications of the Pacific* 98 (1976): 354-375
- [7] Cinzano, P., F. Falchi, and C.D. Elvidge. "The First World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 328, no. 3 (2001): 689-707.
- [8] Michele W. McColgan, "Light Pollution," *National Lighting Product Information Program (NLPIP) Lighting Answers* 7, issue 2 (2007),
- [9] Mizon, Bob. *Light Pollution: Responses and Remedies*. London: Springer, 2002.
- [10] Miller, Mark W. "Apparent Effects of Light Pollution on Singing Behavior of American Robins." *The Condor* 108, no. 1 (2006): 130-139.
- [11] Nicholas, Mark. "Light Pollution and Marine Turtle Hatchlings: The Straw That Breaks the Camel's Back?" *The George Wright Forum* 18, no. 4 (2001): 77-82.

- [12] Stephen M. Pauley, "Lighting for the Human Circadian Clock: Recent Research Indicates that Lighting has become a Public Issue," *Medical Hypothesis* 63, no.4 (2004): 588-596.
- [13] [www.darksky.org/](http://www.darksky.org/)
- [14] [http://www.iau.org/science/scientific\\_bodies/commissions/50/](http://www.iau.org/science/scientific_bodies/commissions/50/)
- [15] Purves D. *Neuroscience*. 2nd edition. Sunderland. Sinauer Associates, Inc.
- [16] Berson, DM, Dunn FA, Takao M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295:10.
- [17] Stockman A, Sharpe LT. 2000. Spectral sensitivities of the middle and long wavelength sensitive cones derived from measurements of observers of known genotype. *Vision Res.* 40:1711-1737. The photopic sensitivity data, together with the standard CIE scotopic data. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://cvision.ucsd.edu/> [2006 December 14].
- [18] Koskoschka S. 1997. Das V(λ) Dilemma in der Photometrie. Proceedings of 3. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuch, TU Ilmenau, Ilmenau.
- [19] Eloholma M, Ketomäki J, Halonen L. 2004. Luminances and visibility in road lighting conditions, measurements and analysis. Report 30. Helsinki University of Technology, Lighting Laboratory. 27 p.
- [20] Schlyter P. Online article. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html> [2007 January 29].
- [21] Anon. UBV System. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.answers.com/UBV%20system> [2007 June 17].
- [22] Anon. Wikipedia. Luminous intensity. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\_intensity](http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_intensity) [2006 December 14].
- [23] Anon. Wikipedia. Luminous flux. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\_flux](http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_flux) [2006 December 14].
- [24] Sprawls P. Radiation Quantities and Units. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.sprawls.org/ppmi2/RADQU/> [2006 December 14].

- [25] Anon. Wikipedia. Luminous efficacy. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\_efficacy](http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficacy) [2006 December 14].
- [26] Halonen L, Lehtovaara J. 1992. Valaistustekniikka [In finnish: Illumination engineering]. Otatieto, Espoo, Finland.
- [27] Anon. Outdoor Lighting Code. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.darksky.org/>  
[2007 January 31].
- [28] Anon. Philips. Lighting Product Catalogue. Lamps & Gear. [2007 January 31].
- [29] Anon. National Lighting Product Information Program (NLPIP). Light Pollution Q & A. Online article. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο:  
<http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlPIP/lightinganswers/lightpollution/abstract.asp>  
[2007 January 31].
- [30] Isobbe S. Light pollution. Space Science
- [31] Anon. Wikipedia. Luminous efficacy. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous\\_efficacy](http://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficacy) [2006 December 14].
- [32] Schwartz HE. 2003. Light Pollution Control: WorldWide Effects of and Efforts to Reduce Light Pollution. In a publication: Heck A. (ed.). Organizations and Strategies in Astronomy, Vol 4. Kluwer Academic Publishers. Pp. 3757.
- [33] Philips. 2005. Philips highlights the massive financial & environmental potential of new energy and CO2 saving lighting technologies. Press release. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο:  
[http://www.lighting.philips.com/gl\\_en/news/press/product\\_innovations/archive\\_2005/financial\\_environmental.php?main=global&parent=4390&id=gl\\_en\\_news&lang=en](http://www.lighting.philips.com/gl_en/news/press/product_innovations/archive_2005/financial_environmental.php?main=global&parent=4390&id=gl_en_news&lang=en)  
[2006 November 30].
- [34] Mizon, Bob. Light Pollution: Responses and Remedies. London: Springer, 2002
- [35] Hollan J. Why the sky over your town and even far from it glows so much? Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://amper.ped.muni.cz/light/drafts/graphics/> [2006 December 13].
- [36] Bortle JE. The Bortle DarkSky Scale. Online article. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο:  
<http://skytonight.com/resources/darksky/3304011.html?page=1&c=y> [2006 December 31].

