

**“ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΛΑΜΠΤΗΡΩΝ LED: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ
ΣΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥΣ ΣΤΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ”**

Επιβλέπων Καθηγητής:
Σπουδαστής:

ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΓΑΛΑΝΑΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ

ΑΜ: 34606

Αθήνα

Οκτώβριος 2017

Copyright © Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ίδρυματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και την αδερφή μου που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	iv
Περιεχόμενα	v
Λίστα σχημάτων.....	vii
Λίστα πινάκων.....	vii
Summary	x
Πρόλογος	1
1^ο Κεφάλαιο “Εισαγωγή στον Φωτισμό”	1
1.1 Ο φωτισμός γενικά	1
1.2 Φωτομετρικά μεγέθη	2
1.2.1 Στερεά γωνία	2
1.2.2 Φωτεινή ροή (luminous flux)	3
1.2.3 Φωτεινή ένταση ή Φωτοβολία (luminous intensity)	4
1.2.4 Ένταση φωτισμού (illuminance).....	5
1.2.5 Λαμπρότητα (luminance)	5
1.2.6 Φωτεινή ενέργεια.....	6
1.2.7 Ολική φωτεινή ροή	7
1.2.8 Φωτεινή απόδοση (Luminous efficacy).....	7
1.2.9 Θερμοκρασία χρώματος (Color Correlation Temperature, CCT).....	7
1.2.10 Δείκτης χρωματικής απόδοσης (Color Rendering, Ra).....	8
1.3 Πηγές φωτός.....	10
2^ο Κεφάλαιο “Η τεχνολογία του φωτισμού led”	14
2.1 Λαμπτήρες LED	14
2.2 Βασική αρχή λειτουργίας.....	15
2.2.1 Αρχή λειτουργίας διόδου.....	15
2.2.2 Αρχή λειτουργίας φωτοδίοδου (LED).....	16
2.3 Ιστορικό της τεχνολογίας LED	20
2.4 Χαρακτηριστικά των λαμπτήρων LED	20
2.5 Πλεονεκτήματα λαμπτήρων LED	20
2.6 Μειονεκτήματα λαμπτήρων LED	23
2.7 Εφαρμογές των LED’s.....	28
2.8 Τύποι προϊόντων LED για φωτισμό.....	24
2.9 Ρύθμιση των LED.....	25
2.9.1 Οδηγοί LED.....	25
2.9.2 Οδηγοί σταθερής τάσης.....	26
2.9.3 Οδηγοί σταθερού ρεύματος.....	26
2.9.4 Επιλογή οδηγού LED.....	27
2.10 Έλεγχος ισχύος και φωτεινής ροής.....	28
3^ο Κεφάλαιο “Ποιότητα ισχύος”	30
3.1 Αρμονικές	30
3.1.1 Ορισμός-περιγραφή	30
3.1.2 Κατηγοριοποίηση.....	31
3.1.3 Κανονισμοί	32
3.2 Αίτια.....	35
3.2.1 Μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος.....	35
3.2.2 Φόρτιση πυκνωτή.....	36
3.2.3 Ηλέκτριση μετασχηματιστή	38
3.3 Επίδραση αρμονικών στο ηλεκτρικό δίκτυο και τον εξοπλισμό	38
3.4 Παρακολούθηση ποιότητας ισχύος (power quality)	39
3.5 Τρόποι μείωσης προβλημάτων λόγω αρμονικών.....	40

3.6	Αρμονικές από τη λειτουργία των LED.....	41
3.6.1	Εισαγωγή.....	41
3.6.2	Πρότυπα αρμονικών και βασική λειτουργία LED.....	42
3.6.3	Αρμονικές που παράγονται από τα ρυθμιζόμενα LED.....	42
3.6.4	Σύγκριση με άλλου τύπου λαμπτήρες (CFL).....	43
3.6.5	Επίδραση LED στην ποιότητα ισχύος ενός συστήματος διανομής.....	44
4^ο	Κεφάλαιο “Επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό και το περιβάλλον”	55
4.1	Αντικατάσταση λαμπτήρων πυρακτώσεως και φθορισμού.....	55
4.1.1	Επίδραση Στο Περιβάλλον.....	55
4.1.2	Επίδραση Στην Ανθρώπινη Υγεία.....	73
4.1.3	Απόρριψη και ανακύκλωση.....	81
4.1.4	Προτάσεις αντικατάστασης με led.....	86
4.2	Νομοθεσία ΕΕ.....	90
5^ο	Κεφάλαιο “Συμπεράσματα και προτάσεις”	92
	Βιβλιογραφία.....	95

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1	Απεικόνιση στερεάς γωνίας (Πηγή: Μήτσου Γ., 2016).....	3
Σχήμα 2	Πολικό διάγραμμα καμπύλης έντασης και φωτομετρικό στερεό (Πηγή: Μήτσου Γ., 2016).....	4
Σχήμα 3	Διαφορετική λαμπρότητα πηγών ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικών διαστάσεων (Ιωαννίδης, 2016).....	5
Σχήμα 4	Δίοδος (Coolweb.gr, 2017).....	15
Σχήμα 5	Βασική αρχή λειτουργίας του LED (Ledvance.gr, 2017)	17
Σχήμα 6	Λειτουργία φωτοδιόδου LED (Coolweb.gr, 2017)	18
Σχήμα 7	Λαμπτήρας LEDi και το σύστημα ελέγχου του (Biery et al., 2014).....	25
Σχήμα 8	Φωτιστικό σύστημα LED με τον οδηγό και το σύστημα ελέγχου του (Biery et al., 2014).....	25
Σχήμα 9	Παράδειγμα οδηγού σταθερής τάσης.....	26
Σχήμα 10	Παράδειγμα οδηγού σταθερού ρεύματος.....	27
Σχήμα 11	Παραμόρφωση ρεύματος προκαλούμενη από μη γραμμική αντίσταση (Πηγή: Μιχαλάκος, 2007).....	30
Σχήμα 12	Ανάλυση ημιτονοειδούς σήματος, όπου διακρίνονται οι αρμονικές 1ης, 3ης, 5ης και 7ης τάξης (Πηγή: ‘Seman’, 2012).....	31
Σχήμα 13	Προτεινόμενα όρια αρμονικών στο πρότυπο IEC 61000-3-4 (Πηγή: ‘ABB’, 2013).....	34
Σχήμα 14	Αρμονικές τάσης από DC/AC inverter (Πηγή: ‘NTUA’, 2007).....	36
Σχήμα 15	Μεταβολή αρμονικών τάσης εξόδου σε UPS 20 kVA (Πηγή: ‘NTUA’, 2007)....	37
Σχήμα 16	Αρμονικές τάσης πριν και μετά την ηλέκτριση μετασχηματιστή (στη δεύτερη αρμονική παρατηρείται το φαινόμενο σχήμα προστασίας) (Πηγή: ‘NTUA’, 2007)	38
Σχήμα 17	Σε σειρά ενεργό και παθητικό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο (s τα στοιχεία της γεννήτριας, C τα στοιχεία του ενεργού, F του παθητικού φίλτρου και L τα στοιχεία του καταναλωτή) (Πηγή: Πληθάρας, 2012).....	40
Σχήμα 18	Αυτόματη συστοιχία πυκνωτών (Πηγή: Μιχαλάκος, 2007).....	41
Σχήμα 19	Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ απλών και ρυθμιζόμενων LED (Πηγή: Sohel et al., 2013)	43
Σχήμα 20	Κυματομορφές ρεύματος και αρμονικό φάσμα που λαμβάνεται από πολυάριθμες δοκιμές λαμπτήρων LED (Turkish Journal of EECS, 2014).....	46
Σχήμα 21	Μοντέλο LED που αναπτύχθηκε στο MATLAB Simulink. (Turkish Journal of EECS, 2014).....	47
Σχήμα 22	Δίκτυο διανομής προσομοίωσης (Turkish Journal of EECS, 2014).....	48
Σχήμα 23	Κυματομορφές τάσης της πλευράς 0,4Kv με λαμπτήρες πυρακτώσεως. (Turkish Journal of EECS, 2014).....	51
Σχήμα 24	Κυματομορφές τάσης της πλευράς 0,4Kv με 80% λαμπτήρες LED.(Turkish Journal of EECS, 2014).....	52
Σχήμα 25	Κυματομορφές τάσης της πλευράς 0,4Kv λαμπτήρες LED. (Turkish Journal of EECS, 2014).....	53
Σχήμα 26	Διαταραχές τάσης σε διάφορα σενάρια με βάση το πρότυπο IEC 61000-2-2 (Turkish Journal of EECS, 2014).....	54
Σχήμα 27	Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα για το 2015 στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Πηγή: Eurostat, 2017).....	55

Σχήμα 28 Τελική κατανάλωση ενέργειας νοικοκυριών για το 2015 στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Πηγή: Eurostat, 2017).....	56
Σχήμα 29 Οι συνολικές εκπομπές CO ₂ της ΕΕ από το 1990 (Πηγή: Eurostat, 2012).	57
Σχήμα 30 Κατανομή ηλεκτρικής κατανάλωσης σε ένα τυπικό εμπορικό κέντρο (Πηγή: Δρακάκης, 2011).....	59
Σχήμα 31 Το ενεργειακό αποτύπωμα του κύκλου ζωής ενός λαμπτήρα. (Πηγή: Θεοφιλίδη, 2016).	59
Σχήμα 32 Ποσοστό χρήσης διάφορων τύπων λαμπτήρων στην ΕΕ για οδικό φωτισμό και για τη βιομηχανία (Πηγή: LTG, ‘Buy smart’, 2012).....	60
Σχήμα 33 Σύγκριση απόδοσης λαμπτήρων σε Lumen/Watt (εξαιρούνται οι απώλειες από τα στραγγαλιστικά πηνία) (Πηγή: LTG, ‘Buy smart’, 2012).	61
Σχήμα 34 Ο αριθμός λαμπτήρων πυρακτώσεως, φθορισμού και LEDs που απαιτούνται για 20 χιλιάδες ώρες φωτισμού (Πηγή: ‘U.S.DOE’, 2013).	61
Σχήμα 35 Η εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής των λαμπτήρων στο νερό, στο έδαφος, στον αέρα και στους πόρους (Πηγή: ‘U.S.DOE’, 2013).....	63
Σχήμα 36 Η κατανάλωση ενέργειας στον κύκλο ζωής των λαμπτήρων πυρακτώσεως, αλογόνου, φθορισμού και LED παλιάς και νέας γενιάς (Πηγή: ‘U.S.DOE’, 2013).	64
Σχήμα 37 Οι γενικές επιπτώσεις του υδραργύρου (Hg) των λαμπτήρων ισοδύναμων με 100W στη διάρκεια ζωής ενός CFL (Πηγή: ‘NRDC’, 2011)	66
Σχήμα 38 Η εξοικονόμηση ενέργειας έως το 2020 θα μειώσει τις εκπομπές υδραργύρου από τον οικιακό φωτισμό περισσότερο από το μισό στις ΗΠΑ (Πηγή: ‘NRDC’, 2011).....	67
Σχήμα 39 Κατάταξη της ακτινοβολίας	69
Σχήμα 40 Τα είδη της φωτορύπανσης (Πηγή: Νικολάου, 2013)	72
Σχήμα 41 Λανθασμένη και σωστή τοποθέτηση οδηγεί σε αύξηση ή μείωση του ανεπιθύμητου φωτισμού αντίστοιχα (Πηγή: Νικολάου, 2013).	75
Σχήμα 42 Συσχέτιση της αντηλιάς, τα επίπεδα λαμπρότητας του οδοστρώματος με την ηλικία (Πηγή: Νικολάου, 2013).	76
Σχήμα 43 Πρακτική ενημέρωσης των πολιτών για την ασφάλεια χρήσης των λαμπτήρων από το Υπουργείο Υγείας Κύπρου (Πηγή: ‘Εθνική Επιτροπή Κύπρου’, 2012).	80
Σχήμα 44 Ποσοστό συγκέντρωσης διαφόρων στοιχείων των λαμπτήρων πυρακτώσεως, φθορισμού και LEDs καθώς και κινητών τηλεφώνων σε σχέση με τα επιτρεπόμενα όρια της Πολιτείας της Καλιφόρνια (Πηγή: ‘U.S.DOE’, 2013)	81
Σχήμα 45 Η διαδικασία ανακύκλωσης λαμπτήρων φθορισμού μέσω σπασίματος με θερμική διεργασία (Πηγή: EcoLights).	85
Σχήμα 46 Οικονομικά και ποιοτικά κριτήρια επιλογής συστήματος φωτισμού των καταναλωτών (Πηγή: ‘Sustainable lighting’, 2015).....	87
Σχήμα 47 Φωτεινή απόδοση ηλεκτρικών λαμπτήρων στο πέρασμα των χρόνων (Δρακάκης, 2011)	92
Σχήμα 48 Πρόβλεψη εξοικονόμησης ενέργειας σε διάφορους τομείς μέχρι το 2030 (Πηγή: Καρυστηναίου, 2014).....	93
Σχήμα 49 Προβλέψεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2030 (Πηγή: Καρυστηναίου, 2014).....	94

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	Τυπικές λαμπρότητες διαφόρων φωτεινών πηγών/επιφανειών (Ιωαννίδης, 2016)..	6
Πίνακας 2	Τυπικές τιμές του δείκτη χρωματικής απόδοσης για διάφορα είδη λαμπτήρων (Ιωαννίδης, 2016)	8-9
Πίνακας 3	Φωτομετρικά μεγέθη, ορισμοί και μονάδες μέτρησης (Μήτσου, 2016)	9-10
Πίνακας 4	Όρια του IEC 61000-3-2 για εξοπλισμό κατηγορίας C (Sohel et al., 2013).....	42
Πίνακας 5	Τεχνικά στοιχεία δοκιμαστικών λαμπτήρων (Turkish Journal of EECS, 2014)....	45
Πίνακας 6	Αρμονικό επίπεδο για τους δοκιμαστικούς λαμπτήρες LED. (Turkish Journal of EECS, 2014).....	47
Πίνακας 7	Στοιχεία δικτύου διανομής προσομοίωσης. (Turkish Journal of EECS, 2014).....	49
Πίνακας 8	Δείκτης αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (THDv) όλων των ηλεκτρικών δικτύων σε όλα τα σενάρια. (Turkish Journal of EECS, 2014).....	51
Πίνακας 9	Ενεργές απώλειες ισχύος για όλα τα προσομοιωμένα σενάρια (Turkish Journal of EECS, 2014).....	53
Πίνακας 10	Μέτρηση της απόδοσης σε lumens/watt, του χρόνου ζωής σε hours και των δεικτών απόδοσης χρώματος μεταξύ των διαφόρων τύπων λαμπτήρων ('Buy smart', 2012)	62
Πίνακας 11	Θεσπισμένα επιτρεπόμενα όρια διαφεύγοντος προς τον ουρανό φωτός με βάση τις περιβαλλοντικές ζώνες (Νικολάου, 2013)	70
Πίνακας 12	Επίπεδα έντασης φωτισμού ανάλογα με την ώρα (Νικολάου, 2013).....	77

SUMMARY

In the present study, the led lighting technology and its impact is analyzed, both relative to power quality and the environment. Initially there is an introduction to lighting and its technical points concerning the photometric quantities of light sources and modern technology led. Then we analyze the new technology and present the components of a led lighting system, their efficiency, characteristics, different technologies, driving circuits, power control, flux control and various applications. Emphasis is given to the harmonics generated by the operation of led lighting systems and overall quality power of the grid. Finally, the impact of the led on the environment and human health is examined in detail, focusing on both the benefits related to energy saving and disadvantages that have to do with the light color, availability of materials, recycling and recovery.

Keywords: lighting, photometric quantities, led technology, power control, flux control, dimming, harmonics, power quality, environment, recycling, disposal, recovery.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η τεχνολογία λαμπτήρων LED και αναλύεται η επίδρασή τους τόσο στην ποιότητα ισχύος όσο και στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στον φωτισμό και τα τεχνικά του σημεία σχετικά με τα φωτομετρικά μεγέθη, τις πηγές φωτός και την σύγχρονη τεχνολογία των LED. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της νέας αυτής τεχνολογίας και παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία ενός συστήματος φωτισμού LED, οι αποδόσεις, τα χαρακτηριστικά, οι διάφορες τεχνολογίες, τα κυκλώματα οδήγησης, ελέγχου ισχύος, ελέγχου φωτεινής ροής και παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές τους. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις αρμονικές που παράγονται από τη λειτουργία των συστημάτων φωτισμού LED και την συνολική ποιότητα ισχύος στο δίκτυο. Τέλος, εξετάζεται λεπτομερώς η επίδραση των LED στο περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου, εστιάζοντας τόσο στα πλεονεκτήματα που σχετίζονται με την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και στα μειονεκτήματα που έχουν να κάνουν με το χρώμα του φωτισμού, τη διάθεση των υλικών, την ανακύκλωση και την ανάκτηση.

Λέξεις κλειδιά: φωτισμός, φωτομετρικά μεγέθη, LED, έλεγχος ισχύος, έλεγχος φωτεινής ροής, ποιότητα ισχύος, περιβάλλον, αρμονικές, ανακύκλωση, απόρριψη, ανάκτηση.

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΦΩΤΙΣΜΟ”

1.1 Ο φωτισμός γενικά

Ο φωτισμός είναι γνωστό ότι αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα της καθημερινής ζωής, τόσο κοινωνικά όσο και στο εργασιακό περιβάλλον, αφού εκτός του ότι καλύπτει την προφανή ανάγκη της επαρκούς όρασης, έχει επιπτώσεις στην ψυχολογία, την απόδοση στο χώρο εργασίας και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Αυτός ο ισχυρισμός μπορεί να υποστηριχτεί από πολλές επιστημονικές έρευνες που έχουν γίνει επί του θέματος, οι οποίες εξετάζουν την επίδραση του φωτισμού στην απόδοση, την κοινωνικότητα και τη συμπεριφορά των ανθρώπων (Τοφαρίδου, 2007). Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών βρίσκουν εφαρμογή στη διαδικασία σχεδιασμού των κτιρίων, όπου λαμβάνοντας υπ’ όψιν την ανθρώπινη ανάγκη για φυσικό φως και για οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, ενσωματώνουν ανοίγματα στο σχέδιο του κτηρίου ώστε αυτό να καταστεί δυνατό.

Εκτός από την παροχή φυσικού φωτισμού, τα ανοίγματα στα κτήρια αποτελούν έναν τρόπο επικοινωνίας του ανθρώπου με τον εξωτερικό κόσμο, πράγμα που έχει αποδειχτεί εξίσου σημαντικό (Διαμάντης, 2003). Ειδικότερα σε χώρες με αυξημένη ηλιοφάνεια όπως η Ελλάδα, έχει παρατηρηθεί συσχέτιση του καλού κλίματος με την εκ φύσεως έντονη εξωστρέφεια των κατοίκων. Τα παραπάνω στηρίζονται επίσης από τις έρευνες οι οποίες εξετάζουν την επίδραση της έλλειψης ανοιγμάτων των κτιρίων στην ψυχολογία των ανθρώπων, με αναφορά συγκεκριμένα μάλιστα στο “Sick building syndrome” (Loe et al., 1999).

Ο φωτισμός λοιπόν εφόσον αποτελεί έναν τόσο σημαντικό παράγοντα για την αποδοτικότητα και ψυχολογία των εργαζομένων συγκεκριμένα, θα έπρεπε να αποτελεί θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος για τους εργοδότες παγκοσμίως, κάτι που όμως δεν συμβαίνει. Σε έρευνα της Αμερικανικής Εταιρείας Εσωτερικού Σχεδιασμού (American Society of Interior Design) φάνηκε ότι 68% των εργαζομένων κάνουν παράπονα για τον φωτισμό στο χώρο εργασίας τους. Αυτό υποδηλώνει ότι οι εργοδότες είναι πιθανό να επαναλαμβάνουν συνηθισμένα λάθη

στο θέμα του φωτισμού, με δύο από τα πιο συχνά να είναι ο πολύ χαμηλός και ο πολύ έντονος φωτισμός.

Ο χαμηλός φωτισμός είναι επιβλαβής επειδή προκαλεί καταπόνηση των ματιών και πονοκεφάλους, αφού τα μάτια πρέπει να δουλέψουν πολύ πιο έντονα σε σχέση με τον επαρκή φωτισμό. Ο χαμηλός φωτισμός προκαλεί επίσης υπνηλία και έλλειψη προσοχής. Ο έντονος φωτισμός είναι εξίσου επιβλαβής με τον χαμηλό. Οι λάμπες φθορισμού συγκεκριμένα προκαλούν επίσης καταπόνηση των ματιών και ημικρανίες, ενώ επίσης καθιστούν δύσκολη τη συγκέντρωση των ματιών. Ως εναλλακτική λύση στους παραπάνω επιβλαβείς τρόπους φωτισμού προτείνεται, ο φυσικός φωτισμός (Jensen, 2016).

1.2 Φωτομετρικά μεγέθη

1.2.1 Στερεά γωνία

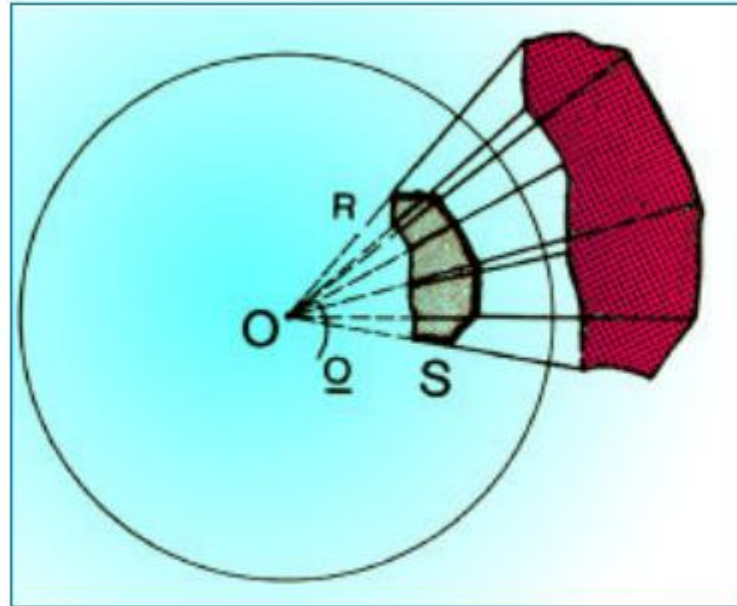
Θεωρούμε ένα σημείο O και μια κλειστή γραμμή με τυχαίο σχήμα. Το σημείο O μπορεί να ενωθεί με ευθείες γραμμές με διάφορα σημεία της κλειστής γραμμής, και το μέρος του χώρου που ορίζεται με την οριοθέτηση που δημιουργούν οι ευθείες αυτές, ονομάζεται στερεά γωνία και έχει κορυφή το σημείο O . Τώρα, αν ορίσουμε μια σφαίρα ακτίνας R που έχει κέντρο το O , τότε ορίζεται μια επιφάνεια S στην επιφάνεια της σφαίρας. Το μέτρο της στερεάς γωνίας λοιπόν μπορεί να οριστεί ως:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \quad (1)$$

Αν στη σφαίρα ακτίνας R , μια κλειστή γραμμή ορίζει ένα εμβαδόν $S = R^2$, τότε το κέντρο της σφαίρας και διάφορα σημεία της κλειστής γραμμής ορίζουν μια στερεά γωνία, μέτρου 1 sterad. Το στερακίνιο (sterad ή Sr) είναι η μονάδα μέτρησης της στερεάς γωνίας, και είναι αδιάστατο μέγεθος (Μήτσου, 2016).

Ως γνωστόν, η επιφάνεια της σφαίρας έχει εμβαδόν $S = 4\pi R^2$, επομένως η στερεά γωνία που εκτείνεται σε ολόκληρη τη σφαίρα έχει μέτρο (Μήτσου, 2016):

$$\Omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ (sterad)} \quad (2)$$



Σχήμα 1 Απεικόνιση στερεάς γωνίας (Μήτσου, 2016).

1.2.2 Φωτεινή ροή (luminous flux)

Η φωτεινή ροή ορίζεται ως το ποσό της ακτινοβολούμενης ισχύος επί τη βάσει της φωτεινής εντύπωσης που δημιουργεί στον ανθρώπινο οφθαλμό (Ιωαννίδης, 2016). Ουσιαστικά είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή στα ορατά μήκη κύματος, ανά μονάδα χρόνου. Η φωτεινή ροή έχει μονάδα μέτρησης το Lumen. Η μαθηματική έκφραση της φωτεινής ροής είναι η εξής:

$$\Phi = K_m \int_0^\infty \frac{d\Phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Όπου

K_m : 683 lm/W (μέγιστη τιμή της φασματικής φωτεινής απόδοσης του ανθρώπινου οφθαλμού για φωτοπική όραση)

$V(\lambda)$: φασματική φωτεινή απόδοση του ανθρώπινου οφθαλμού για φωτοπική όραση

$\frac{d\Phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$: η εκπεμπόμενη ισχύς σε διάστημα μήκους κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$

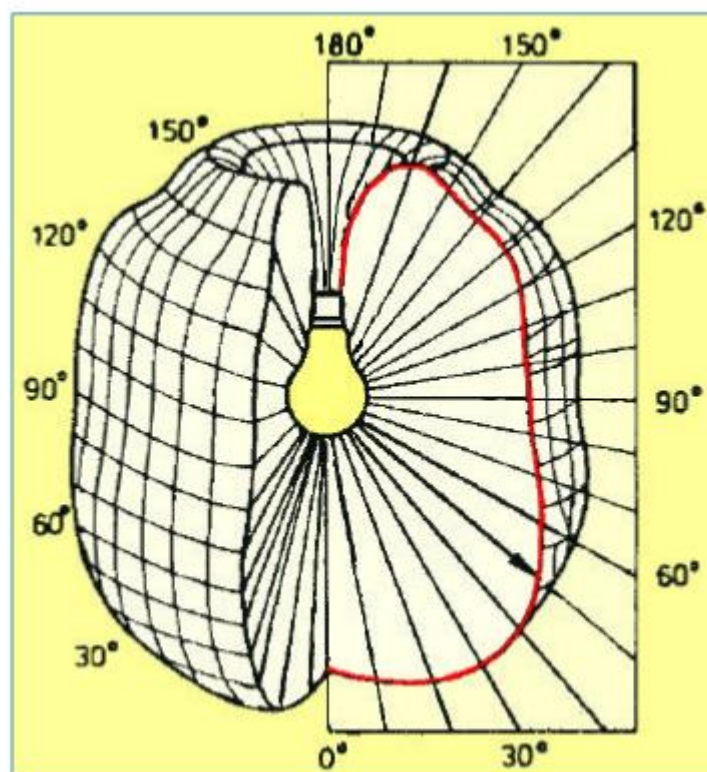
1.2.3 Φωτεινή ένταση ή Φωτοβολία (luminous intensity)

Η φωτεινή ένταση ή φωτοβολία μιας σημειακής πηγής φωτός σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής που εκπέμπει η πηγή σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία, προς την στερεά γωνία:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (4)$$

Μονάδα μέτρησης της φωτοβολίας είναι η candela, δηλαδή η φωτεινή ένταση που δημιουργείται όταν έχουμε φωτεινή ροή 1 lm η οποία μεταφέρεται σε στερεά γωνία 1 sterad (Ιωαννίδης, 2016).