- [37] Anon. 1997: Minimizing Sky Glow, CIE 1261997. Commission Internationale de l'Eclairage.
- [38] Longcore T, Rich C. 2004. Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2(4):191–198.
- [39] Longcore, T., and C. Rich. "Ecological Light Pollution." *Frontiers in Ecology and the Environment* 2, no. 4 (2004): 191-198.
- [40] Berson, DM, Dunn FA, Takao M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295:10.
- [41] Major, Mark, Jonathan Speirs, and Anthony Tischhauser. *Made of Light: The Art of Light and Architecture*. Birkhauser, 2005.
- [42] Hill D. 1990. The impact of noise and artificial light on waterfowl behaviour: a review and synthesis of the available literature. Norfolk, United Kingdom: British Trust for Ornithology Report No. 61.
- [43] Rich C, Longcore T. 2005. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington DC, USA.
- [44] Gal G, Loew ER, Rudstam LG, Mohammadian AM. 1999. Light and diel vertical migration: spectral sensitivity and light avoidance by *Mysis relicta*. *Can J Fish Aquat Sci* 56: 311–322.
- [45] Rydell J. 1992. Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Funct Ecol* 6:744–750.
- [46] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.astronomia.gr](http://www.astronomia.gr)
- [47] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [www.enet.gr](http://www.enet.gr)
- [48] Anon. IDA International DarkSky Association. International outdoor lighting regulations.
- [49] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.saiglobal.com/>
- [50] Anon. The Town of Mississippi Mills, Ontario, Canada. Light Pollution ByLaw.
- [51] Michele W. McColgan, "Light Pollution," National Lighting Product Information Program (NLPPIP) Lighting Answers 7, issue 2 (2007),



- [52] Anon. CONAMA, Comisión Nacional del Medio Ambiente Presentación contaminación lumínica [In Spanish: National Commission of Environment Presentation of Light Pollution].
- [53] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.astro.cz/darksky/>
- [54] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: [http://www.astro.cz/darksky/eu\\_law/](http://www.astro.cz/darksky/eu_law/)
- [55] Άρθρα 10 και 11 του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας (Νόμος 2969/1999).
- [56] Π.Δ. της 1-12-1999 «... για το Εθνικό Θαλάσσιο Πάρκο Ζακύνθου», Φ.Ε.Κ. 906/Δ/1999.
- [57] Anon. 2003. CIE: Publication No. 150 Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations
- [58] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/>
- [59] Cinzano P. Laws against light pollution in Italy. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.lightpollution.it/cinzano/en/page95en.html> [2006 December 13].
- [60] Anon. Golden Bay (NZ).
- [61] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.iac.es/proyect/>
- [62] Anon. Pilot programme in Catalunya.
- [63] Anon. Ley de ordenación ambiental de la iluminación exterior para la protección del medio nocturno [in Spanish: Law on regulating ambient lighting for the protection of night environment].
- [64] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.albufera.com/>
- [65] Anon. Ecolight Project [2006 December 13].
- [66] <http://www.somerset.gov.uk/somerset/council/>
- [67] Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://amper.ped.muni.cz/noc/english>
- [68] Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. 2001. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. J. Neurosci. 21:6405-6412.