Η χωρική κατανομή της φωτεινής έντασης απεικονίζεται με ένα τρισδιάστατο διάγραμμα κατανομής που ονομάζεται στερεό της έντασης φωτισμού, και με μια τομή σε αυτό παίρνουμε την καμπύλη φωτεινής έντασης για ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Επειδή συνήθως χρησιμοποιούνται πολικές συντεταγμένες στο διάγραμμα, αυτό αποκαλείται πολικό (Μήτσου, 2016).



Σχήμα 2 Πολικό διάγραμμα καμπύλης έντασης και φωτομετρικό στερεό (Μήτσου, 2016).

1.2.4 Ένταση Φωτισμού (illuminance)

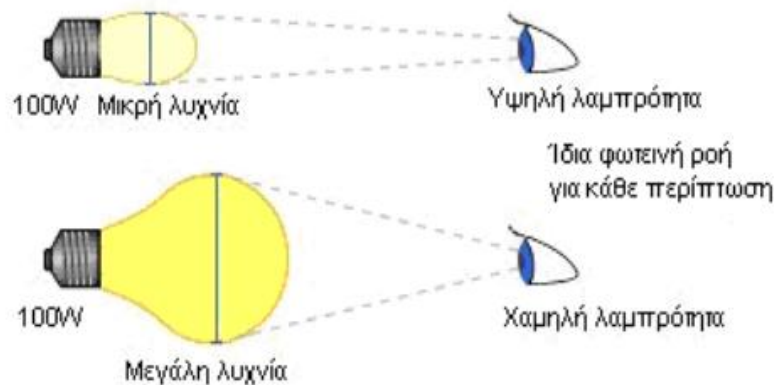
Ως ένταση φωτισμού σ'ένα σημείο μιας επιφάνειας ορίζεται το πηλίκο της φωτεινής ροής που λαμβάνει στοιχειώδης επιφάνεια η οποία περιέχει το σημείο, προς το εμβαδό της επιφάνειας αυτής:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (5)$$

Με $d\Phi$ την προσπίπτουσα φωτεινή ροή και dA το εμβαδό της στοιχειώδους επιφάνειας που περιέχει το σημείο. Μονάδα φωτισμού είναι το Lux ή lx. Ένταση φωτισμού 1 lx είναι η ένταση φωτισμού που δημιουργείται σε ένα σημείο μιας επιφάνειας 1m^2 όταν σ'αυτή προσπίπτει φωτεινή ροή 1lm. (Ιωαννίδης, 2016)

1.2.5 Λαμπρότητα (luminance)

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



Σχήμα 3 Διαφορετική λαμπρότητα πηγών ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικών διαστάσεων (Ιωαννίδης, 2016).

Η λαμπρότητα μιας φωτεινής πηγής είναι η μετρημένη φωτεινότητα της πηγής ή μιας φωτεινής επιφάνειας.

Μονάδα μέτρησης της λαμπρότητας είναι $1\text{cd}/\text{m}^2$ ή $1\text{cd}/\text{cm}^2$. (Ιωαννίδης, 2016)

Ακολουθεί πίνακας με τις τυπικές λαμπρότητες διαφόρων φωτεινών πηγών/επιφανειών.

Πίνακας 1 Τυπικές λαμπρότητες διαφόρων φωτεινών πηγών/επιφανειών (Ιωαννίδης 2016)

Πηγή φωτός	Μέση λαμπρότητα cd/cm^2
Λαμπτήρας αερίου ξένου	200.000-5.000.000.000.
Ήλιος	1.600.000.000
Λαμπτήρας μεταλλικών ιωδιδίων	10.000.000-60.000.000
Λαμπτήρας πυρακτώσεως	2.000.000-26.000.000
Λαμπτήρας φθορισμού	20.000-70.000
Compact λαμπτήρες φθορισμού	5.000-30.000
Ηλιόλουστος συννεφιασμένος ουρανός	10.000
Κερί	7.500
Μπλέ ουρανός	5.000
Κατοπτρικό φωτιστικό με γρίλιες	100
Προτιμώμενες τιμές εσωτερικού φωτισμού	50-500
Λευκό χαρτί στα 500 lux	100
Λευκό χαρτί στα 5 lux	1

1.2.6 Φωτεινή ενέργεια

Η φωτεινή ενέργεια ορίζεται ως (Μήτσου, 2016):

$$Q = \int_{\Delta t} \Phi(t) dt \quad (9)$$

και μετριέται σε Lm sec .

1.2.7 Ολική φωτεινή ροή

Η ολική φωτεινή ροή εκφράζει την συνολική γεωμετρική φωτεινή ροή, και μαθηματικά υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_{ολ} = \int_{\Omega} I d\Omega \quad (10)$$

όπου I η κατανομή της φωτοβολίας της πηγής σε κλειστή επιφάνεια γύρω από την πηγή (Μήτσου, 2016).

1.2.8 Φωτεινή απόδοση (Luminous efficacy)

Η φωτεινή απόδοση (lm/W) ενός λαμπτήρα δηλώνει την φωτεινή ροή που παράγει ένας λαμπτήρας ανά Watt καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Η μέγιστη θεωρητική φωτεινή απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί μετατρέποντας όλη την ενέργεια σε ορατό φως είναι 683 lm/W. Στη πράξη πολύ μικρότερες τιμές επιτυγχάνονται συνήθως μεταξύ 10 και 150 lm/W. (Ιωαννίδης, 2016)

1.2.9 Θερμοκρασία χρώματος (Color Correlation Temperature, CCT)

Ο ανθρώπινος οφθαλμός είναι δυνατόν να αποδώσει τον ίδιο χρωματισμό, οπότε και το λευκό χρώμα, σε ακτινοβολίες διαφορετικής φασματικής συνθέσεως. Για τον λόγο αυτό ως λευκό χρώμα αντιλαμβανόμαστε το οπτικό αποτέλεσμα προερχόμενο από την υπέρθεση όλων των μονοχρωματικών ακτινοβολιών του συνεχούς φάσματος ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως αλλά και εκείνου που προέρχεται από την συμβολή δύο συμπληρωματικών χρωμάτων (ακτινοβολιών) όπως συμβαίνει στην περίπτωση του λαμπτήρα φθορισμού.

Η διαφορά των δύο παραπάνω περιπτώσεων γίνεται σαφής όταν φωτίζουμε το ίδιο έγχρωμο αντικείμενο.

Η θερμοκρασία χρώματος ενός λαμπτήρα είναι ένας τρόπος να περιγράψουν οι κατασκευαστές λαμπτήρων το χρώμα μιας πηγής φωτός συγκρίνοντας το με το χρώμα του μέλανος σώματος.

Μια φωτεινή πηγή έχει θερμοκρασία χρώματος T_c όταν η ενεργειακή φασματική κατανομή της κατά προσέγγιση πλησιάζει εκείνη του μέλανος σώματος όταν αυτό ακτινοβολεί σε θερμοκρασία T_c K.

Η χρωματική εμφάνιση του φωτός ενός λαμπτήρα μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας την θερμοκρασία χρώματος του. Υπάρχουν τρεις κύριες χρωματικές ομάδες:

- «Ζεστό» λευκό (warm white) με $T_c < 3300$ K
- «Ουδέτερο» λευκό (neutral white) με 3300 K $< T_c < 5000$ K
- Λευκό «ημέρας» (daylight white) με $T_c > 5000$ K (Ιωαννίδης, 2016)

1.2.10 Δείκτης χρωματικής απόδοσης (Color Rendering, Ra)

Ανάλογα με τον χώρο και τον σκοπό της εφαρμογής, ο τεχνητός φωτισμός θα πρέπει να επιτρέπει στους παρατηρητές να ξεχωρίζουν και να αναγνωρίζουν τα διαφορετικά χρώματα των υπό παρατήρηση αντικειμένων, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του φυσικού φωτισμού.

Είναι δυνατόν δύο λαμπτήρες που εμφανίζουν την ίδια χρωματική εμφάνιση (δηλαδή παρεμφερείς θερμοκρασίες χρώματος) να τονίζουν με διαφορετικό τρόπο τα χρώματα ενός έγχρωμου αντικειμένου λόγω της διαφορετικής φασματικής σύνθεσης του φωτός τους.

Για τους παραπάνω λόγους εισάχθηκε η έννοια του δείκτη χρωματικής απόδοσης ο οποίος στηρίζεται σ' ένα αριθμό από τεστ χρώματος κάτω από διαφορετικές φωτεινότητες χρησιμοποιώντας τον εξεταζόμενο λαμπτήρα αλλά και λαμπτήρα αναφοράς ίδιας θερμοκρασίας χρώματος. Η μέγιστη τιμή του εν λόγω δείκτη είναι το 100. Η σύγκριση λαμπτήρων με τη βοήθεια του Ra γίνεται για λαμπτήρες με το ίδιο CCT.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τυπικές τιμές του δείκτη χρωματικής απόδοσης για διάφορα είδη λαμπτήρων.

Πίνακας 2 Τυπικές τιμές του δείκτη χρωματικής απόδοσης για διάφορα είδη λαμπτήρων (Ιωαννίδης, 2016)

Χρωματική Απόδοση	Δείκτης χρωματικής απόδοσης	Είδος λαμπτήρα

Άριστη	90	Λαμπτήρες αλογόνου Λαμπτήρες φθορισμού - LUMILUX DE LUXE fluorescent lamps HQI .../D
Πολύ καλή	80-89	LUMILUX λαμπτήρες φθορισμού HQI.../NDL or WDL
Καλή	70-79	Βασικοί λαμπτήρες φθορισμού (25)
Ικανοποιητική	60-69	Βασικοί λαμπτήρες φθορισμού (20,23,30)
Μέτρια	40-59	HQL
Χαμηλή	39	Υψηλής-πίεσης και χαμηλής-πίεσης λαμπτήρες εκφορτίσεως νατρίου

Ακολουθεί πίνακας που περιέχει συνοπτικά κάποια φωτομετρικά μεγέθη, με τις αντίστοιχες μονάδες μέτρησής τους (Μήτσου, 2016).

Πίνακας 3 Φωτομετρικά μεγέθη, ορισμοί και μονάδες μέτρησης (Μήτσου, 2016)

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Ορισμός	Μονάδα SI
Φ_v	Φωτεινή ροή	Luminous flux	$\Phi = K_m \int_0^\infty \frac{d\Phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$	Lm
I	Φωτεινή ένταση ή Φωτοβολία	Luminous Intensity	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Cd = Lm Sr ⁻¹
E	Ένταση φωτισμού	Illuminance	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Lx = Lm m ⁻²

L	Λαμπρότητα	Luminance	$L_v = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta}$	Cd m ⁻² = Lm Sr ⁻¹ m ⁻²
Q	Φωτεινή ενέργεια	Luminous energy	$Q = \int_{\Delta t} \Phi(t) dt$	Lm sec
Φ _{ολ}	Ολική φωτεινή ροή	Total luminous Flux	$\Phi_{ολ} = \int_{\Omega} I d\Omega$	Lm

1.3 Πηγές φωτός

Σήμερα υπάρχουν τρεις κύριες πηγές φωτισμού:

- φώτα πυρακτώσεως
- ηλεκτρικής εκκένωσης
- LED.

Τα φώτα πυρακτώσεως λειτουργούν με τη θέρμανση ενός νήματος μέχρι αυτό να ακτινοβολήσει όπως συμβαίνει με το μέλαν σώμα. Οι λαμπτήρες ηλεκτρικής εκκένωσης (ή "εκκένωσης αερίων") λειτουργούν χάριν της ροής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ενός αερίου ώστε να χωριστεί σε φωτεινό πλάσμα. Ένα είδος λαμπτήρων εκκένωσης αερίων είναι οι λαμπτήρες φθορισμού. Στις Δίοδους Εκπομπής Φωτός (LED) η ροή ρεύματος σε ημιαγωγό προκαλεί εκπομπή φωτονίων (ASW, 2015).

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως βολφραμίου είναι φθινοί στην εγκατάσταση, αλλά έχουν μεγάλο κόστος λειτουργίας. Η χρήση τους μπορεί να συμφέρει αν υπάρχει ανάγκη ελαχιστοποίησης των αρχικών δαπανών και οι ετήσιες ώρες χρήσης είναι μικρές ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά διαστήματα με συχνή εναλλαγή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι απαιτήσεις σε φωτισμό του εσωτερικού χώρου μπορεί να δικαιολογήσει τη χρήση μικρών λαμπτήρων πυρακτώσεως, λόγω της δυνατότητας ελέγχου με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, δεν θα πρέπει κανονικά να χρησιμοποιούνται για τον γενικό φωτισμό των εσωτερικών χώρων (ASW, 2015).

Οι λαμπτήρες βολφραμίου-αλογόνου είναι ένα είδος ακριβότερου λαμπτήρα πυρακτώσεως που έχει ένα πολύ συμπαγές περίβλημα το οποίο αποτελεί εξαιρετικό φωτιστικό μέσο στις περιπτώσεις που ο οπτικός έλεγχος έχει μεγάλη σημασία. Εξακολουθεί να έχει όλα τα αρνητικά χαρακτηριστικά του συμβατικού λαμπτήρα πυρακτώσεως, δηλαδή σχετικά σύντομη διάρκεια ζωής και χαμηλή απόδοση, καθιστώντας τους λαμπτήρες βολφραμίου-αλογόνου ακριβούς στη λειτουργία και τη συντήρησή τους. Η απόδοση χρώματος, ωστόσο, είναι εξαιρετική.

Μια συνηθισμένη λάμπα ηλεκτρικής εκκένωσης βασίζεται σε ατμούς νατρίου. Έχει την υψηλότερη φωτεινή απόδοση στην αγορά σήμερα. Όταν το φως είναι αναμμένο, ένα μικρό ρεύμα περνά μέσα από το αέριο νατρίου, εκπέμποντας μια αχνή κόκκινη εκκένωση. Μετά από αρκετά λεπτά, το νάτριο μέσα εξατμίζεται. Ο ατμός νατρίου που προκύπτει, παράγει το σχεδόν τελείως μονοχρωματικό χαρακτηριστικό εκπομπής του λαμπτήρα (589 - 589,6 nm, κίτρινο). Το γεγονός αυτό καθιστά την αντίληψη των χρωμάτων πολύ δύσκολη, πράγμα που σημαίνει ότι χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για φωτισμό των δρόμων.

Οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου έχουν μήκος κύματος εκπομπής 185 nm και 254 nm στο υπεριώδες φάσμα. Σε υψηλή πίεση, το ίδιο το αέριο απορροφά ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας και την εκπέμπει εκ νέου ως ορατό φως. Αυτή η εκπομπή είναι συγκεντρωμένη σε πέντε στενές ζώνες, δίνοντας μια εμφάνιση βιολετί-μπλε-πράσινου χρώματος. Δεδομένου ότι αυτό το φάσμα είναι ανεπαρκές ως προς το κόκκινο, η αντίληψη πολλών χρωμάτων είναι παραμορφωμένη. Ωστόσο, έχει υψηλή φωτεινή απόδοση.

Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι οι λαμπτήρες ηλεκτρικής εκκένωσης των οποίων η εκκένωση βρίσκεται στο υπεριώδες φάσμα, αλλά το εσωτερικό του λαμπτήρα είναι επικαλυμμένο με φώσφορο που απορροφά αυτά τα μήκη κύματος και τα εκπέμπει εκ νέου ως ορατό φως (φθορίζον). Μπορούν να έχουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών χρώματος και δεικτών χρωματικής απόδοσης, καθώς και διάφορες φωτεινές αποδόσεις. Γενικά είναι πιο αποτελεσματικοί όσο έχουν μικρότερη διάμετρο (εξ ου και το T5 είναι πιο αποτελεσματικό από ένα T8 ή T12), αν και οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν λιγότερο αποτελεσματικά τροφοδοτικά από τα φωτιστικά πλήρους μεγέθους για T5 ή T8 λαμπτήρες.

Τα φωτιστικά LED σήμερα έχουν φωτεινή απόδοση στο ίδιο εύρος με τους λαμπτήρες φθορισμού. Ωστόσο, μπορούν να έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής (μέχρι και 30.000

έως 100.000 ώρες χρήσης), συμπαγή κατασκευή, και μονάδες εξαιρετικά μικρού μεγέθους που είναι προσαρμόσιμες σε πολλούς μορφολογικούς παράγοντες. Η παραδοσιακά υψηλή τιμή τους εμπόδισε τη χρήση τους (δημοφιλείς πηγές φωτός) στην αρχιτεκτονική. Η τεχνολογία όμως βελτιώνεται πολύ γρήγορα, και τα φωτιστικά LED γίνονται όλο και λιγότερο δαπανηρά και ενεργειακά αποδοτικότερα κάθε χρόνο (ASW, 2015).

Κατά την επιλογή της πηγής φωτός θα πρέπει να εξεταστούν διάφορα κριτήρια. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αυτά τα χαρακτηριστικά είναι συχνά συνάρτηση της φωτεινής πηγής και του εξαρτήματος που την περιβάλλει.

Η αποτελεσματικότητα, η διάρκεια ζωής και η απόσβεση της φωτεινής ροής τους (lm) έχουν επιπτώσεις στο κόστος του κύκλου ζωής. Αν η φωτεινή ροή εξόδου ενός λαμπτήρα μειώνονται γρήγορα κατά τη διάρκεια ζωής του, μια σωστή σχεδίαση θα παρέχει αρχικά περισσότερα lm από ό,τι απαιτείται, έτσι ώστε παρά τη φθορά του λαμπτήρα κατά το πέρασμα του χρόνου, να είναι ακόμη διαθέσιμη μια επαρκής ποσότητα φωτός. Η σύγκριση του ποσοστού της απόσβεσης lm στους διάφορους τύπους λαμπτήρα αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της ανάλυσης του κόστους.

Ένα άλλο κριτήριο για την επιλογή λαμπτήρα είναι η επιθυμητή ποσότητα διάχυσης. Μερικές φορές είναι επιθυμητό να έχουμε διάχυτο φως και όχι εντελώς κατευθυνόμενο, δεδομένου ότι το τελευταίο μπορεί να προκαλέσει σκληρές σκιές. Μια γραμμική πηγή (όπως μία λάμπα φθορισμού) παράγει περισσότερο διάχυτο φως και μαλακότερες σκιές από ότι μια σημειακή πηγή.

Ακόμη ένα κριτήριο είναι η ελεγχιμότητα. Μερικοί λαμπτήρες μπορούν να ρυθμιστούν να χαμηλώσουν την εκπομπή φωτός ευκολότερα από κάποιες άλλες. Πρέπει να εξεταστεί εάν αρκεί ένας απλός διακόπτης on/off, ένας φθηνός ροοστάτης (dimmer), ή εάν είναι απαραίτητη η υψηλότερη επένδυση για την επιλογή μιας υψηλότερης ποιότητας ρύθμισης της φωτεινής ροής (dimming). Ένας από τους βασικούς τομείς που λαμβάνει υπ' όψιν ο αρχιτέκτονας, ο διακοσμητής και ο μηχανικός φωτισμού είναι η εμφάνιση του φωτισμένου χώρου. Οι περισσότερες πηγές φωτός είναι διαθέσιμες σε μια ποικιλία φασματικών κατανομών ισχύος, αποδίδοντας μια ποικιλία δεικτών απόδοσης χρώματος (CRI) και θερμοκρασιών χρώματος. Ο σχεδιαστής φωτισμού πρέπει να είναι πλήρως εξοικειωμένος με αυτές τις έννοιες,

προκειμένου να επιτευχθεί σωστά το επιθυμητό αποτέλεσμα με τις επιλεγμένες λάμπες (ASW, 2015).

Η κατανομή του φωτός μιας μικρής λάμπας μπορεί να ελεγχθεί πιο εύκολα από ότι μιας μεγάλης λάμπας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι ευκολότερο να τοποθετηθεί ένας ανακλαστήρας γύρω από ένα μικρό λαμπτήρα σε σχέση με ένα μεγάλο. Μερικές λάμπες φτάνουν τα 10 mm σε μήκος, και άλλες μπορεί να έχουν μέγεθος 1m. Το μοτίβο του φωτός των πρώτων μπορεί να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια, ενώ το καλύτερο που μπορούμε να ελπίζουμε για τις δεύτερες είναι να οριστεί μια γενική κατεύθυνση του φωτισμού. Το ιδανικό θεωρείται μια μικρή πηγή φωτός με την έννοια της «σημειακής πηγής». Όσο μικρότερο είναι το στοιχείο εκπομπής φωτός ενός λαμπτήρα, τόσο περισσότερο προσεγγίζει την ιδανική μαθηματική σημειακή πηγή. Κάθε μέσο τεχνητού φωτισμού προσθέτει επιπλέον φορτίο θερμότητας σε ένα κτίριο. Οι λαμπτήρες με υψηλότερη αποτελεσματικότητα θα απελευθερώσουν λιγότερη θερμότητα σε ένα χώρο για μια δεδομένη ποσότητα φωτός εξόδου. Η πιο θερμικά αποδοτική μορφή του φωτισμού είναι το διάχυτο φως της ημέρας, ακολουθείται από το άμεσο ηλιακό φως, μετά ο φωτισμός εκκένωσης αέρα χαμηλής πίεσης και τέλος ο φωτισμός μέσω λαμπτήρων υψηλής πίεσης. Το χειρότερο από όλα είναι λαμπτήρες πυρακτώσεως.

Οι λαμπτήρες εκκένωσης αερίου υψηλής πίεσης είναι πιο ευαίσθητοι στις διακυμάνσεις της τάσης από τους λαμπτήρες χαμηλής πίεσης. Αν υπάρξει διακοπή λόγω αστάθειας της τάσης, η λάμπα υψηλής πίεσης μπορεί να απαιτήσει έως και 15 λεπτά για να επιστρέψει σε κατάσταση πλήρους απόδοσης φωτισμού. Μερικές λάμπες, κυρίως φθορισμού, είναι πολύ ευαίσθητες στη θερμοκρασία και την υγρασία. Αυτές οι λάμπες είναι δύσκολο να εκκινήσουν όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλή, και αρχικά να μην μπορούν να παράγουν πλήρη απόδοση φωτισμού. Μερικές λάμπες είναι αρκετά φθηνές ως προς την αρχική τους αγορά. Ωστόσο, αυτές τείνουν να έχουν χαμηλή αποτελεσματικότητα και σχετικά σύντομη διάρκεια ζωής. Πρέπει λοιπόν να λαμβάνεται υπόψη όχι μόνο το αρχικό κόστος, αλλά και το κόστος λειτουργίας του συστήματος καθ' όλη την διάρκεια ζωής του, συμπεριλαμβανομένου του κόστους της ενέργειας και την πληρωμή του εργαζόμενου που θα χρειαστεί για την συχνή αντικατάσταση των λαμπτήρων. Οι λαμπτήρες φθορισμού και οι LED είναι πιο οικονομικοί από άποψη κόστους ως προς τους λαμπτήρες πυρακτώσεως για αυτό και μόνο το λόγο, ακόμη και χωρίς την εξοικονόμηση ενέργειας (Electric Light Sources Sustainability Workshop, 2016).

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ LED”

2.1 Λαμπτήρες LED

Μια δίοδος εκπομπής φωτός (LED), είναι μια ηλεκτρονική συσκευή (τσιπ) που παράγει φως όταν την διαπερνά ηλεκτρικό ρεύμα. Το μήκος κύματος (ή χρώμα) του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής του LED. Τα LED's είναι διαθέσιμα σε πολλά χρώματα, όπως κόκκινο, μπλε, πορτοκαλί, πράσινο, και σε χρώματα που προσεγγίζουν τις υπεριώδεις ακτινοβολίες, με έξοδο που κυμαίνεται από 10 lumens έως 200 lumens ανά watt.

Για τη σήμανση, τις τηλεοράσεις και τις θεατρικές εφαρμογές, οι Κόκκινες/Πράσινες/Μπλε (RGB) LED's συνδυάζονται σε διαφορετικές εντάσεις για την δημιουργία οποιουδήποτε ορατού χρώματος. Τα LED's που χρησιμοποιούνται κυρίως για τον γενικό φωτισμό σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές είναι τα μπλε LED's που έχουν κίτρινο φώσφορο τοποθετημένο από πάνω. Ο φώσφορος απορροφά ένα μέρος του μπλε φωτός, και εκπέμπει φως που το χρώμα του ανήκει στο κίτρινο, πράσινο, και κόκκινο τμήμα του φάσματος. Όταν το μπλε φως που δεν απορροφάται, αναμιχθεί με τα άλλα χρώματα του φωτός, δημιουργείται αυτό που το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται ως "λευκό" φως. Η επιλογή του μπλε LED και του κίτρινου φωσφόρου, καθώς και ο τρόπος της τοποθέτησης του φωσφόρου, δημιουργεί εκατοντάδες αποχρώσεις του «λευκού» εξαιτίας των διαφορών στη θερμοκρασία χρώματος και στο δείκτη χρωματικής απόδοσης CRI (Color Rendering Index). Ένα μονό τσιπ LED όταν τοποθετηθεί μαζί με άλλα τσιπ, σε πολλές διαφορετικές μορφές, δημιουργεί μονάδες LED (συστοιχίες LED ή ταινίες LED) (Biery et al., 2014).

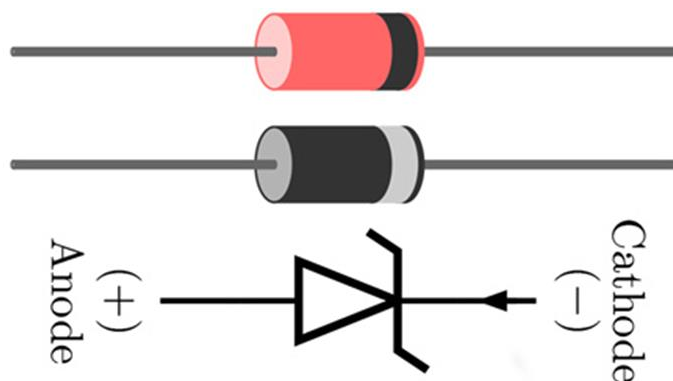
2.2 Βασική αρχή λειτουργίας

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν η αρχή λειτουργίας της διόδου και ειδικότερα της φωτοδιόδου (LED).

2.2.1 Αρχή λειτουργίας διόδου

Η δίοδος είναι μια διάταξη από ημιαγωγικό υλικό το οποίο επιτρέπει τη διέλευση ροής ρεύματος μόνο από την μία κατεύθυνση, ανάλογα με την πόλωσή της. Κατασκευάζεται από ημιαγωγικά υλικά, όπως είναι το γερμάνιο και το πυρίτιο και διαθέτει δύο ακροδέκτες, την άνοδο και την κάθοδο.

Εάν ενώσουμε έναν ημιαγωγό τύπου N και έναν ημιαγωγό τύπου P τότε προκύπτει μία δίοδος επαφής. Ο ένας ακροδέκτης της διόδου αποτελεί την άνοδο και ο άλλος ακροδέκτης είναι η κάθοδος. Η ροή του ρεύματος μέσα από την δίοδο, επιτυγχάνεται όταν πολώσουμε ορθά την δίοδο, δηλαδή όταν η άνοδος έχει θετικό δυναμικό και η κάθοδος αρνητικό. Στην πόλωσή της η δίοδος παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά όπως είναι η χωρητικότητα και η αντίσταση επαφής της διόδου. Ως αντίσταση επαφής ονομάζουμε την ωμική αντίσταση που παρουσιάζει η δίοδος όταν είναι ορθά πολωμένη.



Σχήμα 4 Δίοδος (Coolweb.gr, 2017).

Κατά την ορθή πόλωση της διόδου η άνοδος που την αποτελεί ένας ημιαγωγός τύπου P, συνδέεται στο θετικό πόλο μιας πηγής συνεχούς τάσης, ενώ η κάθοδος που την αποτελεί ο ημιαγωγός τύπου N στον αρνητικό πόλο της πηγής. Στην περίπτωση αυτή, το θετικό φορτίο της πηγής απωθεί τους θετικά φορτισμένους φορείς του ημιαγωγού τύπου P προς την ζώνη

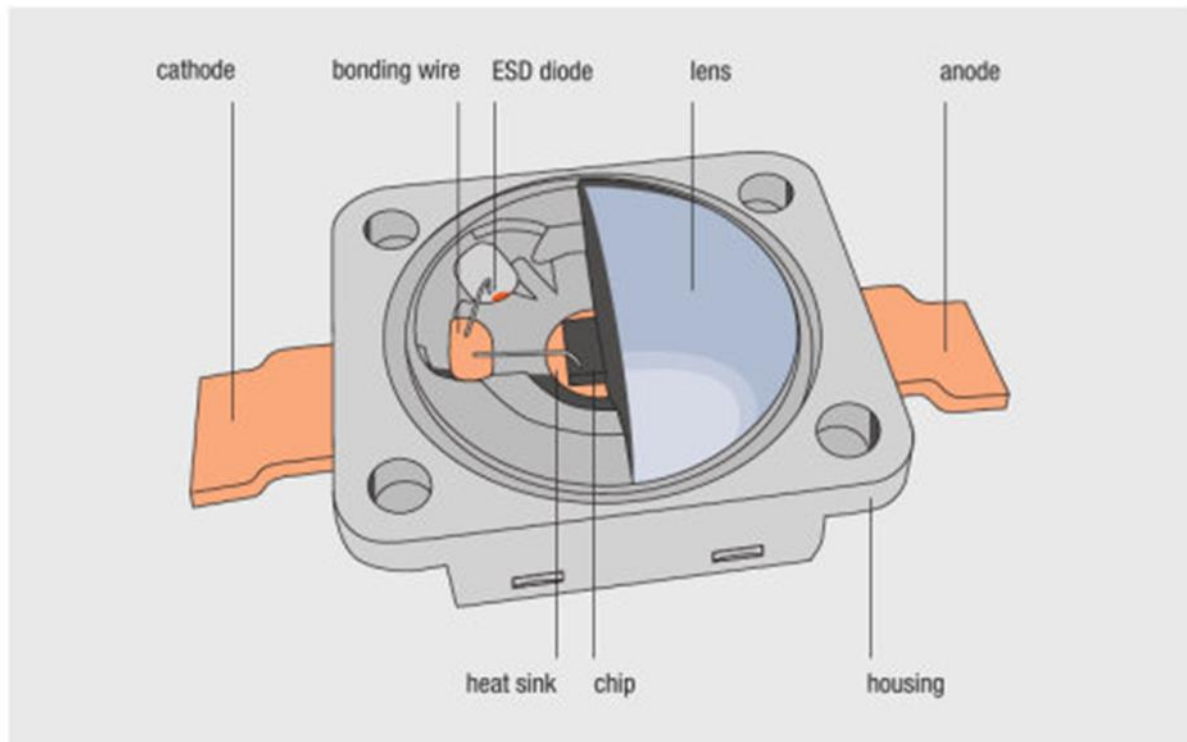
αγωγιμότητας της επαφής και το αρνητικό φορτίο της πηγής απωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου N επίσης προς την ζώνη αγωγιμότητας. Η ζώνη αγωγιμότητας είναι το σημείο επαφής των ημιαγωγών τύπου P και τύπου N. Τότε έχουμε ροή ρεύματος μέσα από την δίοδο.

Αν συνδέσουμε ανάστροφα την πολικότητα της πηγής με την δίοδο, δηλαδή τον θετικό ακροδέκτη με τον ημιαγωγό τύπου N και τον αρνητικό ακροδέκτη με τον ημιαγωγό τύπου P, τότε τα ηλεκτρόνια θα έλκονται από το θετικό φορτίο της πηγής και οι οπές από το αρνητικό φορτίο της πηγής. Στην περίπτωση αυτή η ζώνη αγωγιμότητας στην επαφή P-N μεγαλώνει με αποτέλεσμα να μην έχουμε ροή ρεύματος. Όσο μικρότερη είναι η ζώνη αγωγιμότητας τόσο ευκολότερα οι ελεύθεροι φορείς των ημιαγωγών μετακινούνται από την μια περιοχή στην άλλη, για να έχουμε ροή ρεύματος. (www.electroniccircuits.gr)

2.2.2 Αρχή λειτουργίας φωτοδιόδου (LED)

Οι δίοδοι LED εκπέμπουν φως κατά τη φάση της ορθής πόλωσης τους και κατασκευάζονται για διάφορα χρώματα όπως κόκκινο, πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί, μπλε, σε διάφορα σχήματα και διαστάσεις. Η αρχή λειτουργίας των LED's βασίζεται στο γεγονός πως σε συνδεσμολογία ορθής πόλωσης τους δημιουργούνται οπές και ηλεκτρόνια επανασυνδέοντα στην επαφή P-N της διόδου. Με τις επανασυνδέσεις οπών και ηλεκτρονίων απελευθερώνεται ενέργεια από τα ηλεκτρόνια με την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο LED. Η μέγιστη ένταση του ρεύματος ορίζεται από τον κατασκευαστή, γι' αυτό και η πόλωση της διόδου γίνεται με την σύνδεση μιας αντίστασης στο ένα άκρο του LED, που η τιμή υπολογίζεται σε συνάρτηση με την τάση της πηγής σύμφωνα με την σχέση: $R=(V-V_d)/I_d$, όπου V η τάση της πηγής, V_d η τάση λειτουργίας του LED η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή, (περίπου 1,8V) και I_d το ρεύμα που διαρρέει την δίοδο LED. Συνήθως το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα που δίνει ο κατασκευαστής στο LED δεν ξεπερνάει τα 50mA, με εξαίρεση LED's για ειδικές χρήσεις. (www.electroniccircuits.gr)

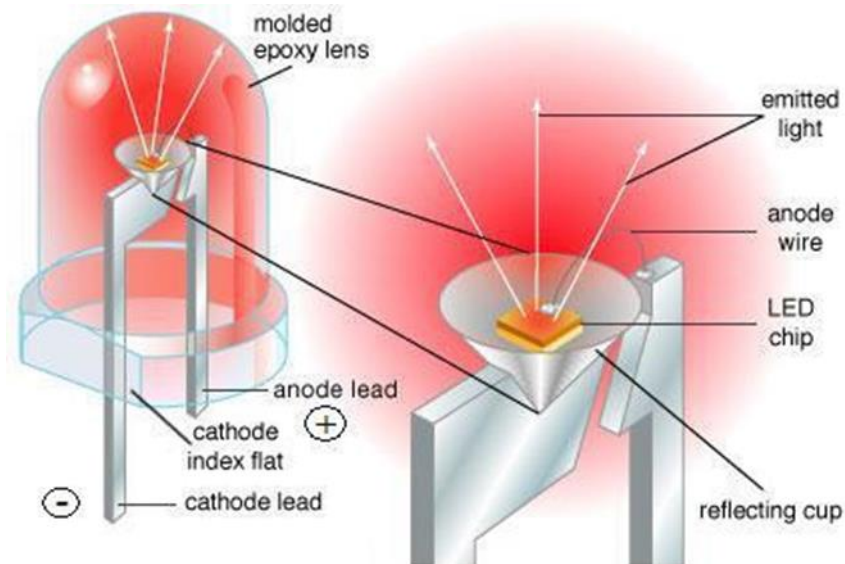


Σχήμα 5 Βασική αρχή λειτουργίας του LED (Ledvance.gr, 2017).

Σε αντίθεση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως ανακλαστήρα, οι οποίοι εκπέμπουν συνεχές φάσμα, ένα LED εκπέμπει φως σε συγκεκριμένο χρώμα. Το χρώμα του φωτός εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού που χρησιμοποιείται. Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο υλικά, για την παραγωγή LED με υψηλό βαθμό φωτεινότητας σε όλα τα χρώματα από το μπλε έως το κόκκινο και, μέσω μετατροπής της φωταύγειας, επίσης σε λευκό (το φαινόμενο της φωταύγειας είναι αυτό που παρατηρείται στα διάφορα σώματα όταν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που η έντασή της σε ορισμένα μήκη κύματος ή στενές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματός τους είναι μεγαλύτερη από εκείνη της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα ίδια αυτά σώματα στην ίδια θερμοκρασία). Για τη λειτουργία της διόδου σε ορθή πόλωση απαιτούνται διαφορετικές τάσεις.

Τα LED είναι κρύσταλλοι ημιαγωγών. Ανάλογα με τη σύνθεση των συστατικών του κρυστάλλου, κατά τη διέλευση του ρεύματος εκπέμπουν το φως σε κόκκινο, πράσινο, κίτρινο ή μπλε χρώμα. Με τη βοήθεια μιας πρόσθετης φθορίζουσας στρώσης με κίτρινωπό χρώμα, τα μπλε LED παράγουν επίσης λευκό φως (μετατροπή φωταύγειας). Μια άλλη μέθοδος παραγωγής λευκού φωτός είναι η μείξη κόκκινων, πράσινων και μπλε διόδων εκπομπής φωτός (RGB). Αυτή χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η προτεραιότητα δεν

είναι γενικά ο λευκός φωτισμός, αλλά τα διακοσμητικά εφέ με διάφορα πλούσια χρώματα. (ledvance.gr)



Σχήμα 6 Λειτουργία φωτοδιόδου LED (Coolweb.gr, 2017).

Στα LED's για την αναγνώριση των ακροδεκτών τους ο ένας ακροδέκτης είναι μακρύτερος από τον άλλον και δηλώνει την άνοδο. Χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε είδους κύκλωμα σαν φωτεινές ενδείξεις και έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των ενδεικτικών λυχνιών, όπως είναι η μικρή κατανάλωση ρεύματος, το πολύ μικρό τους μέγεθος και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους που ξεπερνούν τις 100.000 ώρες λειτουργίας. (electroniccircuits.gr)

2.3 Ιστορικό της τεχνολογίας LED

1907: Ο Άγγλος Henry Joseph Round ανακαλύπτει ότι τα ανόργανα υλικά είναι δυνατόν να φωτισθούν με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος. Την ίδια χρονιά δημοσιεύει την ανακάλυψή του στο περιοδικό "Electrical World". Ωστόσο, καθώς εργαζόταν κυρίως σε ένα νέο σύστημα εύρεσης της κατεύθυνσης για τις θαλάσσιες μεταφορές, η ανακάλυψη αυτή αρχικά ξεχάστηκε.

1921: Ο Ρώσος φυσικός Oleg Lossew παρατηρεί ξανά το "Φαινόμενο Round" της εκπομπής φωτός. Τα επόμενα χρόνια, από το 1927 έως το 1942, εξέτασε και περιέγραψε αυτό το φαινόμενο με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

1935: Ο Γάλλος φυσικός Georges Destriau ανακαλύπτει την εκπομπή φωτός στον θειούχο ψευδάργυρο. Προς τιμήν του Ρώσου φυσικού, ονομάζει το φαινόμενο "Φως Lossew". Σήμερα, ο Georges Destriau θεωρείται ο εφευρέτης της ηλεκτροφωταύγειας.

1951: Η ανάπτυξη του τρανζίστορ σηματοδοτεί ένα επιστημονικό βήμα προς τη φυσική των ημιαγωγών. Η επεξήγηση της εκπομπής φωτός είναι πλέον δυνατή.

1962: Στην αγορά εμφανίζεται η πρώτη κόκκινη δίοδος φωταύγειας (τύπος GaAsP), η οποία αναπτύχθηκε από τον Αμερικανό Nick Holonyak. Αυτό το πρώτο LED στην περιοχή του ορατού μήκους κύματος σηματοδοτεί τη γέννηση των LED βιομηχανικής παραγωγής.

1971: Ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης νέων υλικών ημιαγωγών, τα LED παράγονται σε νέα χρώματα: πράσινο, πορτοκαλί και κίτρινο. Η απόδοση και η αποτελεσματικότητα του LED συνεχίζει να βελτιώνεται.

1993: Οι Ιάπωνες Shuji Nakamura αναπτύσσει το πρώτο λαμπερό μπλε LED, και ένα πολύ αποδοτικό LED στο εύρος του πράσινου φάσματος (δίοδος InGaN). Λίγο αργότερα σχεδιάζει επίσης ένα λευκό LED.

1995: Παρουσιάζεται το πρώτο LED με λευκό χρώμα από τη μετατροπή της φωταύγειας και κυκλοφορεί στην αγορά δύο χρόνια αργότερα.

2006: Παράγονται οι πρώτες δίοδοι εκπομπής φωτός με 100 lumen ανά Watt. Η απόδοση αυτή μπορεί να ξεπεραστεί μόνο από τους λαμπτήρες εκκένωσης.

2010: Αναπτύσσονται ήδη LED συγκεκριμένου χρώματος με γιγαντιαία φωτεινή απόδοση 250 lumen ανά Watt σε εργαστηριακές συνθήκες. Η πρόοδος συνεχίζει με τον ίδιο εντυπωσιακό ρυθμό. Σήμερα, η περαιτέρω ανάπτυξη προς την κατεύθυνση των OLED θεωρείται ως η τεχνολογία του μέλλοντος. (ledvance.gr)

2.4 Χαρακτηριστικά των λαμπτήρων LED

Κάθε λαμπτήρας LED χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα στοιχεία:

Χρώμα: Τα LED φωτοβολούν σε κόκκινο, πράσινο, πορτοκαλί, κίτρινο, μπλε, υπέρυθρο και υπεριώδες. Κάθε κατασκευαστής δίνει το χρώμα και το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά: Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται η τάση πόλωσης και το ρεύμα της ένωσης P-N. Η τάση κυμαίνεται από 1.5 μέχρι 3V και το ρεύμα γύρω στα 20mA, μεγέθη όμως που εξαρτώνται από τον τύπο και το χρώμα του LED. Επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η ανάστροφη τάση που αντέχει ο λαμπτήρας LED. Αν η τάση αυτή ξεπεραστεί, που συνήθως είναι γύρω στα 3 με 11V η δίοδος καταστρέφεται.

Θερμοκρασία: Πιο συγκεκριμένα τα όρια λειτουργίας και η θερμοκρασία του λαμπτήρα LED.

Ισχύς που καταναλώνει κάθε LED: Αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο αυξάνει η θερμοκρασία τόσο μικραίνει η κατανάλωση.

Επικάλυψη των LED: Αυτή γίνεται ή με διαφανή υλικά ή με υλικά στο χρώμα της ακτινοβολίας. Η επικάλυψη παίζει σπουδαίο ρόλο γιατί από αυτήν εξαρτάται κατά πόσο λιγότερο ή περισσότερο φωτεινή φαίνεται η LED. (hlektronika.gr)

2.5 Πλεονεκτήματα λαμπτήρων LED

Απόδοση: Με τους λαμπτήρες LED μπορούμε να επιτύχουμε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως ή φθορισμού. Για να παράγει φως ένας

λαμπτήρας πυρακτώσεως, πρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από το νήμα του και να το θερμάνει σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την πολύ χαμηλή απόδοση των λαμπτήρων, αφού πάνω από 98% της ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον ως θερμότητα. Στους λαμπτήρες φθορισμού, ατμοί υδραργύρου στο εσωτερικό του, παράγουν υπεριώδη ακτινοβολία. Το υπεριώδες φως στη συνέχεια απορροφάται από τη φωσφορούχο επίστρωση, παράγοντας ορατό φως.

Αν και η θερμική ενέργεια που παράγεται στους λαμπτήρες φθορισμού είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, ωστόσο εξακολουθεί να χάνεται ενέργεια στη μετατροπή ορατού φωτός από υπεριώδες. Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε σχεδόν μονοχρωματικό φως με τρόπο άμεσο, που δεν συνοδεύεται από σημαντική εκπομπή θερμότητας προς το περιβάλλον.

Διάρκεια ζωής: Οι λαμπτήρες LED συνήθως δεν καίγονται, αλλά τείνουν να μειώνουν σταδιακά το φως τους. Σαν χρόνος ζωής ορίζεται το διάστημα μέχρι να φτάσουν στο 70% της αρχικής τους φωτεινής ροής. Η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα LED κυμαίνεται από 30000-50000 ώρες, που αντιστοιχούν σε πάνω από 10 χρόνια. Σε κάθε περίπτωση πάντως η διάρκεια ζωής των LED είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των λαμπτήρων πυρακτώσεως (περίπου 1000 ώρες) και τουλάχιστον διπλάσια από των λαμπτήρων φθορισμού (10000-20000 ώρες).

Αντοχή και ποιότητα φωτισμού: Οι λαμπτήρες LED δεν σπάνε εύκολα, διότι δεν περιέχουν γυαλί. Έτσι γίνονται εξαιρετικά ανθεκτικοί σε κραδασμούς, δονήσεις και χτυπήματα.

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

Εύκολη εγκατάσταση: Στο εμπόριο υπάρχουν λαμπτήρες LED τόσο για τροφοδοσία AC όσο και για τροφοδοσία DC (μερικές φορές και με τα δύο). Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους λαμπτήρες LED μπορεί κανείς πολύ εύκολα να στήσει ένα αυτόνομο σύστημα φωτισμού, που να τροφοδοτείται από μια εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως π.χ. μια απλή μπαταρία ή μια ηλιακή συστοιχία χωρίς την χρήση αναστροφέα. Επίσης, επειδή οι λαμπτήρες LED μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις (π.χ. 12 ή 24 V), εξασφαλίζουν την πλήρη ασφάλεια των καταναλωτών και μειώνουν τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

Μικρό μέγεθος: Έχουν πολύ μικρό μέγεθος (μικρότερα από 2mm) κάτι που διευκολύνει την τοποθέτησή τους σε πλακέτες, πίνακες αποτύπωσης, ή σημεία όπου ο χώρος είναι περιορισμένος.

Γρήγορη απόκριση: Τα LED έχουν γρήγορη απόκριση. Είναι ιδανικά για συσκευές ή φωτιστικά που έχουν πολύ μικρό κύκλο ζωής (π.χ. που αναβοσβήνουν), σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού, που χρειάζονται χρόνο για να φτάσουν στη μέγιστη φωτεινότητα. Για παράδειγμα, μια τυπική κόκκινη LED μπορεί να έρθει σε κατάσταση πλήρους φωτεινότητας σε χρόνο microsecond. Ακόμη, τα LED που χρησιμοποιούνται ως συσκευές επικοινωνίας έχουν ακόμα μικρότερους χρόνους απόκρισης.

Καλύτερα υλικά για το περιβάλλον: Σε αντίθεση με τις λάμπες οικονομίας, που περιέχουν υδράργυρο, οι λάμπες LED δεν περιέχουν επικίνδυνα τοξικά υλικά.

Ποικιλία χρωμάτων: Βγαίνουν σε πληθώρα χρωμάτων, χωρίς την χρήση φίλτρων που απαιτούν οι παραδοσιακοί μέθοδοι φωτισμού, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά χρώματα σε διάφορα σημεία του χώρου μας, ενώ είναι πιο αποδοτικά και χαμηλώνουν το αρχικό κόστος

Δυνατότητα dimming: Σε αντίθεση με τις κανονικές λάμπες, λειτουργούν με dimmer, για να μπορούμε να αυξομειώσουμε την ένταση φωτός. (theledcompany.gr, blog.ledcosmos.gr)

2.6 Μειονεκτήματα λαμπτήρων LED

Κόστος: Το κόστος αγοράς των λαμπτήρων LED είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό των συμβατικών λαμπτήρων φωτισμού.

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

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

Κατευθυντική δέσμη φωτός: Γενικά η δέσμη φωτός, που εκπέμπεται από λαμπτήρες LED, τείνει να είναι περισσότερο κατευθυντική απ' ό,τι στις άλλες τεχνολογίες φωτισμού. Αυτό σημαίνει ότι η δέσμη φωτός μάλλον εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο σημείο παρά διαχέεται ομοιόμορφα στο χώρο.

Ευαισθησία εξαρτημάτων: Αποτελούνται από μικροσκοπικά λαμπάκια και ένα κύκλωμα που τους επιτρέπει να λειτουργούν όπως πρέπει. Όλο το σύνολό τους, αν και δεν ζεσταίνεται συνήθως, είναι ευαίσθητο στις υψηλές θερμοκρασίες. Αν για κάποιο λόγο ζεσταθεί, υπάρχει κίνδυνος να αστοχήσει κάποιο μέρος του κυκλώματος κι έτσι να μην λειτουργεί όλο το κύκλωμα, οπότε να χρειάζεται όλο αντικατάσταση (theledcompany.gr, blog.ledcosmos.gr)

2.7 Εφαρμογές των LED's

Η χρησιμοποίηση των LED ενδείκνυται για εφαρμογές, όπως:

- ο γενικός και τοπικός φωτισμός εσωτερικών χώρων,
- οι φωτεινές επιγραφές,

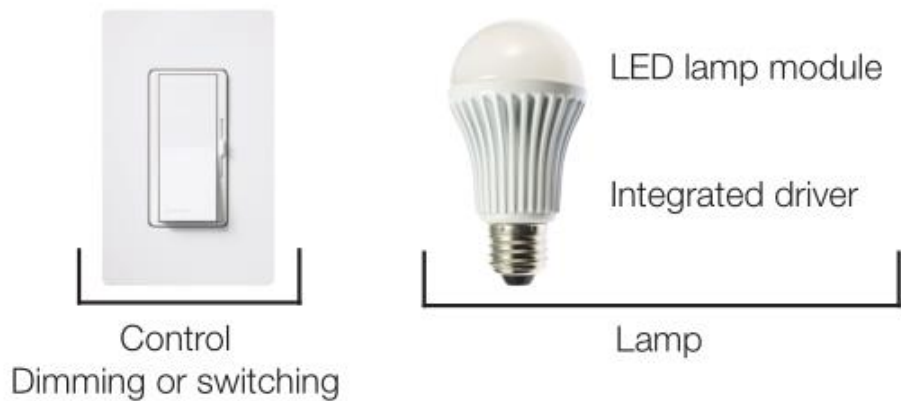
- η ανάδειξη αρχιτεκτονικών και διακοσμητικών λεπτομερειών,
- η σηματοδότηση κυκλοφορίας,
- ο φωτισμός προσανατολισμού στα κτίρια,
- η σήμανση οδών διαφυγής και
- τα μοντέρνα συμπαγή φωτιστικά με δυνατότητα έλεγχου έντασης και χρώματος (electrologos.gr)

2.8 Τύποι προϊόντων LED για φωτισμό

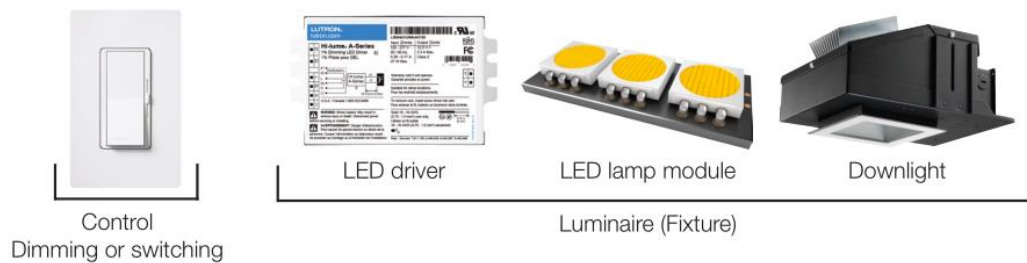
Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι φωτισμού LED: η λυχνία LED (γνωστή επίσης ως LEDi) και το φωτιστικό LED.