- [69] Purves D, Fitzpatrick D, Augustine GJ, Katz LC, Lawrence C, LaMantia AS, McNamara JO, Mark WS. 2001. Neuroscience. 2nd edition. Sunderland. Sinauer Associates, Inc.
- [70] Hankins MW, Lucas RJ. 2002. The primary visual pathway in humans is regulated according to long-term light exposure through the action of a nonclassical photopigment. *Curr Biol.* 12:191-198.
- [71] Stockman A, Sharpe LT, Fach CC, 1999, The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones. *Vision Research*, 39, 2901-2927. Τα δεδομένα ανακτήθηκαν από τη σελίδα: <http://cvision.ucsd.edu/>
- [72] Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A. 2005. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Res Brain Res Rev.* 50(2):213-228.
- [73] Forejt M, Hollan J, Skopovský, Skotnice R. 2004. Sleep disturbances by light at night: two queries made in 2003 in Czechia. Poster at Cancer and Rhythm, Oct 14-16, Graz, Austria, 2004. Διαθέσιμο στη σελίδα: [http://amper.ped.muni.cz/noc/english/canc\\_rhythm/g\\_sleep.pdf](http://amper.ped.muni.cz/noc/english/canc_rhythm/g_sleep.pdf)
- [74] Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://sait.oat.ts.astro.it/MSAIS/>
- [75] Anon. Unihedron Sky Quality Meter (SQM). Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://unihedron.com/projects/darksky/>
- [76] Danko A. Clear Sky Clock. Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://cleardarksky.com/csk/>
- [77] Διαθέσιμο στη σελίδα: [www.lightpollution.it/download/](http://www.lightpollution.it/download/)
- [78] Garstang, P.A. " Model for Night Illumination." *Publications of the Pacific 98* (1976): 354-375
- [79] Walker MF. 1973. Light Pollution in California and Arizona
- [80] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.albufera.com/>
- [81] Anon. 1997: Minimizing Sky Glow, CIE 1261997. Commission Internationale de l'Eclairage.
- [82] Διαθέσιμο στο διαδίκτυο: <http://www.saiglobal.com/>

- [83] Longcore, T., and C. Rich. "Ecological Light Pollution." *Frontiers in Ecology and the Environment* 2, no. 4 (2004): 191-198.
- [84] Cinzano P. 2006. Recent progresses on a second world atlas of the night-sky brightness - Iptran/Ipdart realistic models, tomography of light pollution, accurate validation methods and extended satellite data analysis. IAU Comm. 50 Working Group Light Pollution, XXVI IAU General Assembly, Praha 23 August 2006. Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://www.inquinamentoluminoso.it/download/iau06cinzano.pdf> [
- [85] Anon. DIALux Manuals. English version. Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://www.dial.de/CMS/English/Articles/DIALux/Download/Handbuecher.html?ID=42>
- [86] Anon. 1997: Minimizing Sky Glow, CIE 1261997. Commission Internationale de l'Eclairage.
- [87] Cathey HM, Campbell LE. 1975. Effectiveness of five visionlighting sources on photoregulation of 22 species of ornamental plants. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 100:6571.
- [88] Cathey HM, Campbell LE. 1975. Security lighting and its impact on the landscape. *Journal of Arboriculture* 1:181187.
- [89] Gwinner E. 1986. Circannual rhythms: endogenous annual clocks in the organization of seasonal processes. Springer-Verlag, Berlin.
- [90] Sharma VK, Chandrashekar MK, Nongkynrih P. 1997. Daylight and Artificial Light Phase Response Curves for the Circadian Rhythm in Locomotor Activity of the Field Mouse *Mus booduga*. *Biological Rhythm Research* 28(Suppl. 1):39-49.
- [91] Joshi D, Chandrashekar MK. 1985. Spectral sensitivity of the photoreceptors responsible for phase shifting the circadian rhythm of activity in the bat, *Hipposideros speoris*. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 156(2):189-198.
- [92] Patel HI, Gupta GD. 1984. A problem of equivalence in clinical trials. *Biometrical journal* 26(5): 471-474.
- [93] McBride GB, Loftis JC, Adkins NC. 1993. What do significance tests really tell us about the environment? *Environmental Management* 17(4):423-432.