Οι λυχνίες LED έχουν συνήθως βιδωτές υποδοχές τύπου Edison, και προορίζονται για να αντικαταστήσουν τις τυπικές λάμπες πυρακτώσεως ή CFL. Υπάρχουν επίσης λαμπτήρες LED που σκοπός τους είναι η αντικατάσταση άλλων πηγών που χρησιμοποιούνται σε πολυελαίους. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι βάσεις αυτών των λαμπτήρων έχουν οδηγούς που καθορίζουν κατά πόσο η λάμπα έχει τη δυνατότητα dimming και αν ναι, την απόδοσή της.

Τα φωτιστικά LED μπορεί να είναι εντοιχισμένα φώτα, φώτα καθόδου, κρεμαστά φωτιστικά και φωτιστικά troffer (ορθογώνιο φωτιστικό που ταιριάζει σε ένα αρθρωτό επίπεδο οροφής), και έχουν συνήθως έναν οδηγό τοποθετημένο μέσα στο περίβλημα ή σε απομακρυσμένη θέση από την πηγή LED. Οι κατασκευαστές των φωτιστικών συνήθως προσφέρουν διάφορες επιλογές όσον αφορά τον οδηγό (για το ίδιο εξάρτημα) ώστε να υπάρχει υποστήριξη διαφορετικών τεχνολογιών ελέγχου (έλεγχος φάσης ή ψηφιακός έλεγχος) ή εφαρμογών (δυνατότητα dimming ή μη) (Biery et al., 2014).



Σχήμα 7 Λαμπτήρας LEDi και το σύστημα ελέγχου του (Biery et al., 2014).



Σχήμα 8 Φωτιστικό σύστημα LED με τον οδηγό και το σύστημα ελέγχου του (Biery et al., 2014).

2.9 Ρύθμιση των LED

2.9.1 Οδηγοί LED

Τα τσιπ LED είναι συσκευές χαμηλής τάσης που χρειάζονται επιπλέον ηλεκτρονικά εξαρτήματα για τη μετατροπή της τάσης τροφοδοσίας, στη χαμηλή τάση που απαιτείται για τις λυχνίες LED. Αυτά τα ηλεκτρονικά μπορούν επίσης να ερμηνεύσουν τα σήματα ελέγχου και να μειώσουν καταλλήλως την ένταση των LED. Οι συσκευές αυτές χαρακτηρίζονται ως οδηγοί LED (Biery et al., 2014).

Οι λυχνίες LED τροφοδοτούνται από δύο διαφορετικούς τύπους οδηγών. Η έξοδος του οδηγού LED μπορεί να είναι σταθερής τάσης (συνήθως 12 V ή 24 V) ή σταθερού ρεύματος (π.χ. 350mA, 700mA ή 1050mA). Ο κατασκευαστής επιλέγει τον τύπο του οδηγού και την

κατάλληλη ρύθμισή του ώστε να ταιριάζει με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις του φωτιστικού LED που θα χρησιμοποιηθεί (IES, 2013).

2.9.2 Οδηγοί σταθερής τάσης

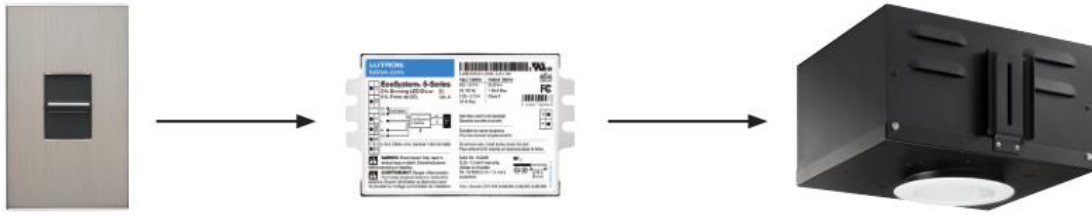
Ο οδηγός σταθερής τάσης παρέχει μια προκαθορισμένη σταθερή τάση στα δομικά στοιχεία του LED τα οποία είναι σε παράλληλη διάταξη. Ο οδηγός σταθερής τάσης χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου υπάρχει μεταβλητή ποσότητα φωτιστικών, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές κρυφού φωτισμού. Έχουν συνήθως έξοδο τάσης 12 V ή 24 V, αν και υπάρχει δυνατότητα και άλλων τάσεων εξόδου. Οι οδηγοί σταθερής τάσης μπορούν να ρυθμιστούν μόνο μέσω μιας μεθόδου PWM.



Σχήμα 9 Παράδειγμα οδηγού σταθερής τάσης

2.9.3 Οδηγοί σταθερού ρεύματος

Οι οδηγοί σταθερού ρεύματος παρέχουν ένα σταθερό ρεύμα, πχ 700mA, σε μια συγκεκριμένη μονάδα LED που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε αυτή την τιμή ρεύματος. Η εφαρμογή τους είναι ιδιαίτερα κατάλληλη σε καθοδικά φώτα, απλίκες ή άλλα φωτιστικά LED που χρησιμοποιούν μόνο μία μονάδα LED ανά οδηγό (παρόμοια με ένα λαμπτήρας φθορισμού με το περίβλημά του). Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι μείωσης της έντασης του ρεύματος στους οδηγούς σταθερού ρεύματος κατά τη μείωση του φωτισμού: η διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM) και η μείωση συνεχούς ρεύματος (CCR) (Biery et al., 2014).



Σχήμα 10 Παράδειγμα οδηγού σταθερού ρεύματος

2.9.4 Επιλογή οδηγού LED

Οι οδηγοί σταθερού ρεύματος και σταθερής τάσης δεν είναι εναλλάξιμοι. Οι ηλεκτρικές απαιτήσεις και ο σχεδιασμός του φορτίου LED καθορίζουν ποιος οδηγός είναι ο καταλληλότερος. Συχνά αυτό καθορίζεται από την εφαρμογή, αλλά η διαμόρφωση των LED εξακολουθεί να είναι ο καθοριστικός παράγοντας για το αν είναι κατάλληλος ένας οδηγός σταθερής τάσης ή ρεύματος. Γενικά, η επιλογή του τύπου του οδηγού εξαρτάται από τον κατασκευαστή του φωτιστικού (IES, 2013).

Ο οδηγός είναι το βασικό στοιχείο για τον καθορισμό της καλύτερης δυνατής ρύθμισης φωτισμού των λαμπτήρων ή φωτιστικών LED. Επιπλέον, ο οδηγός LED είναι μια πηγή πιθανής αποτυχίας για το φωτιστικό LED. Τα μακράς διάρκειας οφέλη των LED μειώνονται σημαντικά αν ο οδηγός δεν έχει σχεδιαστεί ειδικά για μια εξίσου μεγάλη διάρκεια ζωής. Πέρα από τη συμβατότητα με το LED, οι οδηγοί LED πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα ώστε να ταιριάζουν στους μηχανικούς περιορισμούς της μονάδας.

Ο οδηγός LED είναι απαραίτητος σε ένα σύστημα LED. Δεδομένου ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται από το LED πρέπει να ρέει σε μία κατεύθυνση, πρέπει να χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα (DC). Μια μικρή διακύμανση στην τάση εισόδου θετικής πόλωσης θα προκαλέσει μεγάλες διακυμάνσεις ρεύμα που διέρχεται μέσω της διόδου. Η πηγή συνεχούς ρεύματος είτε πρέπει να είναι ένα σταθερό ρεύμα ή να υπάρχει μια συσκευή περιορισμού του ρεύματος (Giamello, 2010).

2.10 Έλεγχος ισχύος και φωτεινής ροής

Η πιο βασική μορφή ελέγχου είναι η εναλλαγή της γραμμής τάσης. Η εναλλαγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα ενεργειακής διαχείρισης που διαθέτουν δυνατότητα ανίχνευσης του φωτός της ημέρας.

Όλοι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν τη δυνατότητα dimming έως αρκετά κάτω από 1% του αντιληπτού φωτός. Αντίθετα, το εύρος φωτεινότητας ενός λαμπτήρα LED μπορεί να διαφέρει σημαντικά από τη μία συσκευή στην άλλη (Cooper, 2011).

Μερικά LEDs μπορούν να ρυθμιστούν ώστε το κατώτερο dimming να είναι της τάξεως του 20%, ενώ ένα διαφορετικό προϊόν μπορεί να έχει την δυνατότητα έως και 1%. Επιπλέον, οι κατασκευαστές παραθέτουν το μετρούμενο επίπεδο φωτός, π.χ. 10%, αλλά οι καταναλωτές δεν είναι εξοικειωμένοι με την έννοια του αντιληφθέντος φωτός.

- Μετρούμενη έξοδος φωτός είναι η μετρήσιμη τιμή του φωτός με τη χρήση ενός φωτόμετρου ή κάποιας παρόμοια συσκευής. Αυτό είναι το ποσοστό dimming που μπορεί να προσφέρει η μονάδα, και αναγράφεται στα φύλλα προδιαγραφών του προϊόντος.
- Αντιληπτό φως είναι η ποσότητα του φωτός που ερμηνεύει το ανθρώπινο μάτι ως αποτέλεσμα της διαστολή της κόρης. Η κόρη του ματιού διαστέλλεται σε χαμηλότερα επίπεδα φωτός, κάνοντας την ποσότητα του φωτός να γίνεται αντιληπτή ως υψηλότερη από την μετρούμενη (π.χ. 20 τοις εκατό μετρούμενου φωτός ισούται με 45 τοις εκατό αντιληπτού φωτός). Η εξίσωση για τον προσδιορισμό του αντιληπτού φωτός είναι η τετραγωνική ρίζα του ποσοστού του μετρούμενου φωτός (π.χ. $\sqrt{0.20} = 0.45$). (Cooper, 2011):

Ο οδηγός και μόνο (είτε βρίσκεται στο εσωτερικό του λαμπτήρα είτε είναι εξωτερικός οδηγός) όχι μόνο καθορίζει το χαμηλότερο δυνατό επίπεδο dimming, αλλά και την καλύτερη δυνατή απόδοση dimming, αν είναι ομαλή και συνεχής, ή ασταθής και γεμάτη τρεμόπαιγμα. Χρησιμοποιώντας λανθασμένο τύπο ελέγχου, ακόμη και αν ο οδηγός είναι σε θέση να παρέχει εξαιρετική απόδοση dimming, μπορεί να οδηγήσει σε κακή ποιότητα dimming λόγω ασυμβατότητας μεταξύ του οδηγού και του ελέγχου (Cooper, 2011).

Ακόμη πιο σημαντική είναι η εξάλειψη του τρεμοπαίγματος (flicker). Το τρεμόπαιγμα είναι η απροσδόκητη μεταβολή του φωτός σε επίπεδο που είναι ορατό στο ανθρώπινο μάτι. Αυτό συμβαίνει συχνότερα στα LED, λόγω των εξαιρετικά γρήγορων αλλαγών στο φως εξόδου που προκαλούνται από το τσιπ που αντιδρά στις αλλαγές του ρεύματος εισόδου σε μικροδευτερόλεπτα. Το τρεμόπαιγμα μπορεί να προκαλείται από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου γραμμής, τον έλεγχο του θορύβου, την αντοχή των υλικών κατασκευής και τον κακό σχεδιασμό του οδηγού του LED. Το τρεμόπαιγμα μπορεί να είναι συνεχές (να συμβαίνει όλη την ώρα) ή διαλείπον (κάτι που συμβαίνει μόνο μερικές φορές ή σε ορισμένα επίπεδα φωτός). Ένας καλός οδηγός θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλους αυτούς τους εσωτερικούς και εξωτερικούς παραγόντες και να εξακολουθεί να παρέχει ομαλό και συνεχές dimming, χωρίς τρεμόπαιγμα.

Ένας σωστά σχεδιασμένος οδηγός ρύθμισης της έντασης δεν πρέπει να επιτρέπει το τρεμόπαιγμα σε κανένα επίπεδο φωτισμού, καθώς επίσης θα πρέπει να μην συναντά κανένα από τα παρακάτω προβλήματα (Biery et al., 2014):

- **Pop-on:** Αφού εξασθενήσει σε ένα χαμηλό επίπεδο φωτισμού και απενεργοποιηθεί, μερικές φορές ο λαμπτήρας LED ή ο οδηγός LED δεν θα ανάψει μέχρι να μετακινηθεί ο διακόπτης του dimming στο 20, 30 ή 40%. Αυτό αναφέρεται ως «pop-on», το οποίο είναι ιδιαίτερα δύσκολο σε εφαρμογές τριών τμημάτων, όπου τα φώτα πρέπει να είναι σε θέση να δυναμώνουν και να χαμηλώνουν από διαφορετικές τοποθεσίες, όχι μόνο από την κύρια κονσόλα ελέγχου.
- **Drop-out:** Το φως θα πρέπει να απενεργοποιείται μόνο όταν απενεργοποιείται το dimmer. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των διαθέσιμων ρυθμίσεων σε πολλά συστήματα dimmer ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα φώτα παραμένουν αναμμένα στο χαμηλότερο επίπεδο φωτισμού, όταν το dimmer είναι στη χαμηλότερη ένδειξη.
- **Dead-travel:** Η ρύθμιση του dimmer χωρίς αντίστοιχη μεταβολή του φωτός είναι κάτι το ανησυχητικό και ανεπιθύμητο.
- **Θόρυβος:** Η ύπαρξη βουητού από τον λαμπτήρα, τον οδηγό ή το dimmer είναι μη αποδεκτή.
- **Λαμπύρισμα:** Μικρές αλλαγές στην ένταση του φωτός, συνήθως παρατηρούνται σε μέτρια έως χαμηλά επίπεδα φωτισμού, και συχνά μόνο στην περιφερειακή όραση. Συχνά, οι όροι τρεμοπαίγμα και λαμπύρισμα χρησιμοποιούνται με την ίδια έννοια.

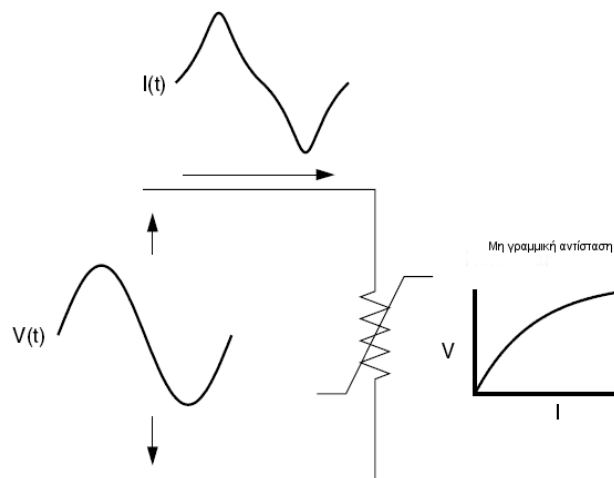
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ”

3.1 Αρμονικές

3.1.1 Ορισμός-περιγραφή

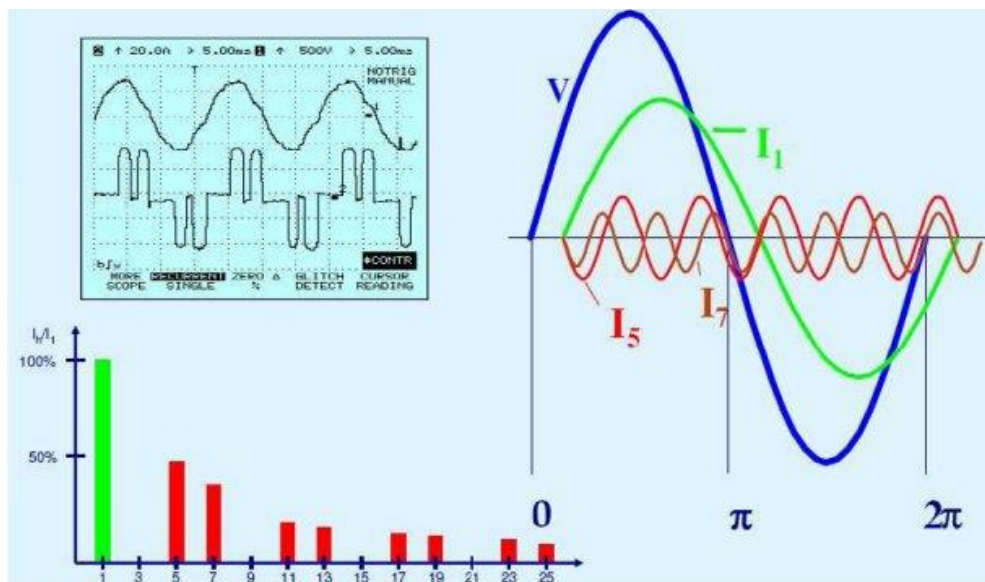
Στα συστήματα ισχύος η αρμονική παραμόρφωση προκαλείται από μη γραμμικές διατάξεις. Σε μια μη γραμμική διάταξη ισχύει ότι το διαρρεόμενο ρεύμα σε αυτή δεν είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται (Σχήμα 9). Αυξάνοντας την τάση, το ρεύμα μεταβάλλεται δυσανάλογα ή με τρόπο παραμορφωμένο λαμβάνοντας μια διαφορετική κυματομορφή. Αυτό αποτελεί μια συνήθης πηγή αρμονικής παραμόρφωσης σε ένα σύστημα ισχύος (Μιχαλάκος, 2007).



Σχήμα 11 Παραμόρφωση ρεύματος προκαλούμενη από μη γραμμική αντίσταση (Μιχαλάκος, 2007)

Οποιαδήποτε περιοδική παραμορφωμένη κυματομορφή της τάσης μπορεί να αναπαρασταθεί χρησιμοποιώντας ανάλυση Fourier ως το άθροισμα από καθαρά συνημίτονα με συχνότητα ίση με την ονομαστική και ακέραια πολλαπλάσια αυτής. Η ονομαστική συχνότητα ονομάζεται θεμελιώδης συχνότητα. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμορφωμένες μη ημιτονοειδής κυματομορφές. Το σύστημα αναλύεται για κάθε αρμονική ξεχωριστά και το

τελικό αποτέλεσμα λαμβάνεται από την υπέρθεση των ξεχωριστών αποκρίσεων για κάθε αρμονική (Σχήμα 10). Όταν η θετική και η αρνητική ημιπερίοδος μιας κυματομορφής έχουν όμοια σχήματα τότε η προκύπτουσα σειρά Fourier περιέχει μόνο περιττές αρμονικές (η ύπαρξη άρτιων αρμονικών είναι σπάνια). Μία ημιτονική κυματομορφή με συχνότητα n φορές μεγαλύτερη από την θεμελιώδη (το n είναι ακέραιος αριθμός) καλείται αρμονική διαταραχή. Ο λόγος μεταξύ της αρμονικής συχνότητας και της θεμελιώδης συχνότητας (n) καλείται τάξη της αρμονικής (Πληθάρας, 2012). Οι τάξεις των αρμονικών (3ης, 5ης, 7ης ... τάξης) που εμφανίζονται σε συχνότητες πολλαπλάσιες των 50 Hz, μπορούν να διαρρεύσουν από τα καλώδια τροφοδοσίας των φορτίων και να πλήξουν ολόκληρη την ηλεκτρική εγκατάσταση ('Seman', 2012).



Σχήμα 12 Ανάλυση ημιτονοειδούς σήματος, όπου διακρίνονται οι αρμονικές 1ης, 3ης, 5ης και 7ης τάξης ('Seman', 2012).

3.1.2 Κατηγοριοποίηση

Η παρουσία αρμονικών υπολογίζεται μέσω του δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) (total harmonic distortion). Μπορούμε να διακρίνουμε τις αρμονικές της τάσης και τις αρμονικές ρεύματος. Οι αρμονικές τάσης καταγράφονται με τον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (THDV) (λόγος της ενεργού τιμής της αρμονικών τάσης προς την

ενεργό τιμή της τάσης της θεμελιώδους συχνότητας), ενώ οι αρμονικές ρεύματος καταγράφονται με τον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος (THDI).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} V_n^2}}{V_1}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1}$$

Η αρμονική παραμόρφωση μπορεί να είναι ('NTUA', 2007):

- αρμονική παραμόρφωση μόνιμης κατάστασης (π.χ. λόγω ηλεκτρονικών ισχύος) για χαρακτηριστικά με σχεδόν σταθερή μέση τιμή (αμετάβλητη χρονικά)
- αρμονική παραμόρφωση μεταβατικής κατάστασης (π.χ. λόγω ηλέκτρισης μετασχηματιστή ή πυκνωτή) για χαρακτηριστικά με σαφώς μεταβαλλόμενη με το χρόνο μέση τιμή

3.1.3 Κανονισμοί

Τα πιο κοινά πρότυπα καθορισμού ορίων για τις αρμονικές περιγράφονται παρακάτω (Heydt, 2000):

Διεθνή πρότυπα, τα οποία είναι τα:

- τα IEC (κυρίως TC 77)
- τα CIGRE (SC 36)
- το ευρωπαϊκό πρότυπο (EN)
- τα εθνικά πρότυπα (π.χ., BNS)

Πρότυπα στη Βόρεια Αμερική τα οποία είναι τα:

- τα IEEE (διεθνή στην ουσία, ως επί το πλείστον PES και IAS)
- τα ANSI
- τα UL, NEMA, NFPA, NIST,

Αναλύουμε κάποια από αυτά:

Το EN 61800-3 (IEC 61800-3): Τα ηλεκτρικά συστήματα κίνησης ρυθμιζόμενης ταχύτητας.

Στο 3^ο μέρος με την ονομασία «Πρότυπα προϊόντων EMC» περιλαμβάνονται ειδικές μέθοδοι δοκιμής. Οι χώρες του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (ΕΟΧ) έχουν συμφωνήσει σε κοινές ελάχιστες κανονιστικές απαιτήσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ελεύθερη κυκλοφορία των προϊόντων εντός αυτών. Η σήμανση CE υποδεικνύει ότι το προϊόν λειτουργεί σύμφωνα με τις οδηγίες που ισχύουν για το προϊόν. Το EN 61800-3 είναι το πρότυπο προϊόντων για τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα μετάδοσης κίνησης ηλεκτρικής ενέργειας με ρυθμιζόμενη ταχύτητα (PDS) για το μπορούν να εμπορεύονται ελεύθερα εντός του ΕΟΧ. Ο κατασκευαστής πρέπει να παρέχει τεκμηρίωση PDS, για το τρέχον αρμονικό επίπεδο, υπό ονομαστικές συνθήκες και μέχρι παραγγελία 25 τεμαχίων, ως ποσοστό της ονομαστικής θεμελιώδης τρέχουσας θύρας τροφοδοσίας. Για παραγγελίες έως και 40, το PDS θα πρέπει να συνδεθεί με έναν υπολογιστή με $R_{sc} = 250$ και να έχει αρχική παραμόρφωση τάσης λιγότερο από 1%. Η εσωτερική αντίσταση του δικτύου θα πρέπει να θεωρείται καθαρή αντίσταση. Σε ένα δημόσιο δίκτυο παροχής χαμηλής τάσης, τα όρια και οι απαιτήσεις του IEC 61000-3-2 ισχύουν για εξοπλισμό με ονομαστικό ρεύμα ≤ 16 A Η χρήση του μελλοντικού IEC 61000-3-4 συνιστάται για εξοπλισμό με ονομαστικό ρεύμα > 16 A . Αν το PDS χρησιμοποιείται σε μία βιομηχανική εγκατάσταση, θα πρέπει να γίνει μια λογική οικονομική προσέγγιση σύμφωνα με τα συμφωνημένα από το IEC 61000-2-4 όρια είτε για την παραμόρφωση της τάσης ή για το σύνολο των εκπομπών των αρμονικών ρεύματος ('ABB', 2013).

Το IEC 61000-2-2: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC).

Στο 2^ο μέρος με την ονομασία «Περιβάλλον - Τμήμα 2» περιλαμβάνονται τα επίπεδα συμβατότητας των χαμηλής συχνότητας επαγόμενων διαταραχών και σηματοδότησης στα δημόσια συστήματα παροχής ρεύματος χαμηλής τάσης. Τα φαινόμενα διαταραχής περιλαμβάνουν αρμονικές, ενδιάμεσες αρμονικές, διακυμάνσεις τάσης, πτώσεις τάσης και ούτω καθεξής. Βασικά το πρότυπο αυτό καθορίζει τα κριτήρια σχεδιασμού για τον κατασκευαστή του εξοπλισμού, και είναι σύμφωνα με τα όρια που καθορίζονται στο EN 50160 για την ποιότητα της τάσης ('ABB', 2013).

Το IEC 61000-2-4: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC).

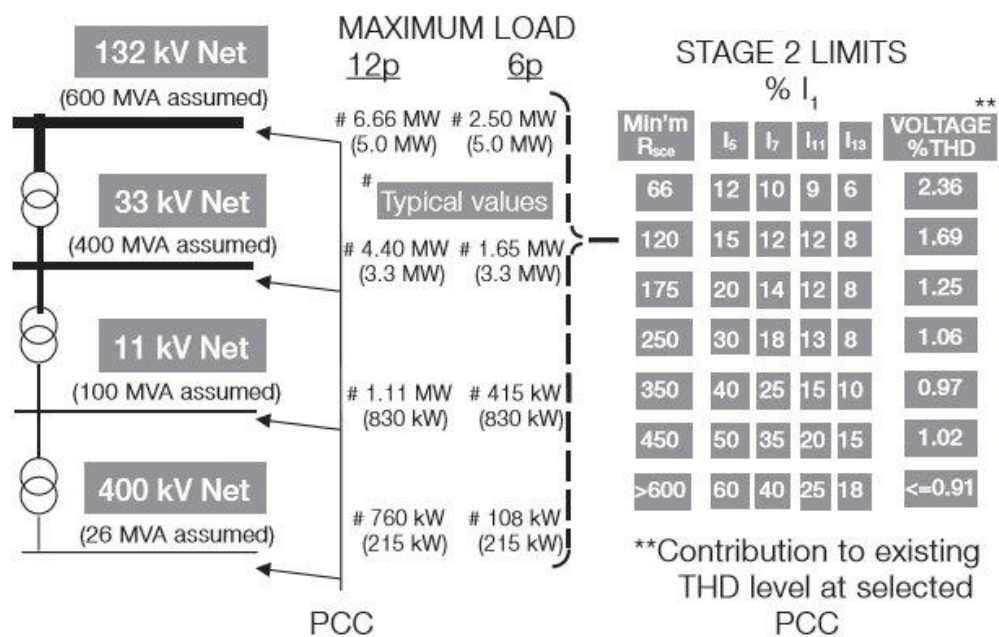
Στο 2^ο μέρος με την ονομασία «Περιβάλλον - Τμήμα 4» περιλαμβάνονται τα επίπεδα συμβατότητας στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις για επαγόμενες διαταραχές χαμηλής συχνότητας. Το IEC 61000-2-4 είναι παρόμοιο με το πρότυπο IEC 61000-2-2, αλλά δίνει τα επίπεδα συμβατότητας για βιομηχανικά και μη δημόσια δίκτυα.

Το IEC 61000-3-2: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC).

Στο 3^ο μέρος με την ονομασία «Όρια - Τμήμα 2» περιλαμβάνονται τα όρια εκπομπής για τις αρμονικές ρεύματος (με ρεύμα εξοπλισμού <16 A ανά φάση). Το Πρότυπο αυτό ασχολείται με τα όρια εκπομπών των αρμονικών ρεύματος του επιμέρους εξοπλισμού που συνδέεται με τα δημόσια δίκτυα. Η ημερομηνία εφαρμογής του παρόντος Προτύπου ήταν η 1η Ιανουαρίου 2001 ('PSERC EMI', 2002).

Το IEC 61000-3-4: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) (Σχήμα 11).

Με την ονομασία «Τεχνική έκθεση τύπου II» περιλαμβάνονται τα όρια εκπομπών των αρμονικών ρεύματος για μεμονωμένο εξοπλισμό με ονομαστικό ρεύμα από 16 A έως 75 A Ισχύει για τα δημόσια δίκτυα που έχουν ονομαστικές τάσεις από 230 V μονοφασικό και 600 V τριφασικό. Το πρότυπο παρέχει τρία διαφορετικά στάδια για τις διαδικασίες σύνδεσης του εξοπλισμού ('ABB', 2013).



Σχήμα 13 Προτεινόμενα όρια αρμονικών στο πρότυπο IEC 61000-3-4 ('ABB', 2013)

Το EN 50160: Πρότυπα καθορισμού χαρακτηριστικών συστημάτων χαμηλής και μέσης τάσης.

Η αρχική εντολή του EN 50160 περιορίστηκε σε συστήματα χαμηλής και μέσης τάσης διανομής και συγκεκριμένα στα χαρακτηριστικά της τάσης τροφοδοσίας όπως η συχνότητα,

το μέγεθος, η κυματομορφή και η συμμετρία των τάσεων των τριών φάσεων. Χαμηλή τάση ορίζεται με ανώτατο όριο τα 1 kV RMS και η μέση τάση μεταξύ 1kV και 35 kV.

3.2 Αίτια

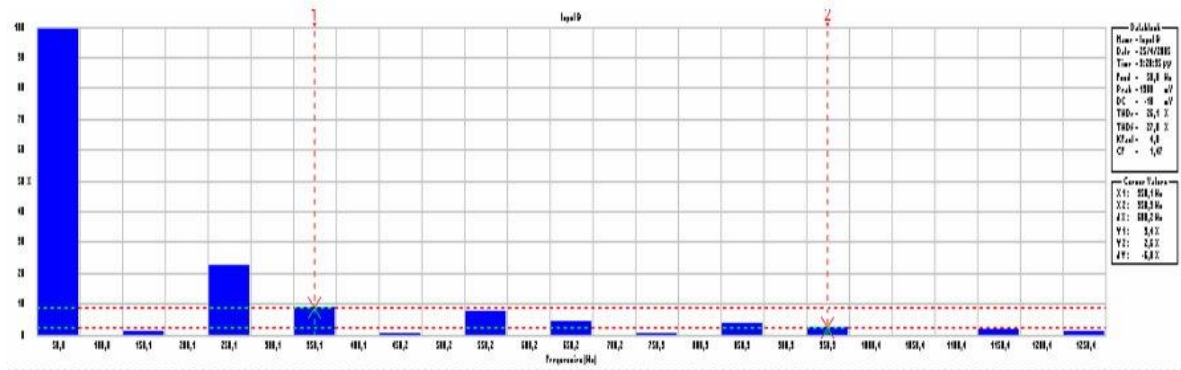
Κοινές μη γραμμικές διατάξεις είναι τα συστήματα μετάδοσης μεταβλητής ταχύτητας, οι υπολογιστές, τα ηλεκτρονικά συστήματα φωτισμού και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Οι επιδράσεις των αρμονικών σε αυτές τις μη γραμμικές διατάξεις μπορεί να είναι η υπερθέρμανση των μετασχηματιστών, των καλωδίων, των γεννητριών και των πυκνωτών που είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο τροφοδοτικό με τις συσκευές δημιουργίας των αρμονικών. Ως συνέπεια, οι ηλεκτρονικές οθόνες ή ο φωτισμός μπορεί να τρεμοπαίξει, οι διακόπτες του κυκλώματος μπορεί να μη δουλεύουν, οι υπολογιστές μπορεί να δώσουν ψευδείς ενδείξεις μέτρησης κτλ. Εάν τα αίτια των παραπάνω συμπτωμάτων δεν είναι γνωστά, τότε πρέπει να διερευνηθεί η αρμονική παραμόρφωση της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ('ABB', 2013).

Κάποια από τα αίτια θα μπορούσε να είναι:

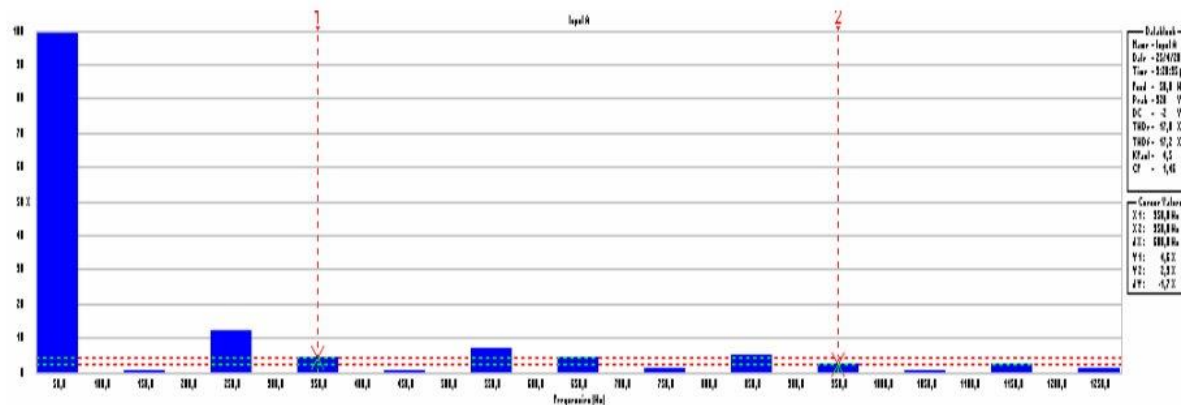
- Κατασκευαστικές «ατέλειες» του εξοπλισμού (μη ημιτονοειδής κατανομή Η/Μ πεδίων –ΜΕΔ σε ηλεκτρικές μηχανές)
- Μη γραμμική συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών (υστέρηση, κορεσμός, δινορεύματα)
- Μη γραμμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών φορτίων (υψικάμινοι, ηλεκτροσυγκολλήσεις κοκ)
- Εκτεταμένη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος ('NTUA', 2007):

3.2.1 Μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος

Οι παραγόμενες αρμονικές μπορεί να εμφανίζονται λόγω ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε τις αρμονικές τάσης από DC/AC inverter.



L1 at 500kW load - voltage

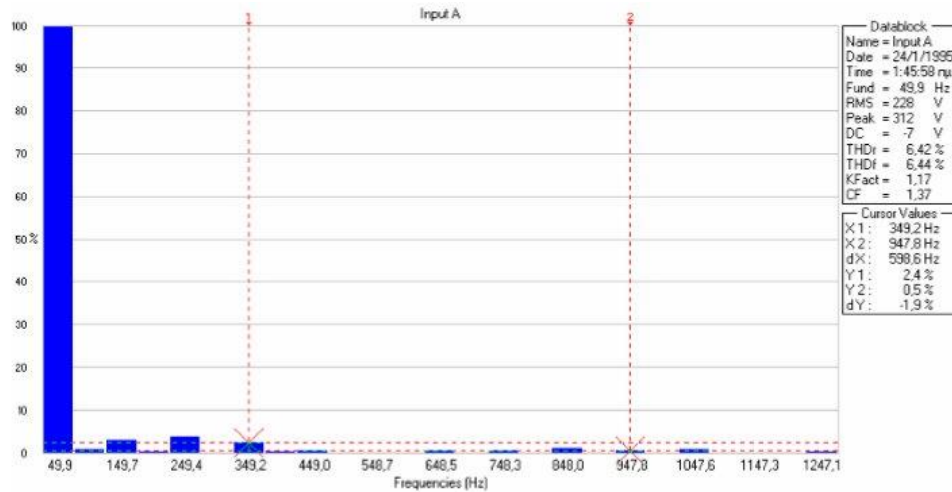


L1 at 500kW load - current

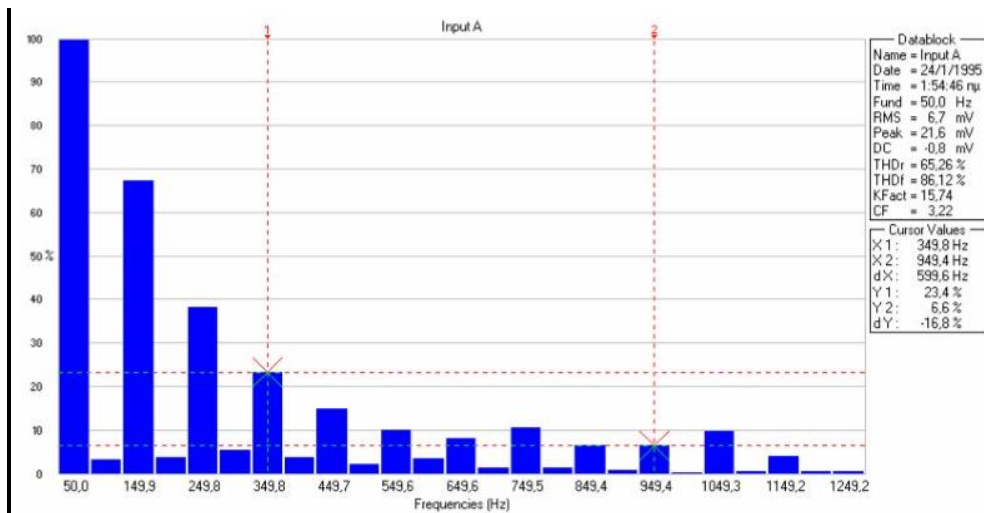
Σχήμα 1 Αρμονικές τάσης από DC/AC inverter ('NTUA', 2007)

3.2.2 Φόρτιση πυκνωτή

Επίσης, μπορεί να συμβεί αλλαγή του αρμονικού φάσματος συναρτήσει της φόρτισης. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε τις μεταβολές των αρμονικών τάσεως εξόδου σε UPS 20 kVA.



	RMS	THD	1	3	5	7	9	11	13
R	228 V	6.4%	100%	2.9%	3.7%	2.4%	0.5%	0.1%	0.5%
S	232 V	6.6%	100%	4.2%	2.7%	2.8%	1.0%	0.7%	0.1%
T	221 V	5.5%	100%	2.6%	2.7%	3.0%	0.8%	0.5%	0.5%
N	6.5 V	99.5%							

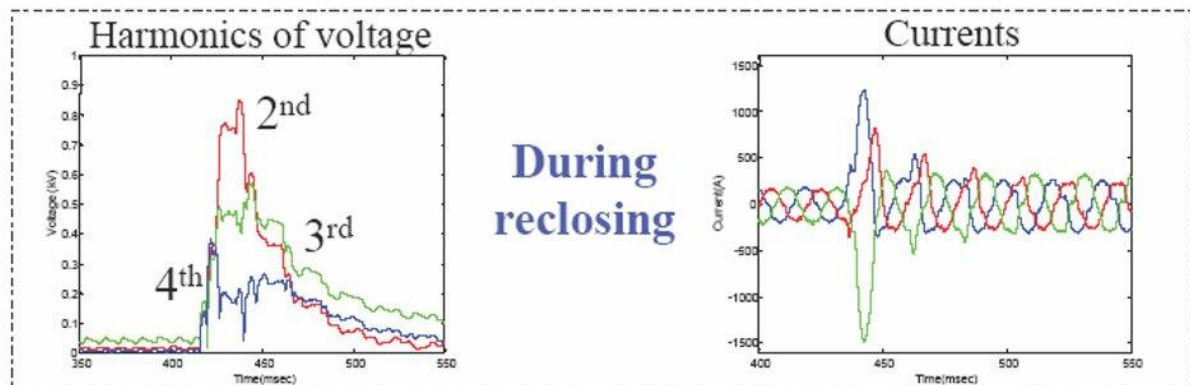


RMS	THD	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %
6.7 mV	65.0%	100	3,3	67,3	3,9	38,2	5,4	23,4	3,7	15,1	2,2	10	3,4	8,2
10.0 mV	53.6%	100	1,6	53,1	1,5	22,2	0,2	10,4	0,8	12,9	0,6	14	0,2	9,7
10.0 mV	51%	100	3,6	49,1	3,2	21,9	3	11,1	2,7	10,2	2,6	7,9	2,2	3,2

Σχήμα 15 Μεταβολή αρμονικών τάσης εξόδου σε UPS 20 kVA ('NTUA', 2007)

3.2.3 Ηλέκτριση μετασχηματιστή

Μία ακόμα αιτία θα μπορούσε να είναι και η ηλέκτριση του μετασχηματιστή. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις αρμονικές τάσης πριν και μετά την ηλέκτριση μετασχηματιστή.



Σχήμα 16 Αρμονικές τάσης πριν και μετά την ηλέκτριση μετασχηματιστή (στη δεύτερη αρμονική παρατηρείται το φαινόμενο σχήμα προστασίας) ('NTUA', 2007)

3.3 Επίδραση αρμονικών στο ηλεκτρικό δίκτυο και τον εξοπλισμό

Κάθε ηλεκτρολογικός εξοπλισμός, ανάλογα τον τρόπο λειτουργίας του, αποκρίνεται διαφορετικά όταν εφαρμοστεί σε αυτόν αρμονική τάση. Για παράδειγμα οι λαμπτήρες πυρακτώσεως δεν επηρεάζονται καθόλου ενώ οι μηχανές συγκόλλησης δυσλειτουργούν (Πληθάρας, 2012).

Γενικότερα, οι αρμονικές προκαλούν ποικίλα προβλήματα, τα οποία μπορεί να είναι:

1. Οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός κίνησης υπερθερμαίνονται λόγω της επιπρόσθετης φόρτισης. Αυτή η υπερθέρμανση οδηγεί σε μηχανική καταπόνηση, θόρυβο και δονήσεις κατά τη λειτουργία τους.
2. Ο ουδέτερος αγωγός υπερφορτίζεται, καθώς αποτελεί περίπτωση συμμετρικών φορτίων και συνεπώς το διανυσματικό άθροισμα των διαχεόμενων ρευμάτων δεν είναι πια μηδενικό. Ρεύματα διαφόρων συχνοτήτων προστίθενται συνεχώς αποτελώντας πλέον υπολογίσιμη ποσότητα, ενώ ταυτόχρονα οι τιμές τάσης μεταξύ ουδέτερου – γης φτάνουν μη αποδεκτά

όρια. Το αποτέλεσμα τις περισσότερες φορές είναι το ρεύμα του ουδετέρου να υπερβαίνει τα αποδεκτά όρια.

3. Στην περίπτωση που οι υπάρχουσες διατάξεις πυκνωτών συνδεδεμένοι με κάποιο κλάδο, εμφανίσουν ίδια συχνότητα με κάποιες από τις αρμονικές που υπάρχουν στο δίκτυο, τότε κινδυνεύουν να καταστραφούν. Αυτό γίνεται γιατί, η σύνθετη αντίσταση του κλάδου τείνει να ελαχιστοποιηθεί και άρα το ρεύμα τείνει να αυξηθεί. Η αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση του πλάτους των αρμονικών (ηλεκτρική ταλάντωση), της ενεργούς τάσης και έντασης, υπερθέρμανση των πυκνωτών και πιθανή καταστροφή του διηλεκτρικού τους υλικού ή των ασφαλειών τους.

4. Εάν τα μέσα ζεύξης και προστασίας φθαρούν μπορεί να λειτουργήσουν ανεπιθύμητα (ειδικά αν στηρίζονται σε θερμικά μοντέλα ή αν για να λειτουργήσουν χρειάζεται υπολογισμός της ενεργούς τιμής της έντασης με χρήση του πλάτους της παραμορφωμένης κυματομορφής).

5. Απώλεια στην αξιοπιστία της λειτουργίας του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και των γεννητριών.

6. Εμφάνιση λανθασμένων καταγραφών διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών από τις μετρητικές διατάξεις.

7. Αύξηση στην σπατάλη ενέργειας με οικονομικές συνέπειες

8. Μείωση της εφεδρείας της ηλεκτρικής εγκατάστασης, λόγω της αύξησης των ρεύματων στα καλώδια και στους ηλεκτρικούς πίνακες από τις αρμονικές. ('Seman', 2012).

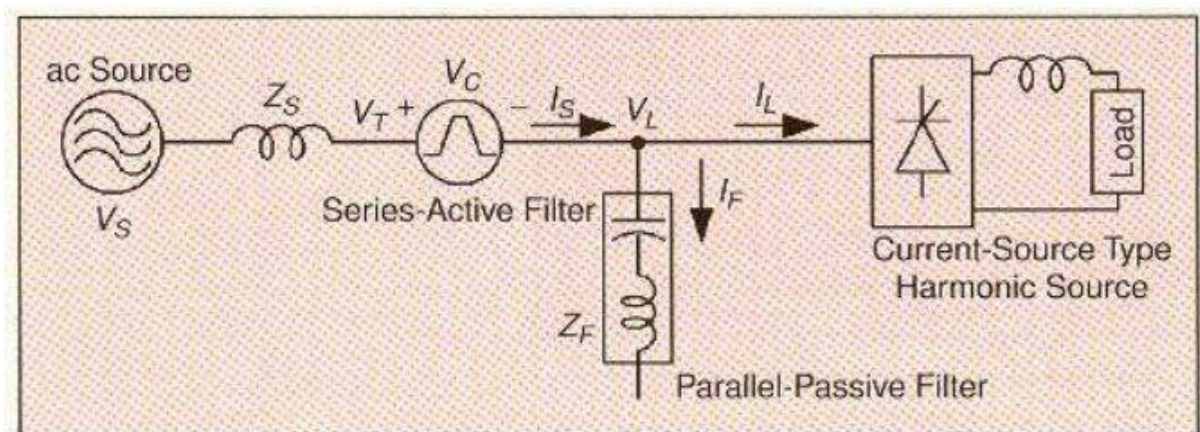
3.4 Παρακολούθηση ποιότητας ισχύος (power quality)

Σήμερα, η παρακολούθηση της ποιότητας ισχύος είναι απαραίτητη σε πολλές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας για τους βασικούς εμπορικούς πελάτες τους. Ένα σύστημα παρακολούθησης παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του ρεύματος, τις αιτίες των διαταραχών του συστήματος και την κατάσταση ενός πιθανού προβλήματος σε όλο το σύστημα, πριν προκληθεί δυσλειτουργία του εξοπλισμού. Η κύρια δυσκολία του συστήματος παρακολούθησης είναι ότι το δίκτυο αλλάζει συνεχώς. Γι' αυτό, μία από τις πιο κοινές παρανοήσεις στην ενασχόληση με τις αρμονικές είναι η διαφορά μεταξύ της παρακολούθησης ενός δικτύου και της μέτρησης των μεταβλητών ποιότητας ισχύος (Golkar, 2011). Επίσης, η βασική απαίτηση πάντα είναι η παραγωγή και μεταφορά ενέργειας να συμβαίνει με τον οικονομικότερο τρόπο. Αυτό βασικά σημαίνει ότι πρέπει εκμηδενισθούν όσο είναι δυνατό όλοι οι παράγοντες που προκαλούν απώλειες όπως είναι οι αρμονικές

παραμορφώσεις και αλλά και να υπάρχει βελτίωση της ατρωσίας του εξοπλισμού (Μιχαλάκος, 2007).

3.5 Τρόποι μείωσης των προβλημάτων λόγω των αρμονικών

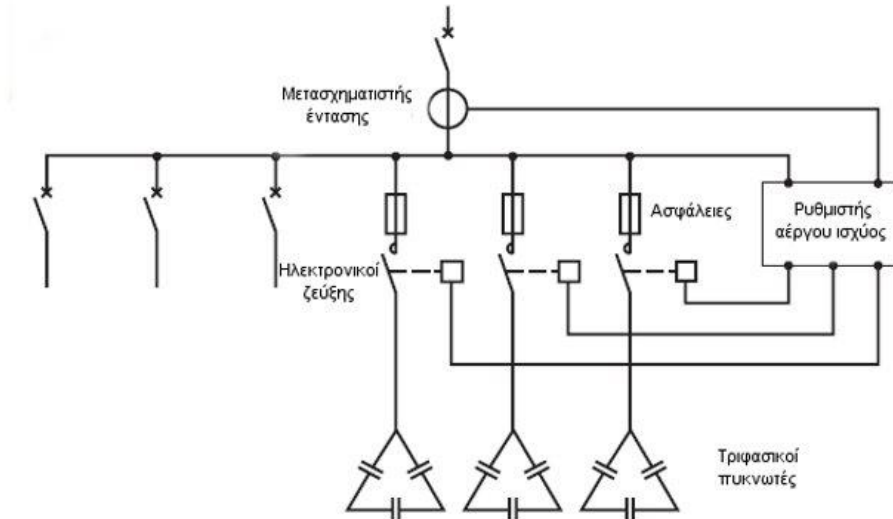
Ένας πιο συνήθης τρόπος μείωσης των προβλημάτων λόγω των αρμονικών και άρα αύξηση της ποιότητας ισχύος είναι η εγκατάσταση φίλτρων, συνήθως με τέτοια σειρά, που να στρέφουν τα ανεπιθύμητα αρμονικά ρεύματα πίσω στο φορτίο. Έτσι, τα αρμονικά ρεύματα αν και παραμένουν υψηλά, δεν διαδίδονται μέσω του φορτίου και άρα δεν προκαλούν αρμονική παραμόρφωση. Αυτά είναι τα παθητικά φίλτρα που όμως εμφανίζουν πολλά μειονεκτήματα όπως είναι ο κίνδυνος υπερφόρτισης και η εισαγωγή νέων συχνοτήτων συντονισμού. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν τα ενεργά φίλτρα, όπου σε αυτά το ρεύμα είναι πλήρως ελεγχόμενο και προσαρμοζόμενο στην κάθε παραμόρφωση τάσης και ρεύματος.



Σχήμα 17 Σε σειρά ενεργό και παθητικό φίλτρο παράλληλα με το μη γραμμικό φορτίο (s τα στοιχεία της γεννήτριας, C τα στοιχεία του ενεργού, F του παθητικού φίλτρου και L τα στοιχεία του καταναλωτή) (Πληθάρας, 2012).

Ακολούθησαν και άλλες τεχνικές μετριασμού των αρμονικών όπως για παράδειγμα οι βελτιώσεις δικτύου με διαχωρισμό των ευαίσθητων και “μολυσματικών” φορτίων και οι βελτιώσεις φορτίων. Συγκεκριμένα, τα βελτιωμένα φορτία εμπεριέχουν μειωμένη εκπομπή ρεύματος με μία μεγαλύτερη ημιτονοειδή κυματομορφή, αλλά επίσης διαθέτουν αυξημένη ατρωσία στις παραμορφώσεις της τάσης (Πληθάρας, 2012). Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος γίνεται με μαγνητική ενέργεια που επιστρέφει στο δίκτυο από τα μη αντισταθμισμένα κυκλώματα μπορεί να αποθηκευτεί προσωρινά στους πυκνωτές αντιστάθμισης. Έτσι, κάθε

φορά η άεργος ισχύς προέρχεται από τους πυκνωτές και όχι από την πηγή του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους αντιστάθμισης με διαφορά ως προς το σημείο ή την ταχύτητα (αυτόματες συστοιχίες πυκνωτών). Πάντως μείωση της εκπομπής τείνει να θεωρηθεί η ενδεδειγμένη μακροπρόθεσμη λύση (Μιχαλάκος, 2007).



Σχήμα 18 Αυτόματη συστοιχία πυκνωτών (Μιχαλάκος, 2007)

3.6 Αρμονικές από τη λειτουργία των LED

3.6.1 Εισαγωγή

Σε όλα τα οικιακά συστήματα φωτισμού LED, χρησιμοποιείται η τεχνική ελέγχου φάσης (dimmer) στην οποία το ρεύμα ενεργοποιείται μόνο για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Στα περισσότερα συστήματα dimmer, χρησιμοποιούνται η διαμόρφωση πλάτους (AM) ή το εύρους παλμού (PWM). Στη μέθοδο AM, η μείωση του ρεύματος μπορεί να προκαλέσει μείωση της φωτεινής ακτινοβολίας. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος PWM επιτρέπει αύξηση του ελέγχου του φωτός με την αλλαγή του κύκλου λειτουργίας. Ωστόσο, το σύστημα αυτό μπορεί να αυξήσει την πολυπλοκότητα του κυκλώματος και να μειώσει το χρόνο ζωής των λαμπτήρων LED. Τα LEDs γενικά, απαιτούν μια σταθερή τιμή συνεχούς τάση ρεύματος από μια πηγή DC χαμηλής τάσης. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητος ένας μετατροπέας για τη ρύθμιση της τάσης και τον έλεγχο του ρεύματος που εφαρμόζεται στις LED (Sohel et al., 2013).

3.6.2 Πρότυπα αρμονικών και βασική λειτουργία LED

Επειδή, η ισχύς του φορτίου είναι χαμηλή στα LED, οι οδηγίες που διέπουν την έγχυση αρμονικών δεν είναι ιδιαίτερα αυστηροί. Ως εκ τούτου, τα κυκλώματα ελέγχου του συντελεστή ισχύος είναι πιθανό να βρίσκονται στα χαμηλής ισχύος στραγγαλιστικά πηνία των LED. Διάφοροι τρόποι για τη μείωση των παραγόμενων αρμονικών και για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος είναι τα παθητικά ή ενεργά φίλτρα και η πυκνή διάταξη κυκλώματος.