- [94] Johnson DH. 1999. The insignificance of statistical significance testing. *Journal of Wildlife Management* 63:763-772.
- [95] Murie OJ. 1959. Fauna of the Aleutian Island and Alaska Peninsula. *US Fish and Wildlife Service North American Fauna* 61:1-364.
- [96] Herbert AD. 1970. Spatial disorientation in birds. *Wilson Bulletin* 82:400-419.
- [97] Hart NS. 2001. The visual ecology of avian photoreceptors. *Prog Retin Eye Res.* 20(5):675-703.
- [98] Vorobyev M, Osorio D, Bennett AT, Marshall NJ, Cuthill IC. 1998. Tetrachromacy, oil droplets and bird plumage colours. *J Comp Physiol [A]*. 183(5):621-633
- [99] Vorobyev M. 2003. Coloured oil droplets enhance colour discrimination. *Proc Biol Sci.*270(1521):1255-1261.
- [100] Marsh WM, Grossa JM Jr. 2002. *Environmental geography: science, land, use, and Earth Systems*. Second edition. John Wiley & Sons, New York
- [101] Hobson ES, McFarland WN, Chess JR. 1981. Crepuscular and nocturnal activities of Californian nearshore fishes, with consideration of their scotopic visual pigments and the photic environment. *Fishery Bulletin* 79:1-30.
- [102] Walker MF. 1973. *Light Pollution in California and Arizona*
- [103] Berson, DM, Dunn FA, Takao M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295:10.
- [104] Bullough JD, Rea MS, Figueiro MG. 2006. Of mice and women: Light as a circadian stimulus in breast cancer research. *Cancer Causes and Control* 17(4):375-383.
- [105] Pauley SM. 2004. Lighting for the Human Circadian Clock. Recent research indicates that lighting has become a public health issue. Online article. Διαθέσιμο στη σελίδα: <http://www.darksksociety.org/handouts/pauley.pdf>
- [106] Parkin DM, Bray FI, Devesa SS. 2001. Cancer burden in the year 2000: the global picture. *Eur J Cancer* 37:S4-S66

- [107] Stevens RG, Rea MS. 2001. Light in the built environment: potential role of circadian disruption in endocrine disruption and breast cancer. *Cancer Causes Control* 12:279–287
- [108] Erren TC, Reiter RJ, Piekarski C. 2003. Light, timing of biological rhythms, and chronodisruption in man. *Naturwissenschaften*. 90(11):485-494
- [109] Hastings MH, Reddy AB, Maywood ES. 2003. A clockwork web: circadian timing in brain and periphery, in health and disease. *Nat Rev Neurosci* 4:649–661.
- [110] Pukkala E, Auvinen A, Wahlberg G. 1995. Incidence of cancer among Finnish airline cabin attendants, 1967–92. *Brit Med J* 311:649–652.
- [111] Hansen J. 2001. Increased breast cancer risk among women who work predominantly at night. *Epidemiology* 12:74–77.
- [112] Schernhammer ES, Laden L, Speizer FE, et al. 2001. Rotating night shifts and risk of breast cancer in women participating in the Nurses' Health Study. *JNCI* 93:1563–1568.
- [113] Feychting M, Österlund B, Ahlbom A. 1998. Reduced cancer incidence among the blind. *Epidemiology* 9:490–494.
- [114] Hahn RA. 1991. Profound bilateral blindness and the incidence of breast cancer. *Epidemiology* 2:208–210.
- [115] Czeisler CA, Johnson MP, Duffy JF, Brown EN, Ronda JM, Kronauer RE. 1990. Exposure to bright light and darkness to treat physiologic maladaptation to night work. *N Engl J Med* 322:1253–1259
- [116] Dawson D, Campbell SS. 1991. Timed exposure to bright light improves sleep and alertness during simulated night shifts. *Sleep* 14:511–516.
- [117] Dawson D, Encel N, Lushington K. 1995. Improving adaptation to simulated night shift: timed exposure to bright light versus daytime melatonin administration. *Sleep* 18:11–21.
- [118] Van Cauter E, Turek FW. 1990. Strategies for resetting the human circadian clock. *N Engl J Med* 322:1306–1308.