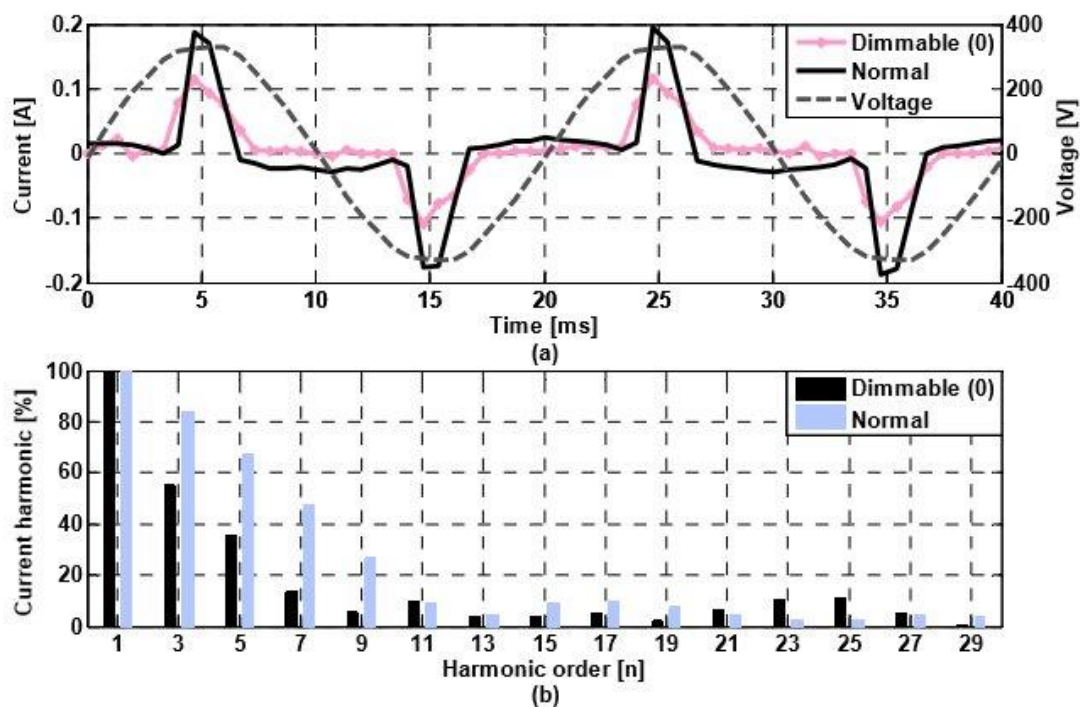
Παρόμοια με οποιαδήποτε άλλη συσκευή, οι λαμπτήρες LED, επίσης, πρέπει να συμμορφώνονται με τις διάφορες οδηγίες που ισχύουν για το προϊόν. Το πρότυπο IEC 61000-3-2 όπως είδαμε αξιολογεί και θέτει το όριο για τον εξοπλισμό ρεύματος $\leq 16A$ ανά φάση. Τα όρια εκπομπών για τους λαμπτήρες υποδιαιρούνται με βάση την ενεργή ισχύ μέχρι και άνω των 25W στην κατηγορία C. Οι λαμπτήρες που έχουν ενεργή ισχύ εισόδου μικρότερη ή ίση με 25W πρέπει να πληρούν τουλάχιστον ένα από τα δύο ακόλουθα κριτήρια. Το πρώτο είναι ότι η τρίτη αρμονική δεν πρέπει να υπερβαίνει το 86% της θεμελιώδους και η πέμπτη το 61%. Αυτό σημαίνει THD περίπου 105%. Ακόμη, το συνιστώμενο όριο παραμόρφωσης τάσης για εξοπλισμό της κατηγορίας C είναι 3% και 5% για τις μεμονωμένες αρμονικές και τη συνολική αρμονική παραμόρφωση (THDV) αντίστοιχα. Το δεύτερο κριτήριο δίνεται στον παρακάτω πίνακα για κάθε αρμονική σειρά (Sohel et al., 2013).

Πίνακας 4 Όρια του IEC 61000-3-2 για εξοπλισμό κατηγορίας C (Sohel et al., 2013)

Harmonics [n]	Class C [% of fundamental]
3	30 x PF
5	10
7	7
9	5
11	3
13	3
15 ≤ n ≤ 39	3

3.6.3 Αρμονικές που παράγονται από τα ρυθμιζόμενα LED

Η επίδραση των αρμονικών χαρακτηριστικών φαίνεται να είναι διαφορετική μεταξύ των απλών λαμπτήρων και των ρυθμιζόμενων LED. Για τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων, μία έρευνα χρησιμοποίησε απλούς και ρυθμιζόμενους λαμπτήρες LED με ίδια ονομαστική ισχύ (10 Watt) (Sohel et al., 2013). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το επίπεδο παραμόρφωσης των ρυθμιζόμενων LED είναι χαμηλότερο από το απλό σε πλήρη φωτεινότητα. Ωστόσο, στην περίπτωση των ρυθμιζόμενων LED, τα επίπεδα παραμόρφωσης αυξάνεται ραγδαία με τη μείωση της φωτεινότητας. Ως αποτέλεσμα, τα ρυθμιζόμενα LED σε χαμηλότερη φωτεινότητα είναι πιο προβληματικά από τα συμβατικά LED.



Σχήμα 19 Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ απλών και ρυθμιζόμενων LED (Sohel et al., 2013)

3.6.4 Σύγκριση με άλλου τύπου λαμπτήρες (CFL)

Έγινε σύγκριση της απόδοσης με τη δημιουργία αρμονικών των νέων ρυθμιζόμενων λαμπτήρων LED με τους συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού CFL λόγω του ότι είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ενεργειακά αποδοτικοί λαμπτήρες σήμερα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ρυθμιζόμενα LED 20 Watt με ρυθμιζόμενα CFL 20 Watt από το ίδιο κατασκευαστή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μορφές κύματος είναι εντελώς διαφορετικές μεταξύ τους λόγω των διαφορετικών κυκλωμάτων, αν και η μέγιστη κορυφή του CFL είναι

σχεδόν διπλάσια από εκείνη του LED. Γενικά οι λαμπτήρες CFL αποδίδουν καλύτερα με χαμηλή φωτεινότητα αλλά οι λαμπτήρες LED σε πλήρη φωτεινότητα δημιουργούν λιγότερες αρμονικές (Sohel et al., 2013).

3.6.5 Επίδραση LED στην ποιότητα ισχύος ενός συστήματος διανομής

Σε έρευνα που παρουσιάζεται στο τουρκικό περιοδικό Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Επιστημών Υπολογιστών (Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences), εξετάζεται η εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας LED σε σύστημα διανομής και η επίδραση τους στην ποιότητα ισχύος του συστήματος. (Turkish Journal of EECS, 2014)

Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι λαμπτήρων LED που διατίθενται στην τοπική αγορά της Μαλαισίας. Με βάση τα χαρακτηριστικά ταυτοποίησης, αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο λαμπτήρων στο πρόγραμμα MATLAB Simulink, το οποίο ονομάζεται χρονικά εξαρτώμενο μοντέλο πηγής ρεύματος. Στη συνέχεια το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε σε ένα δίκτυο διανομής μαζί με άλλα γραμμικά και μη γραμμικά φορτία, δηλαδή λαμπτήρες πυρακτώσεως, φορτία ηλεκτρονικών υπολογιστών και λαμπτήρες CFL. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μας δείχνουν ότι η αρμονική παραμόρφωση της τάσης μπορεί να υπερβεί το όριο προδιαγραφών IEC κατά 8% όταν σε ένα δίκτυο διανομής ενέργειας το 80% των λαμπτήρων πυρακτώσεως αντικατασταθεί με λαμπτήρες LED.

Οι λαμπτήρες LED παρουσιάζουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά και δημιουργούν έντονα παραμορφωμένο αρμονικό ρεύμα. Αυτή η αρμονική παραμόρφωση εξαρτάται από την εσωτερική ρύθμιση του στραγγαλιστικού πηνίου (ballast) και υπερβαίνει τη συνολική αρμονική παραμόρφωση (THDi) που καθορίζεται από ορισμένα πρότυπα. Μια λυχνία LED δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα για το δίκτυο ενέργειας, επειδή έχει μικρή ενεργή ισχύ (κάτω από 25 W), η οποία αντλεί μικρό ρεύμα εισόδου. Το αρμονικό αποτέλεσμα μπορεί να γίνει αισθητό σε ένα σύστημα που περιέχει μεγάλο αριθμό λαμπτήρων LED. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η εκτεταμένη χρήση των λαμπτήρων LED μπορεί να θεωρηθεί μεγάλη αρμονική πηγή ρεύματος.

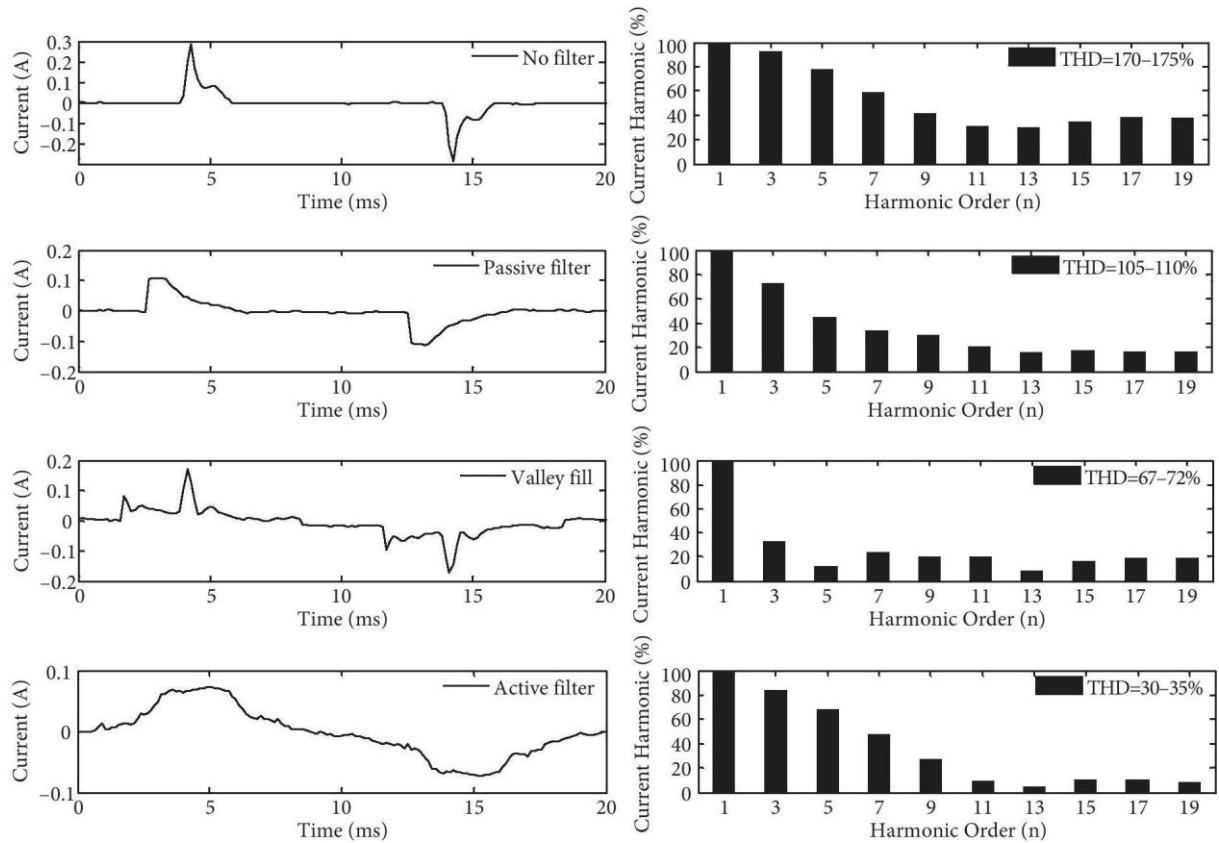
Επιπλέον, η βελτίωση της αρμονικής παραμόρφωσης που προκαλείται από τους λαμπτήρες LED είναι πολύπλοκη. Για μια μεγάλη αρμονική πηγή, για παράδειγμα έναν ηλεκτρικό

φούρνο, είναι ευκολότερο να σχεδιαστεί ένα αρμονικό φίλτρο για τη μείωση των παραμορφώσεων της τάσης του συστήματος, αλλά δεν είναι εύκολο και αποτελεσματικό να σχεδιαστεί ένα φίλτρο για μικρά φορτία όπως λαμπτήρες LED. Επιπλέον, ο συντελεστής ισχύος των λαμπτήρων LED είναι μεταξύ 0,5 και 0,7.

Πριν αναπτυχθεί το μοντέλο προσομοίωσης, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις αρμονικές και άλλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των λαμπτήρων LED. Αυτό γίνεται από πειραματικές μετρήσεις. Επιλέχθηκαν δείγματα λαμπτήρων από διαφορετικούς κατασκευαστές με διαφορετικές αξιολογήσεις οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στην τοπική αγορά της Μαλαισίας. Αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5, ενώ στο σχήμα 20 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και το αρμονικό φάσμα που λαμβάνεται από πολυάριθμες δοκιμές των λαμπτήρων στο εργαστήριο.

Πίνακας 5 Τεχνικά στοιχεία δοκιμαστικών λαμπτήρων (*Turkish Journal of EECS, 2014*)

Lamp ID	Nominal power P (W)	Equivalent to incandescent P (W)	Power factor	Luminous flux (lm)	Life span (years)
LED - 1	5	40	0.48	230	6
LED - 2	7	40	0.7	350	25
LED - 3	10	50	0.89	950	25
LED - 4	5.5	30	0.59	290	20
LED - 5	7	40	0.51	350	20
LED - 6	6	30	0.52	365	25
LED - 7	5	40	0.67	350	25
LED - 8	3	15	0.5	150	18
LED - 9	8	40	0.82	450	25
LED - 10	4	25	0.66	250	25



Σχήμα 20 Κυματομορφές ρεύματος και αρμονικό φάσμα που λαμβάνεται από πολύάριθμες δοκιμές λαμπτήρων LED (*Turkish Journal of EECS*, 2014)

Παρατηρούμε ότι οι κυματομορφές ρεύματος δεν είναι ημιτονοειδείς, πράγμα που σημαίνει ότι εισάγουν αρμονικές στο δίκτυο διανομής. Επιπλέον, αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι λαμπτήρες LED χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους κυκλώματος στραγγαλιστικού πηνίου (ballast). Από το πείραμα, βρέθηκαν τέσσερις τύποι λαμπτήρων LED. Το είδος τους εξαρτάται από το κύκλωμα σταγγαλιστικού πηνίου (ballast).

Οι τέσσερις τύποι κυκλώματος στραγγαλιστικού πηνίου (ballast) με βάση τη μέθοδο αρμονικών φίλτρων που έχουν είναι οι εξής:

No-filter (THDi = 170% - 175%)

Passive filter (THDi = 105% - 110%)

Valley fill (THDi = 67% - 72%)

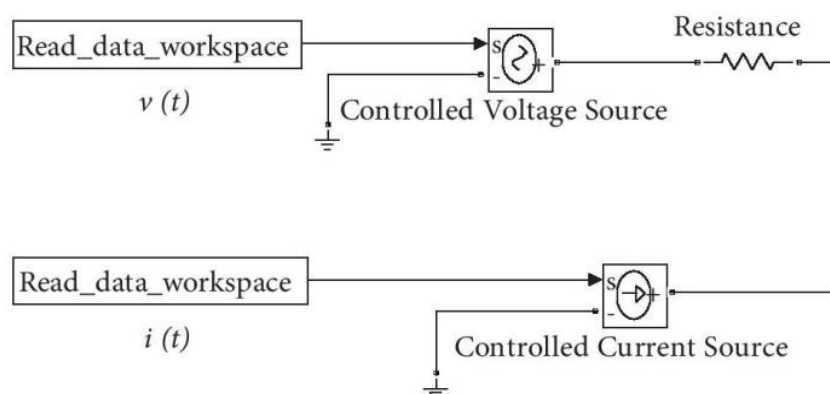
Active filter (THDi = 30% - 35%).

Ίσως το στραγγαλιστικό πηνίο χωρίς κύκλωμα φίλτρου να εισάγει το υψηλότερο αρμονικό ρεύμα, ενώ παρατηρείται χαμηλότερο αρμονικό ρεύμα για τα στραγγαλιστικά πηνία με κυκλώματα ενεργού φίλτρου. Το επίπεδο αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος των υπό εξέταση λαμπτήρων LED καταγράφεται στον Πίνακα 6. Από τον πίνακα φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος των λαμπτήρων υπερβαίνουν τα όρια του προτύπου IEC.

Πίνακας 6 Αρμονικό επίπεδο για τους δοκιμαστικούς λαμπτήρες LED. (Turkish Journal of EECS, 2014)

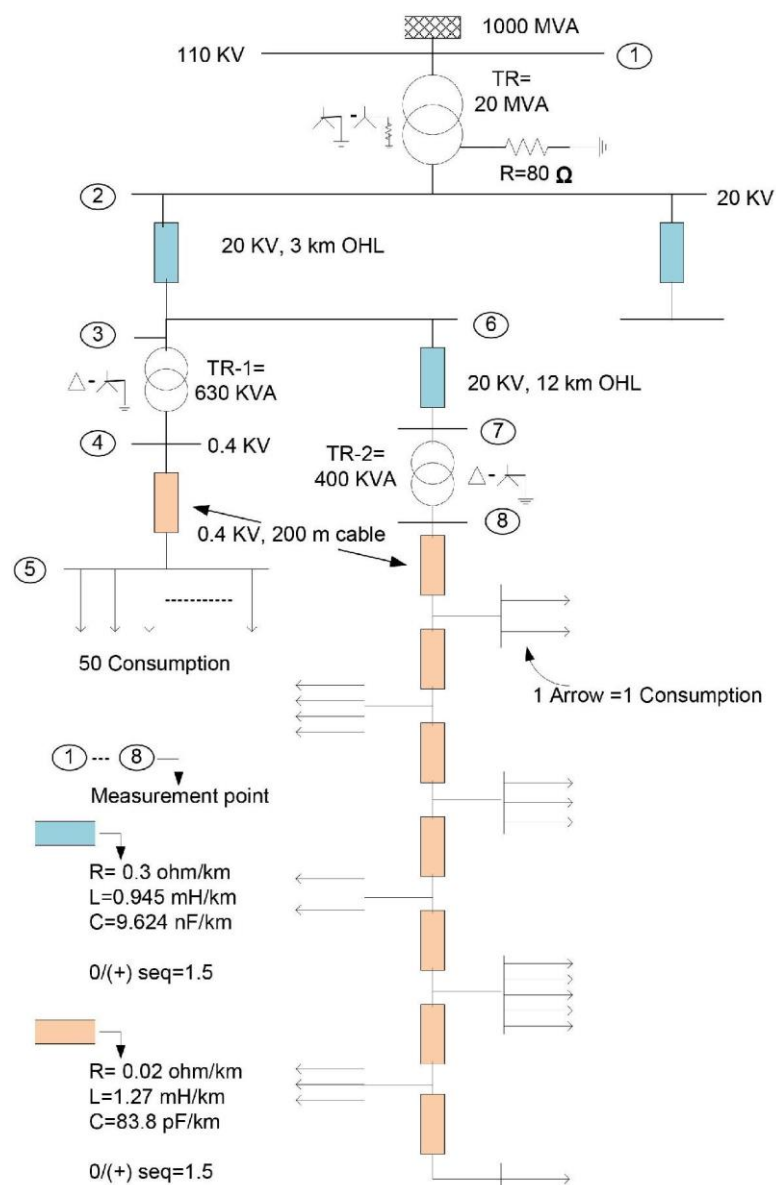
Lamp ID	Type of filter	THD _I (%)
LED - 1	No filter	171.9
LED - 2	Valley fill	71.23
LED - 3	Active filter	34.8
LED - 4	Passive filter	106.3
LED - 5	No filter	168.2
LED - 6	No filter	174.3
LED - 7	Valley fill	69.83
LED - 8	No filter	164.4
LED - 9	Active filter	30.94
LED - 10	Valley fill	67.05

Το μοντέλο του δικτύου διανομής που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση, υποτίθεται ότι τροφοδοτεί αστικές και αγροτικές περιοχές μέσω εναέρια γραμμής.






Σχήμα 21 Μοντέλο LED που αναπτύχθηκε στο MATLAB Simulink. (Turkish Journal of EECS, 2014)

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει πηγή τάσης 110 kV συνδεδεμένη με γραμμή 20 kV μέσω μετασχηματιστή 110/20 kV (TR). Κάποιοι πελάτες συνδέονται σε απόσταση 3χλμ. μακριά από τον υποσταθμό σε χαμηλή τάση μέσω ενός μετασχηματιστή 20/0,4 kV (TR-1). Περίπου 50 καταναλωτές είναι συνδεδεμένοι σε κάθε φάση. Μια άλλη ομάδα καταναλωτών σε αγροτικό δίκτυο συνδέεται μέσω ενός άλλου μετασχηματιστή 20/0,4 kV (TR-2). Η απόσταση των καλωδίων 0,4 kV μεταξύ του τελευταίου καταναλωτή της αγροτικής περιοχής και του μετασχηματιστή (TR-2) είναι 1,4 χλμ. Άλλα στοιχεία του δικτύου παρουσιάζονται στον πίνακα 7.



Σχήμα 22 Δίκτυο διανομής προσομοίωσης (Turkish Journal of EECS, 2014)

Πίνακας 7 Στοιχεία δικτύου διανομής προσομοίωσης. (Turkish Journal of EECS, 2014)

Name	Type	Specification
Transformer, TR		20 MVA, 110/20 KV
Transformer, TR - 1		630 KVA, 20/0.4 KV
Transformer, TR - 2		400 KVA, 20/0.4 KV
Overhead line (OHL)	Π	R = 0.3 ohm/Km
		L = 0.945 mH/Km
		C = 9.624 nF/Km
0.4 KV cable	Π	R = 0.02 ohm/Km
		L = 1.27 mH/Km
		C = 83.8 pF/Km

Η προσομοίωση ξεκινάει με λαμπτήρες πυρακτώσεως σε συνδυασμό με άλλα γραμμικά και μη γραμμικά φορτία (σενάριο 1). Στα υπόλοιπα 4 σενάρια γίνεται αντικατάσταση των λαμπτήρων πυρακτώσεως με λαμπτήρες LED.

Συγκεκριμένα

Σενάριο 1: Λαμπτήρες πυρακτώσεως

L1: 480W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 100W CFLs + 320W H/Y με CRT + 600W

Συντελεστής Ισχύος=0,95

L2: 600W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 120W CFLs + 900W

Συντελεστής Ισχύος=0,90

L3: 240W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 60W CFLs + 1200W

Συντελεστής Ισχύος=1

Σενάριο 2: Αντικατάσταση του 50% των λαμπτήρων πυρακτώσεως με λαμπτήρες LED

L1: 240W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 30W λαμπτήρες LED + 100W CFLs + 320W H/Y με CRT + 600W

Συντελεστής Ισχύος=0,95

L2: 280W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 40W λαμπτήρες LED + 120W CFLs + 900W

Συντελεστής Ισχύος=0,90

L3: 120W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 15W λαμπτήρες LED + 60W CFLs + 1200W

Συντελεστής Ισχύος=1

Σενάριο 3: Αντικατάσταση του 80% των λαμπτήρων πυρακτώσεως με λαμπτήρες LED

L1: 80W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 50W λαμπτήρες LED +100W CFLs + 320W H/Y με CRT + 600W

Συντελεστής Ισχύος=0,95

L2: 120W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 60W λαμπτήρες LED + 120W CFLs + 900W

Συντελεστής Ισχύος=0,90

L3: 840W λαμπτήρες πυρακτώσεως + 25W λαμπτήρες LED + 60W CFLs + 1200W

Συντελεστής Ισχύος=1

Σενάριο 4: Αντικατάσταση όλων των λαμπτήρων πυρακτώσεως με λαμπτήρες LED

L1: 60W λαμπτήρες LED +100W CFLs + 320W H/Y με CRT + 600W

Συντελεστής Ισχύος=0,95

L2: 75W λαμπτήρες LED + 120W CFLs + 900W

Συντελεστής Ισχύος=0,90

L3: 30W λαμπτήρες LED + 60W CFLs + 1200W

Συντελεστής Ισχύος=1

Σενάριο 5: Αντικατάσταση όλων των λαμπτήρων πυρακτώσεως με διαφορετικούς τύπους λαμπτήρων LED

L1: 60W λαμπτήρες LED +100W CFLs + 320W H/Y με CRT + 600W

Συντελεστής Ισχύος=0,95

L2: 75W λαμπτήρες LED + 120W CFLs + 900W

Συντελεστής Ισχύος=0,90

L3: 30W λαμπτήρες LED + 60W CFLs + 1200W

Συντελεστής Ισχύος=1

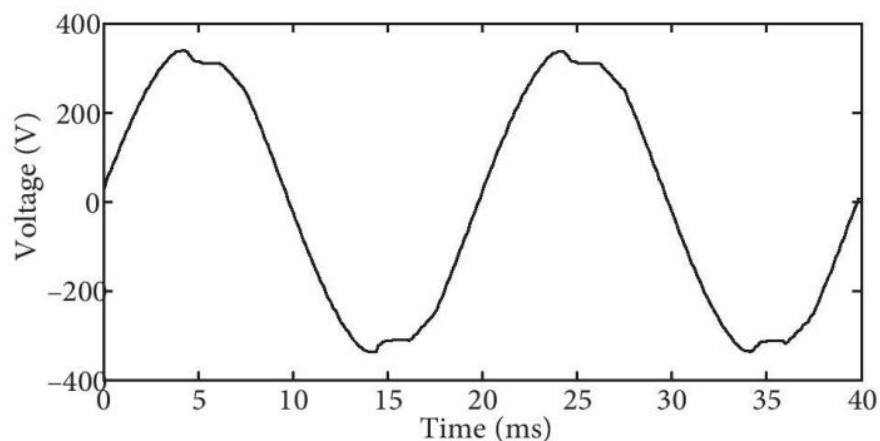
Τα αποτελέσματα του δείκτη αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (THDv) φαίνονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8 Δείκτης αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης (THD_v) όλων των ηλεκτρικών δικτύων σε όλα τα σενάρια. (Turkish Journal of EECS, 2014)

Test point		THD _v (%)				
		Scenario				
		1	2	3	4	5
TR	Phase – A1, B1, C1	0	0	0	0.1	0
	Phase – A2, B2, C2	0	0	0	0.1	0.1
TR – 1	Phase – A1, B1, C1	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
	Phase – A2	3.8	5.93	7.97	9.83	8.65
	Phase – B2	3.61	6.36	8.15	10.86	8.95
	Phase – C2	3.38	6.27	8.36	10.98	9.12
TR – 2	Phase – A1, B1, C1	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
	Phase – A2	3.28	6.68	8.42	10.12	9.2
	Phase – B2	3.73	6.13	8.13	9.59	8.45
	Phase – C2	3.65	6.53	8.5	11.74	9.75

Συγκεκριμένα παρατηρούνται τα εξής:

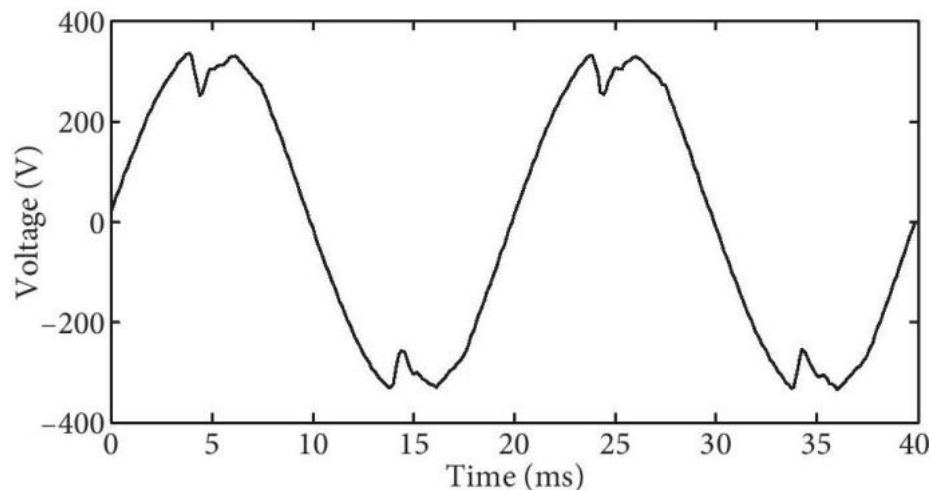
Για το πρώτο σενάριο, όπου είχαμε λαμπτήρες πυρακτώσεως, η μέγιστη παραμόρφωση της τάσης φαίνεται να είναι 3,8% και εμφανίζεται στη φάση A του μετασχηματιστή TR-1. Η κυματομορφή της τάσης (σχήμα 23) ήταν ελαφρώς παραμορφωμένη, επειδή τα φορτία είναι γραμμικά, εκτός από τα αρμονικά που εισάγουν τα φορτία των ηλεκτρονικών υπολογιστών.



Σχήμα 23 Κυματομορφές τάσης της πλευράς 0,4Kv με λαμπτήρες πυρακτώσεως. (Turkish Journal of EECS, 2014)

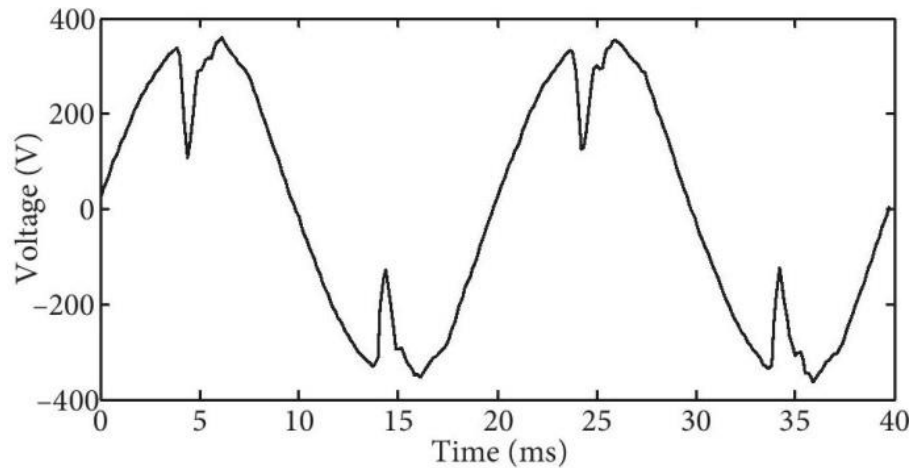
Στο δεύτερο σενάριο, όπου το 50% των λαμπτήρων πυρακτώσεως αντικαταστάθηκε με λαμπτήρες LED, η μέγιστη παραμόρφωση της τάσης ήταν 6,68% και εμφανίζεται στη φάση A του δεύτερου μετασχηματιστή TR-2. Συνεπώς η αύξηση των λαμπτήρων LED οδήγησε σε παραμόρφωση της τάσης στο σύστημα διανομής. Αυτό το σενάριο είναι αποδεκτό επειδή δεν υπερβαίνει τα όρια του Πρότυπου IEC.

Στο τρίτο σενάριο, όπου το 80% των λαμπτήρων πυρακτώσεως αντικαταστάθηκε με λαμπτήρες LED, η μέγιστη παραμόρφωση της τάσης ήταν 8,5% και συνέβη στη Φάση C του μετασχηματιστή TR-2. Συνεπώς, το σύστημα υπερέβη το όριο 8% του πρότυπου IEC. Επί πλέον, σχεδόν κάθε φάση και των δύο μετασχηματιστών διανομής υπερέβη το όριο του 8%. (σχήμα 24) Η ποιότητα ισχύος μπορεί να είναι επηρεάζονται από την εγκατάσταση πολλών λαμπτήρων LED στο σύστημα.



Σχήμα 24 Κυματομορφές τάσης της πλευράς 0,4Kv με 80% λαμπτήρες LED. (Turkish Journal of EECS, 2014)

Στο τέταρτο σενάριο παρατηρούμε ότι οι αρμονικές παρεμποδίζουν περισσότερο το δίκτυο διανομής όταν όλοι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως αντικατασταθούν πλήρως με ένα μεγάλο αριθμό από τους ίδιους τύπους λαμπτήρων LED. Η μέγιστη παραμόρφωση της τάσης έφτασε το 11,74% στη φάση C του μετασχηματιστή TR-2. Η κυματομορφή τάσης στο σχήμα δείχνει περισσότερη παραμόρφωση σε σύγκριση με το σχήμα (σχήμα 25).

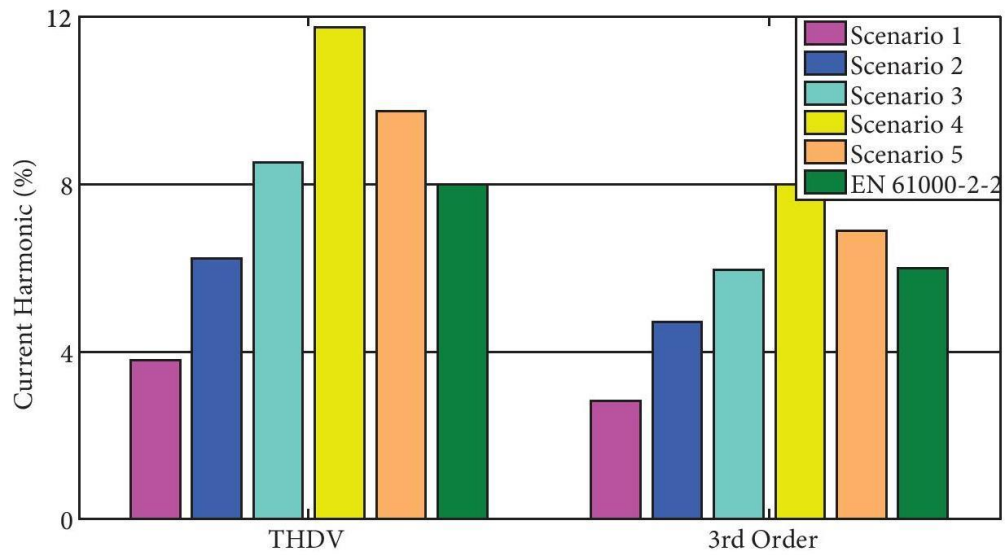


Σχήμα 25 Κυματομορφές τάσης της πλευράς 0,4Kv με λαμπτήρες LED. (Turkish Journal of EECS, 2014)

Στο πέμπτο σενάριο, όπου επιλέχθηκαν τέσσερις τύποι λαμπτήρων LED, η υψηλότερη μέγιστη παραμόρφωση της τάσης έφθασε το 9,75% στη φάση C του μετασχηματιστή TR-2. Συνεπώς, η παραμόρφωση της τάσης μπορεί να μετριάσει με διαφορετικούς τύπους λαμπτήρων LED αντί για έναν μόνο τύπο. Η συνολική παραμόρφωση τάσης όλων των σεναρίων σε σύγκριση με το πρότυπο όριο IEC φαίνεται στο Σχήμα 26. Από την αρχή, είναι σαφές ότι η παραμόρφωση της τάσης υπερβαίνει την τυποποιημένη τιμή IEC 8% στο Σενάριο 3 (80% Αντικατάσταση της λυχνίας LED). Οι ενεργές απώλειες ισχύος για όλα τα προσομοιωμένα σενάρια παρουσιάζονται στον πίνακα 9. Οι απώλειες στους μετασχηματιστές αυξήθηκαν με την προσθήκη περισσότερων λαμπτήρων LED στο δίκτυο, αλλά μειώθηκαν στη γραμμή μεταφοράς. Ως εκ τούτου, ένας μεγάλος αριθμός λαμπτήρων LED είναι πιο προβληματικός για τους μετασχηματιστές.

Πίνακας 9 Ενεργές απώλειες ισχύος για όλα τα προσομοιωμένα σενάρια (Turkish Journal of EECS, 2014)

Active power losses (W)	TR	20 kV network	TR 1	TR 2	Total losses
Incandescent lamps	218.8	1036.4	155.1	43	1453.3
80% LED lamps	309.4	688.5	197	73.5	1268.4
All LED lamps	375.6	443.3	231.3	92.6	1142.8



Σχήμα 26 Διαταραχές τάσης σε διάφορα σενάρια με βάση το πρότυπο IEC 61000-2-2 (*Turkish Journal of EECS*, 2014)

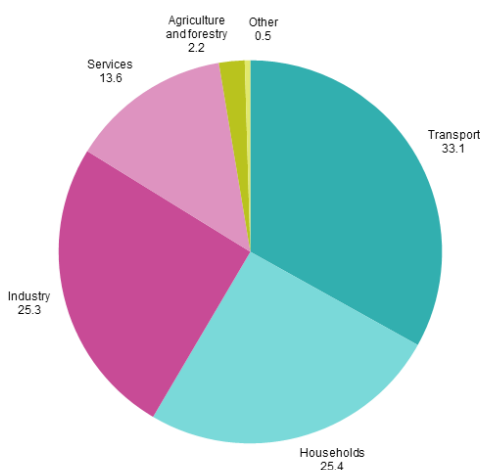
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ”

4.1 Αντικατάσταση λαμπτήρων πυρακτώσεως και φθορισμού

4.1.1 Επίδραση Στο Περιβάλλον

Η σημερινή Ευρωπαϊκή Ένωση των 28 κρατών μελών έχει πληθυσμό περίπου 500 εκατομμυρίων ανθρώπων. Είναι εύκολο να καταλάβουμε ότι μια τέτοια αναπτυγμένη περιοχή έχει αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες. Η συνολική χρήση ενέργειας στην Ευρώπη για το 2015 ήταν περίπου 1.627 εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου, Οι κύριοι καταναλωτές ενέργειας είναι οι μεταφορές (33,1%), τα νοικοκυριά (25,4%) και η βιομηχανία (25,3%).

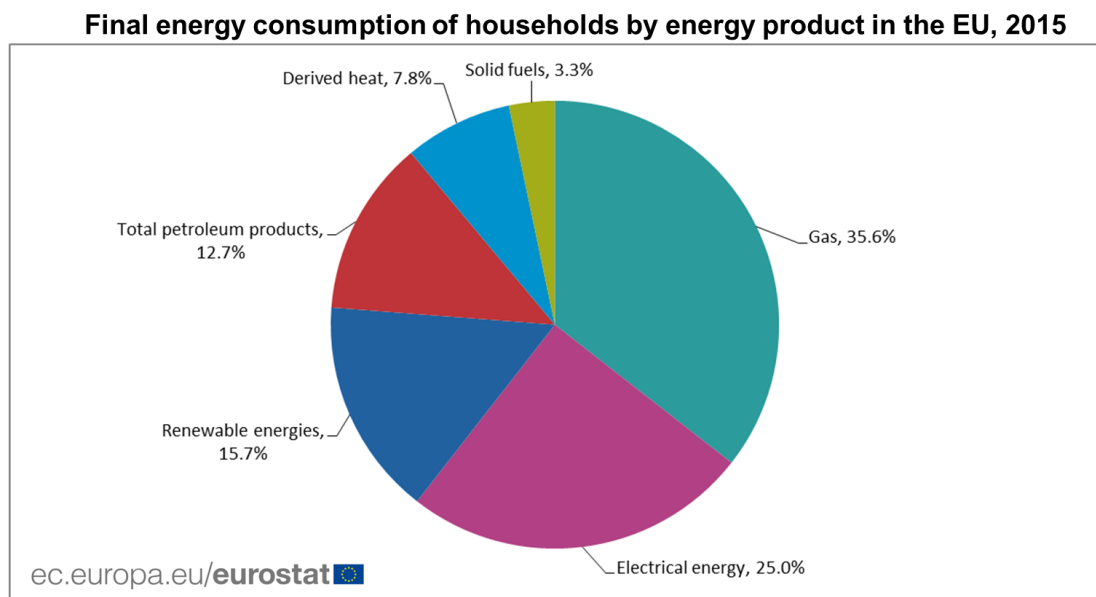


Note: figures do not sum to 100.0 % due to rounding.
Source: Eurostat (online data code: nrg_100a)

Σχήμα 27 Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα για το 2015 στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Eurostat, 2017).

Παρατηρούμε ότι τα νοικοκυριά αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τέταρτο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας καλύπτεται κυρίως από τα εξής:

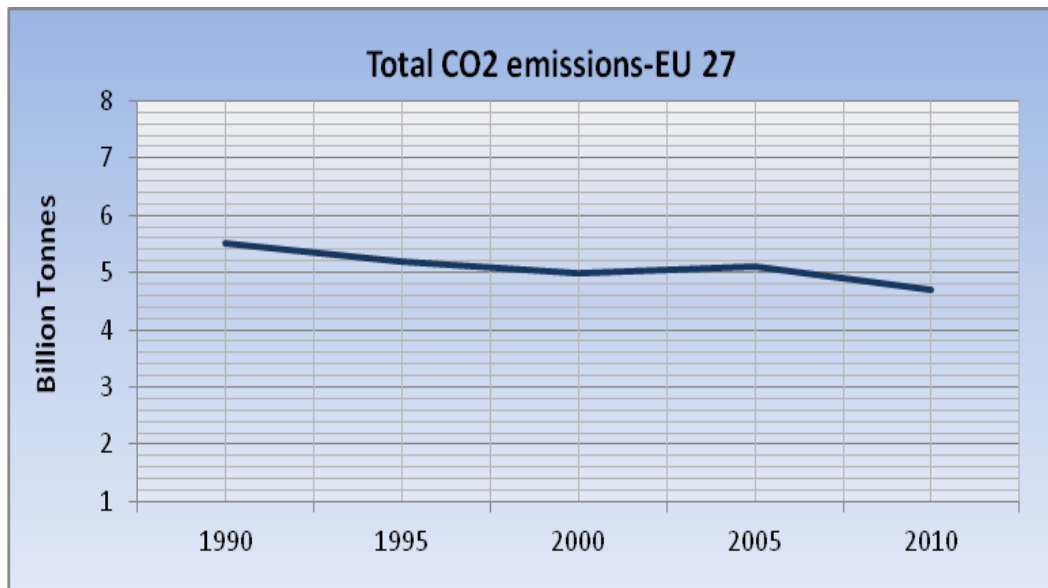
- Φυσικό αέριο (35,6%)
- Ηλεκτρισμός (25,0%)
- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (15,7%)
- Πετρέλαιο και παράγωγα του (12,7%)
- Θερμότητα (7,8%)
- Στερεά καύσιμα (3,3%)



Σχήμα 28 Τελική κατανάλωση ενέργειας νοικοκυριών για το 2015 στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Eurostat, 2017).

Η συνεχής ανάπτυξη της Ευρώπης προκάλεσε μια αξιοσημείωτη αύξηση των απαιτήσεων σε ενέργεια. Αυτή η ενεργειακή κατανάλωση προκάλεσε εκπομπή περίπου κάποιων δισεκατομμυρίων τόνων CO₂.

Παρά τις προσπάθειες για τη μείωση των συνολικών εκπομπών CO₂, δεν υπάρχει σημαντική μείωση από το 1990.



Σχήμα 29 Οι συνολικές εκπομπές CO₂ της ΕΕ από το 1990 (Eurostat, 2017).

Στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι μέχρι το 2020 να έχει μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας κατά 20%, άρα ανάλογη μείωση και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και να αύξηθεί η συνεισφορά των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα. (Eurostat, 2017)

Εξοικονόμηση ενέργειας με την τεχνολογία LED

Στη σύγχρονη εποχή, όπου ολόκληρη η ανθρωπότητα βρίσκεται κάτω από την πίεση σοβαρότατων οικολογικών προβλημάτων όπως είναι η καταστροφή του περιβάλλοντος και η παγκόσμια οικονομική κρίση, η εξοικονόμηση ενέργειας λοιπόν, είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή επιτυγχάνει τόσο μείωση του κόστους λειτουργίας στη βιομηχανία και στα νοικοκυριά όσο και μείωση των ρύπων που εκλύονται στο περιβάλλον κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά το κόστος λειτουργίας, ο παγκόσμιος τζίρος της βιομηχανίας φωτισμού, εκτιμάται σε 15 δισεκατομμύρια ευρώ ανά έτος. Εδώ πρέπει να προσμετρήσουμε και τη χρήση των ηλεκτρικών πηγών φωτός και σε άλλες εφαρμογές όπως στην ιατρική, στον καθαρισμό του νερού και του αέρα, στα αυτόματα συστήματα παρακολούθησης και έλεγχου, στη φωτοαντιγραφή και στην επεξεργασία επιφανειών κ.α. τριπλασιάζοντας σχεδόν τον ετήσιο παγκόσμιο τζίρο. Η ανάλυση του κόστους σε προϊόντα μας δείχνει ότι περισσότεροι

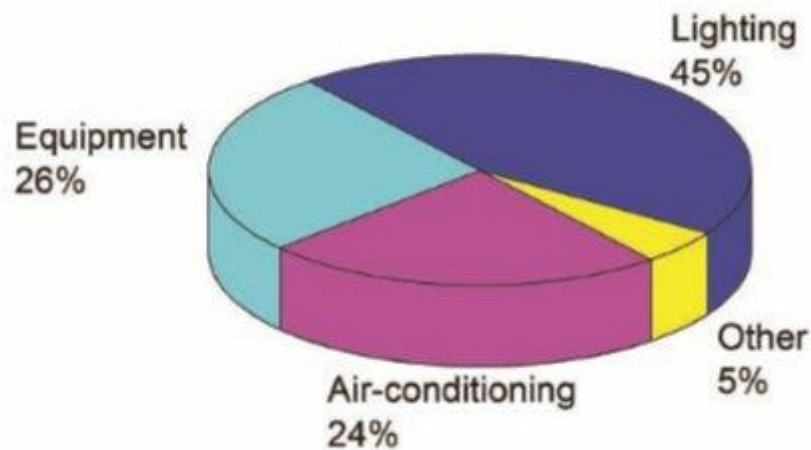
από 7.5 δισεκατομμύρια ηλεκτρικοί λαμπτήρες λειτουργούν στον κόσμο, και όσον αφορά την κατανάλωσή τους τα ποσά είναι ξεπερνούν τις 2000 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες (kWh) κάθε έτος. Εδώ πρέπει να αντιληφθούμε ότι το πόσο αυτό είναι μόλις το 19% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. (Δρακάκης, 2011).

Όλα τα παραπάνω προκαλούν τεράστια περιβαλλοντικά προβλήματα. Αρχικά, δημιουργείται ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα αύξηση της παραγωγής και έκλυσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα η οποία φτάνει τους 2000 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Τα 3/4 αυτών προέρχονται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το 1/4 από τη χρήση κηροζίνης και κεριών που χρησιμοποιούνται ακόμη από 1.5 δισεκατομμύριο ανθρώπους που δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με έρευνες επίσης, φαίνεται ότι στο μέλλον η χρήση ηλεκτρικών λαμπτήρων θα τριπλασιαστεί. Αυτό θα οδηγήσει σε νέες οικολογικές συνέπειες στον αέρα στο νερό και στο έδαφος σε ολόκληρο τον πλανήτη.

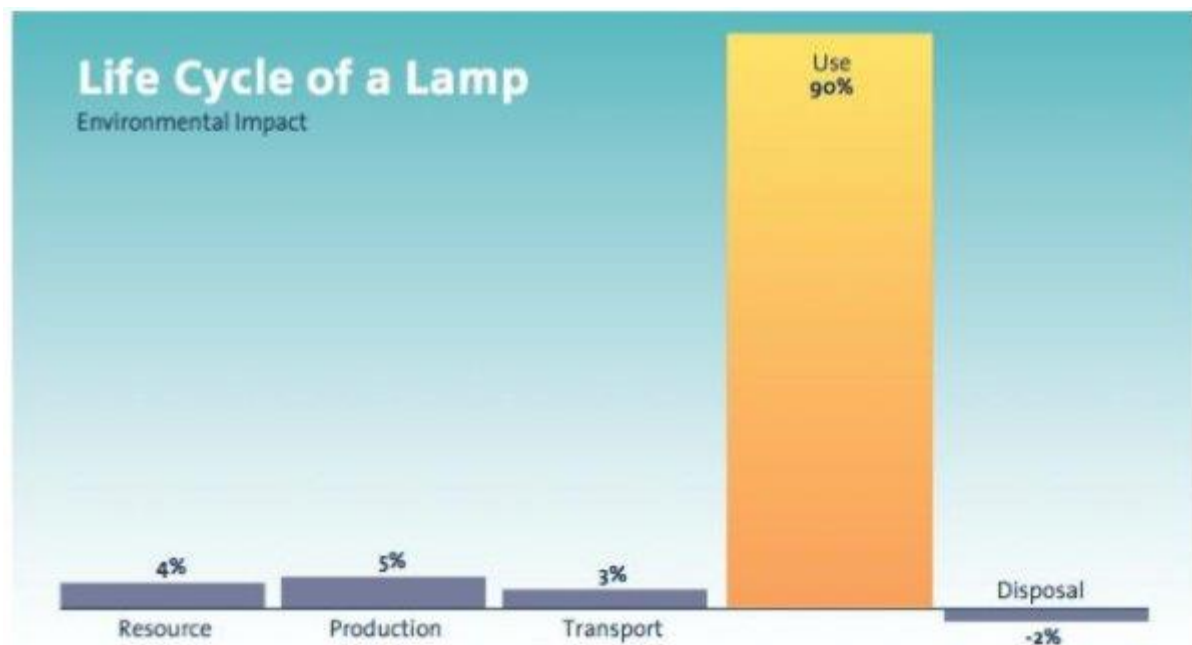
Με βάση τα παραπάνω, υπάρχει ανάγκη χρήσης νέων πηγών φωτός που θα μπορούν να:

- περιορίσουν σημαντικά τη κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας
- να ελαττώσουν το κόστος παραγωγής
- να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.

Συνεπώς, μία αύξηση κατά 25% στην απόδοση ενός λαμπτήρα επιφέρει εξοικονόμηση 250 δισεκατομμυρίων KWh και 150 εκατομμύρια τόνους λιγότερα επιβλαβή αέρια του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα το χρόνο.



Σχήμα 30 Κατανομή ηλεκτρικής κατανάλωσης σε ένα τυπικό εμπορικό κέντρο (Δρακάκης, 2011).

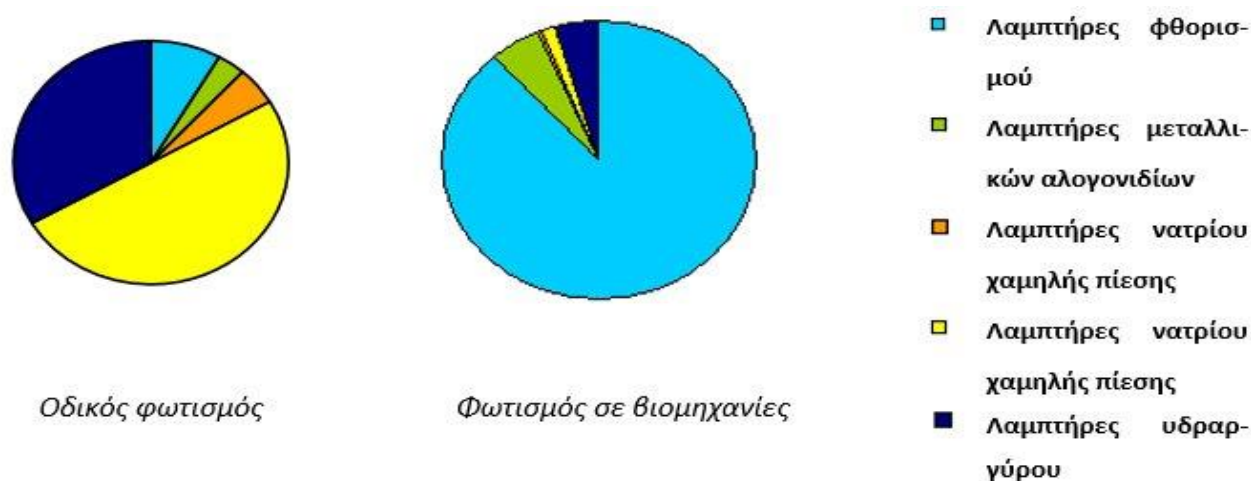


Σχήμα 31 Το ενεργειακό αποτύπωμα του κύκλου ζωής ενός λαμπτήρα. (Θεοφιλίδη, 2016).

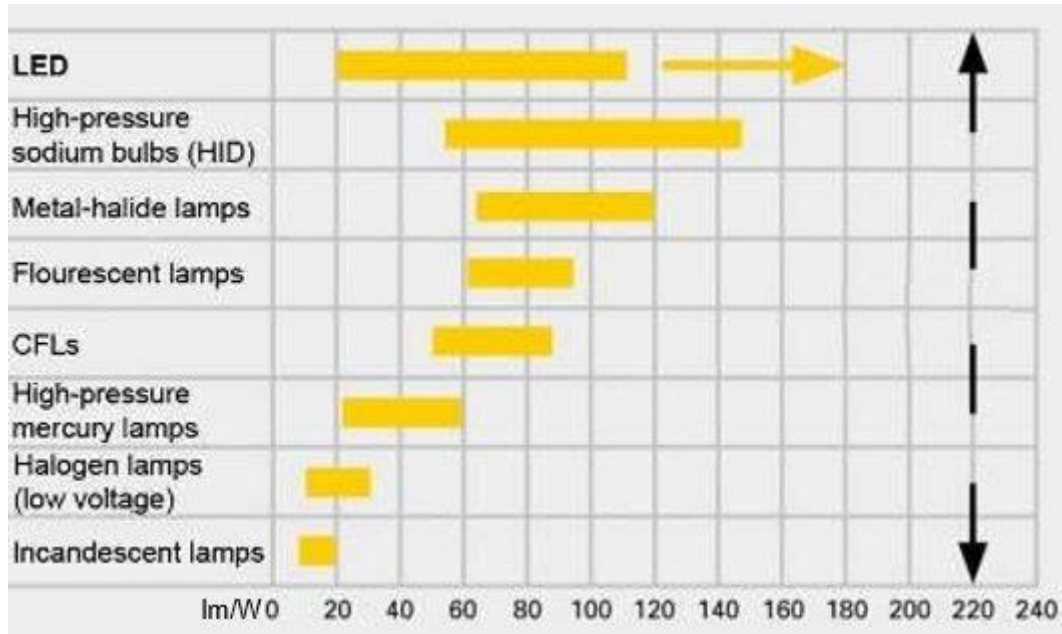
Παρότι σε ορισμένες περιπτώσεις κοστίζουν περισσότερο κατά το στάδιο της αγοράς, τα ενεργειακά αποδοτικά συστήματα μπορούν να έχουν μακροπρόθεσμα χαμηλότερο κόστος. Επομένως, η χρήση ενεργειακά αποδοτικών λαμπτήρων στον φωτισμό, αλλά και αντικατάσταση των μη αποδοτικών λαμπτήρων με αποδοτικότερους είναι μονόδρομος. Έτσι, τα οφέλη είναι πολλαπλά αφού διασφαλίζεται η εργονομία, η προστασία του περιβάλλοντος και η εξοικονόμηση ενέργειας. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η απόδοση ενός λαμπτήρα είναι

υψηλή όταν δεν υπάρχει απώλεια στις επιδόσεις του. Επίσης, κατά την αξιολόγηση του κόστους ενός λαμπτήρα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η διάρκεια ζωής του ('Buy smart', 2012). Ακόμη, η χρήση της νέας τεχνολογίας δημιουργεί νέες πηγές φωτός που αυξάνουν την απόδοση, πληρούν τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς, και δεν περιέχουν υδράργυρο (Hg) που είναι υλικό υψηλής τοξικότητας.

Οι γνωστές πηγές φωτός είναι οι λαμπτήρες φθορισμού, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού, οι λαμπτήρες αλογόνου, οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων και οι λαμπτήρες εκπομπής φωτός (LED). Σήμερα πιστεύεται ότι η αντικατάσταση με αποδοτικούς λαμπτήρες LED, είναι η λύση. Τα LED είναι αρκετά ώριμα προϊόντα που μπορούν να εισέλθουν στην αγορά φωτισμού παρά τα διάφορα μειονεκτήματά τους. Η τεχνολογία και η επιστήμη γύρω από τα LED είναι αυτό που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα παγκοσμίως (Δρακάκης, 2011).



Σχήμα 32 Ποσοστό χρήσης διάφορων τύπων λαμπτήρων στην ΕΕ για οδικό φωτισμό και για τη βιομηχανία (LTG, 'Buy smart', 2012).



Σχήμα 33 Σύγκριση απόδοσης λαμπτήρων σε Lumen/Watt (εξαιρούνται οι απώλειες από τα στραγγαλιστικά πηνία) ('Buy smart', 2012).



Σχήμα 34 Ο αριθμός λαμπτήρων πυρακτώσεως, φθορισμού και LEDs που απαιτούνται για 20 χιλιάδες ώρες φωτισμού ('U.S.DOE', 2013).

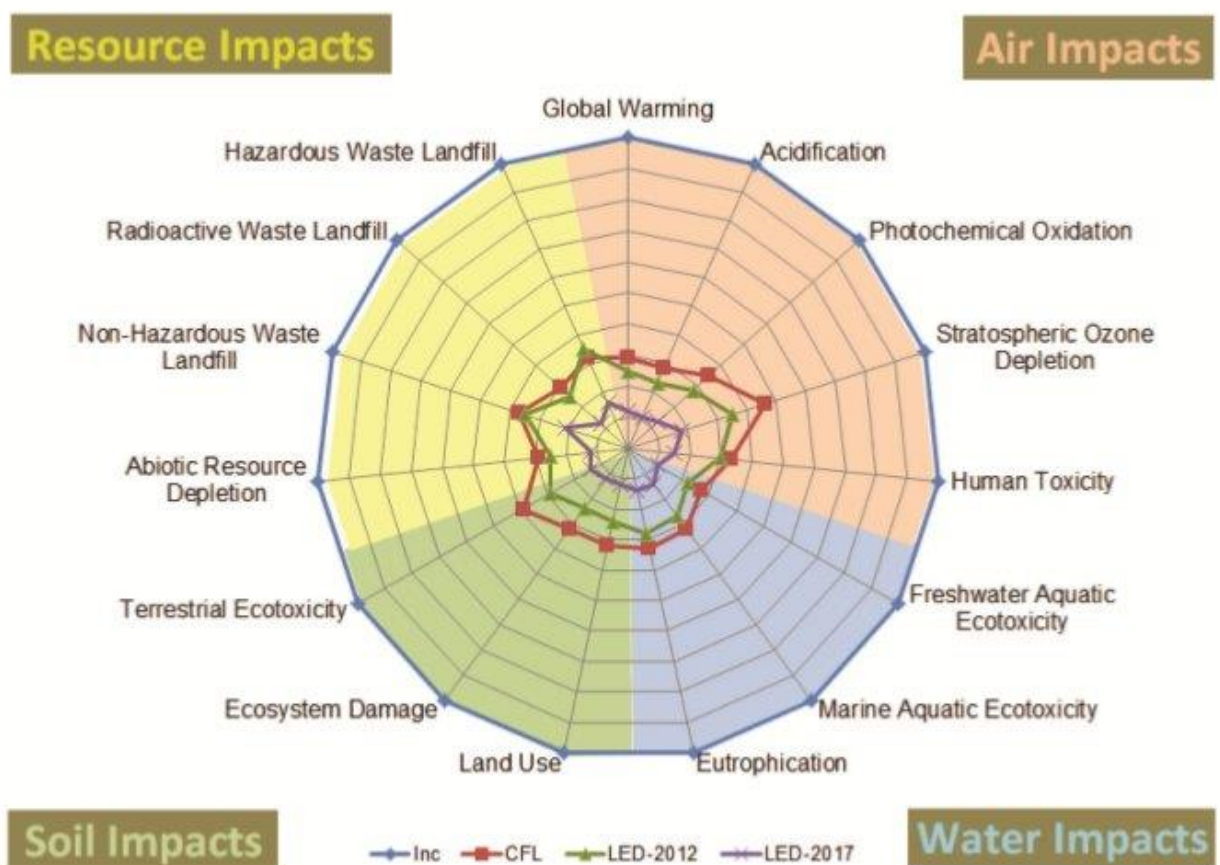
Πίνακας 10 Μέτρηση της απόδοσης σε lumens/watt, του χρόνου ζωής σε hours και των δεικτών απόδοσης χρώματος μεταξύ των διαφόρων τύπων λαμπτήρων ('Buy smart', 2012).

Τύπος λαμπτήρα	Απόδοση μετατροπής ενέργειας [Lumen ανά Watt]	Διάρκεια ζωής [hours]	Δείκτης απόδοσης χρώματος
Λαμπτήρας πυρακτώσεως	8 -15	1,000	100
Λαμπτήρας αλογόνου χαμηλής τάσης	12 - 25	2,500	100
Λαμπτήρας αλογόνου υπέρυθρης επίστρωσης	25 - 30	5,000	100
Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού	50 - 69	6,000 – 15,000	85
Λαμπτήρες φθορισμού (T8 με συμβατικό στραγγαλιστικό πηνίο)	47 - 83	8,000	>90
Λαμπτήρες φθορισμού (T8, 3 band lamp, ηλεκτρονικό στραγγαλιστικό πηνίο)	Μέχρι 100	19,000	
Λαμπτήρες φθορισμού (T5, με συμβατικό στραγγαλιστικό πηνίο)	67 - 104	24,000	80-90
Λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων	84 - 90	10,000 +	>80
Λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης	90 - 150	16,000 – 25,000	25
Λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης	120 - 200	12,000 – 20,000	
OLED	25	~10,000	>80
LED	20 - 70	50,000	>80

Στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάσαμε τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LED. Οι διαφορές της τεχνολογίας LED με τις προηγούμενες τεχνολογίες φωτισμού είναι πολλές. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία LED έναντι των υπόλοιπων τεχνολογιών, αποδεικνύουν την συνεισφορά της τεχνολογίας αυτής στην μερική επίλυση του ενεργειακού προβλήματος της σύγχρονης εποχής. Τα πλεονεκτήματα αυτά συμβάλλουν αποφασιστικά στην σύγχρονη τάση για εξοικονόμηση ενέργειας με καλύτερες συνθήκες φωτισμού παράλληλα.

Μία αμερικανική έρευνα μελέτησε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός λαμπτήρα LED, ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως, και ενός λαμπτήρα φθορισμού από την αρχή μέχρι το τέλος της ζωής τους, συμπεριλαμβανομένων της κατασκευής, της ναυτιλίας, της λειτουργίας, και της διάθεσης τους. ('U.S.DOE', 2013).

Η σύγκριση έγινε με λαμπτήρα LED, όπως ήταν το 2012 και όπως επίσης προβλέπεται ότι θα είναι το 2017, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες από τις αναμενόμενες βελτιώσεις στην ηλεκτρονική κατασκευή και στις επιδόσεις των LED.



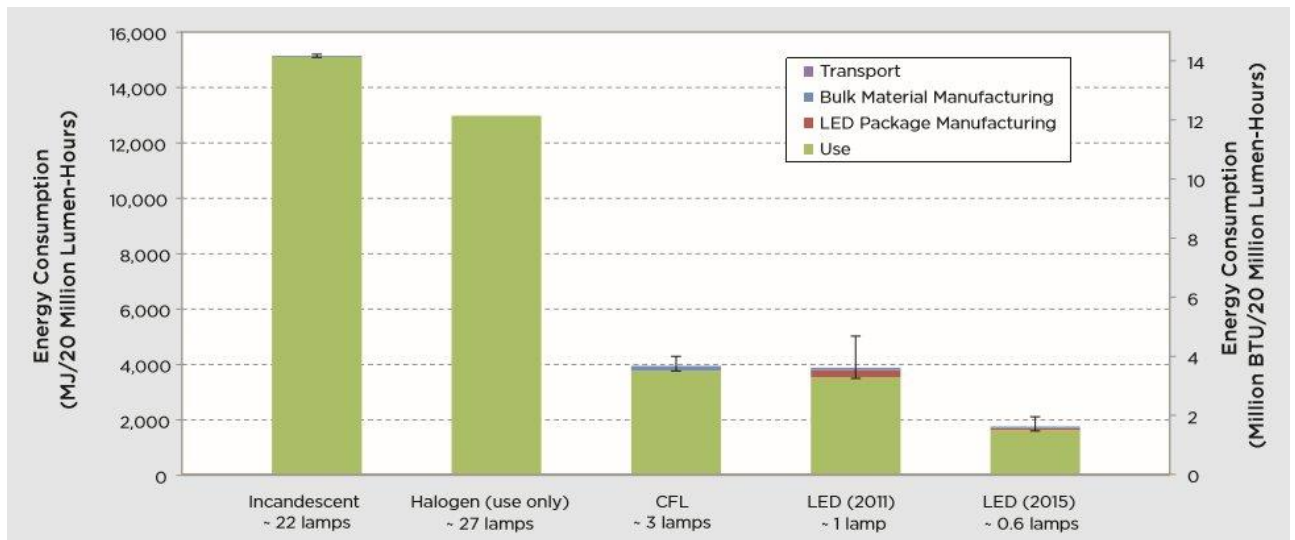
Σχήμα 35 Η εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής των λαμπτήρων στο νερό, στο έδαφος, στον αέρα και στους πόρους ('U.S.DOE', 2013).

Για την ανάλυση των επιπτώσεων των τεσσάρων πηγών φωτισμού στα 15 χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν, δημιουργήθηκαν γραφήματα «αράχνης». Κάθε κατηγορία αντιπροσωπεύεται από μία ακτίνα, και οι σχετικές επιπτώσεις για κάθε τύπο λαμπτήρα απεικονίζονται στο γράφημα. Ο τύπος του λαμπτήρα που έχει το μεγαλύτερο αντίκτυπο στο σύνολο των μέτρων που αναλύθηκαν ορίζει την κλίμακα, εκπροσωπούμενη από τον

εξωτερικό κύκλο που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το κέντρο του ιστού. Τα άλλα προϊόντα στη συνέχεια κανονικοποιούνται, έτσι ώστε η απόσταση από το κέντρο του ιστού να υποδηλώνει τη σοβαρότητα των επιπτώσεων σε σχέση με το αρχικό γράφημα.

Τα ευρήματα της έρευνας ήταν πολύ σημαντικά:

- Η ενέργεια από τους τρεις τύπους καταναλώνεται στη φάση της χρήσης τους συντελώντας στο κυρίαρχο περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο.



Σχήμα 36 Η κατανάλωση ενέργειας στον κύκλο ζωής των λαμπτήρων πυρακτώσεως, αλογόνου, φθορισμού και LED παλιάς και νέας γενιάς ('U.S.DOE', 2013).

- Λόγω της χαμηλής αποτελεσματικότητας του, ο λαμπτήρας πυρακτώσεως βρέθηκε να είναι ο πιο επιβλαβής για το περιβάλλον από τα τρία είδη προϊόντων, και στις 15 επιπτώσεις που εξετάστηκαν στη μελέτη.
- Οι λυχνίες LED είχαν σημαντικά μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις λυχνίες πυρακτώσεως και ένα ελαφρό προβάδισμα από τις λυχνίες φθορισμού (CFL).
- Η λυχνία CFL βρέθηκε να είναι ελαφρώς πιο επιβλαβή από τη λυχνία LED του 2012 σε όλα τα μέτρα που εξετάστηκαν, εκτός από χώρους υγειονομικής

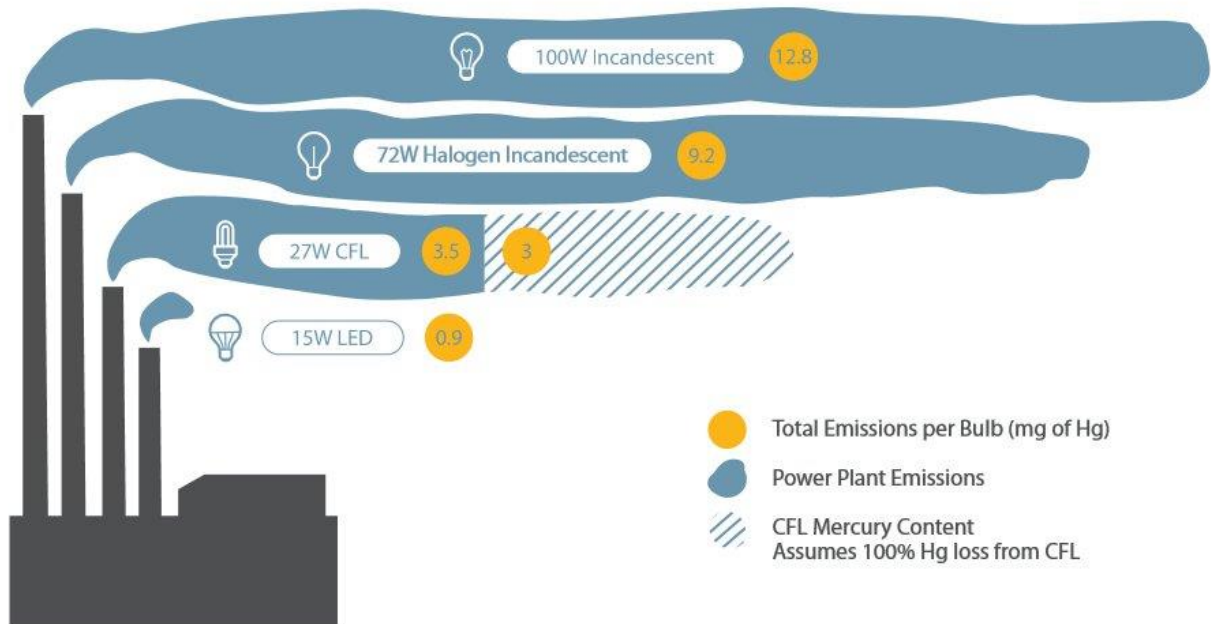
ταφής επικίνδυνων αποβλήτων, λόγω της μεγάλης αλουμινένιας ψύκτρας των λαμπτήρα LED. Δεδομένου ότι η αποτελεσματικότητα των λαμπτήρων LED συνεχίζει να αυξάνεται, οι απαγωγείς θερμότητας αλουμινίου αναμένεται να συρρικνωθούν σε μέγεθος και οι προσπάθειες ανακύκλωσης θα μειώσει τις επιπτώσεις τους ακόμη περισσότερο.

- Η πηγή φωτός που λειτουργεί καλύτερα ήταν η λυχνία LED, της οποίας οι επιπτώσεις είναι περίπου 50 τοις εκατό χαμηλότερες από ό, τι έχει η λυχνία LED του 2012, καθώς και 70 τοις εκατό χαμηλότερες από τη CFL ('U.S.DOE', 2013).

Ο φωτισμός αφορά το 6% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στην Ευρώπη οι λαμπτήρες νέας γενιάς μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας έως και 70% ενώ έχουν διάρκεια ζωής μέχρι και 15 φορές μεγαλύτερη από ότι οι ισοδύναμοι, παλαιότερης τεχνολογίας, μη οικονομικοί λαμπτήρες. Η αύξηση της αποδοτικότητας του φωτισμού θα μειώνει τις εκπομπές ρύπων που προέρχονται από την παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το ήμισυ.

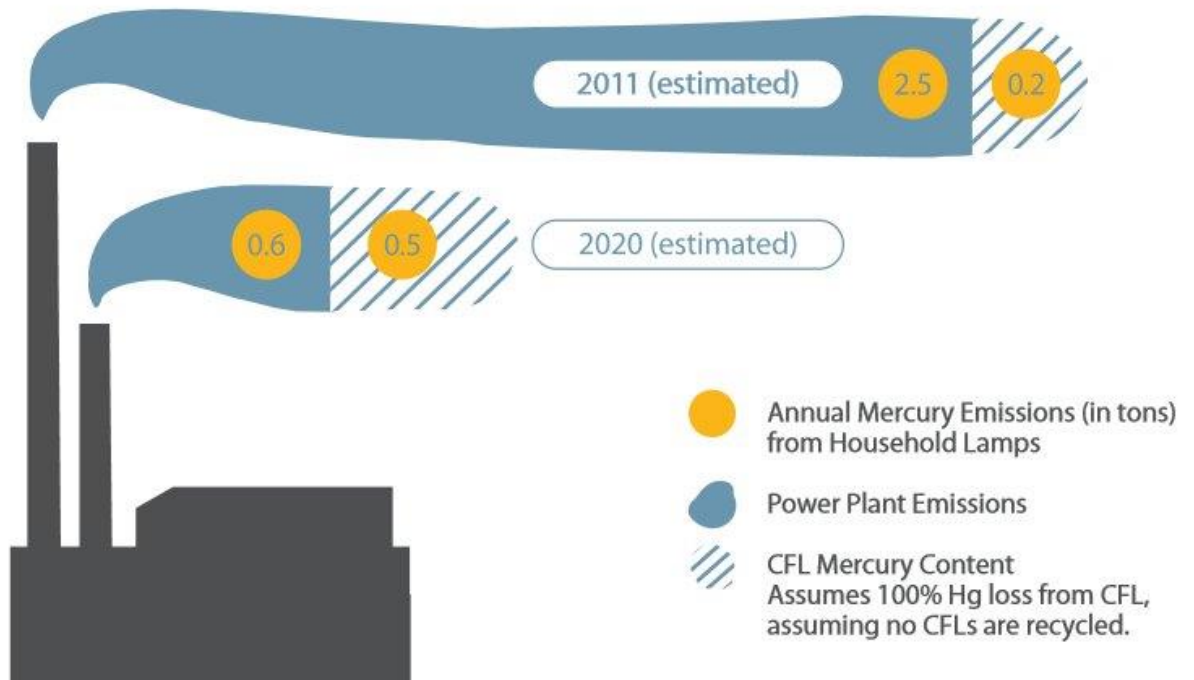
Δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν ήδη καταργηθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ακόμη, βασιζόμενοι στις παραπάνω έρευνες οι λαμπτήρες αλογόνου και φθορισμού καταργήθηκαν και ως επικίνδυνοι για την υγεία και επιβλαβείς για το περιβάλλον από το 2012 (Καρυστηναίου, 2014).

Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (CFL) χρησιμοποιούν 75% λιγότερη ενέργεια από τους συμβατικούς λαμπτήρες πυρακτώσεως, ως εκ τούτου, εμφανίζουν μείωση των εκπομπών υδραργύρου (Hg) που σχετίζεται με την παραγωγή της ενέργειας για την τροφοδοσία των λαμπτήρων. Ωστόσο, προκειμένου να λειτουργήσουν, οι CFL περιέχουν εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα υδραργύρου, συνήθως 3 χιλιοστά του γραμμαρίου (mg) ανά λάμπα. Μία ανάλυση έδειξε τις συνολικές επιπτώσεις των διαφόρων προϊόντων φωτισμού και διαπιστώθηκε ότι αν και οι λαμπτήρες πυρακτώσεως δεν περιέχουν υδράργυρο στο εσωτερικό τους, έχουν ως αποτέλεσμα το υψηλότερο επίπεδο εκπομπών υδραργύρου στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η χρήση ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως των 100W εκπέμπει δύο φορές περισσότερο υδράργυρο από ένα ισοδύναμο CFL για όλο το χρόνο της ζωής του που εκπέμπει ακόμα πιο πολύ από ένα λαμπτήρα LED.



Σχήμα 37 Οι γενικές επιπτώσεις του υδραργύρου (Hg) των λαμπτήρων ισοδύναμων με 100W στη διάρκεια ζωής ενός CFL ('NRDC', 2011)

Οι εκπομπές υδραργύρου μελλοντικά, θα μειωθούν ως αποτέλεσμα της εξέλιξης της τεχνολογίας του φωτισμού. Οι εκπομπές υδραργύρου στον αέρα προκαλούν τις πιο σοβαρές περιβαλλοντικές ανησυχίες, και η μεγαλύτερη πηγή του αερομεταφερόμενου υδραργύρου στις ΗΠΑ είναι τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας μέσω της καύσης του άνθρακα. Λαμβάνοντας υπόψη τη δραματική εξοικονόμηση ενέργειας των νέων τεχνολογιών φωτισμού, θα υπάρξει δραματική συνολική μείωση των εκπομπών υδραργύρου. Μία μελέτη δείχνει ότι οι εκπομπές υδραργύρου στις ΗΠΑ που προκαλούνται από το κοινό οικιακό φωτισμό θα μειωθούν κατά 60%, με τα επίπεδα υδραργύρου να μειωθούν από 2,7 τόνους ανά έτος σε 1,1 τόνους ανά έτος ('NRDC', 2011).



Σχήμα 38 Η εξοικονόμηση ενέργειας έως το 2020 θα μειώσει τις εκπομπές υδραργύρου από τον οικιακό φωτισμό περισσότερο από το μισό στις ΗΠΑ (‘NRDC’, 2011).

Μελλοντικά είναι βέβαιο ότι θα θεσμοθετηθεί και η κατάργηση των λαμπτήρων CFL υδραργύρου για τον ίδιο λόγο, αφού ο υδράργυρος είναι επικίνδυνο τοξικό μέταλλο. Επιπλέον, οι λαμπτήρες CFL υδραργύρου παρουσιάζουν μία σειρά μειονεκτημάτων όπως η κακή ποιότητα και στενή δέσμη φωτός, το χρώμα τους (μόνο λευκό), η διάρκεια ζωής τους (μόνο 8.000 ώρες) κτλ. Ακόμη έχει δειχθεί ότι εκπέμπουν βλαβερή υπεριώδη ακτινοβολία και παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Οι λαμπτήρες LED που παρουσιάζουν φιλική στάση προς το περιβάλλον αποτελεί μονόδρομο σε εθνικό, ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λανθασμένης χρήσης της τεχνολογίας LED

Με δεδομένη την υψηλή απόδοση του φωτισμού LED, υπάρχουν ισχυρά οικονομικά και περιβαλλοντικά επιχειρήματα για την αναδιαμόρφωση του φωτισμού. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί ο φωτισμός στο αμερικανικό οδικό δίκτυο όπου έγινε μετατροπή από το συμβατικό φωτισμό σε LED. Οι κύριοι λόγοι για να γίνει αυτό ήταν η ενεργειακή απόδοση, η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων LED, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση

ενέργειας, η μείωση του κόστους λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των φόρων, η μείωση του κόστους συντήρησης, καθώς και η χαμηλότερη επιβάρυνση της ρύπανσης του αέρα από τη μείωση της εξάρτησης από τον ορυκτό καύσιμο άνθρακα (Kraus, 2016).

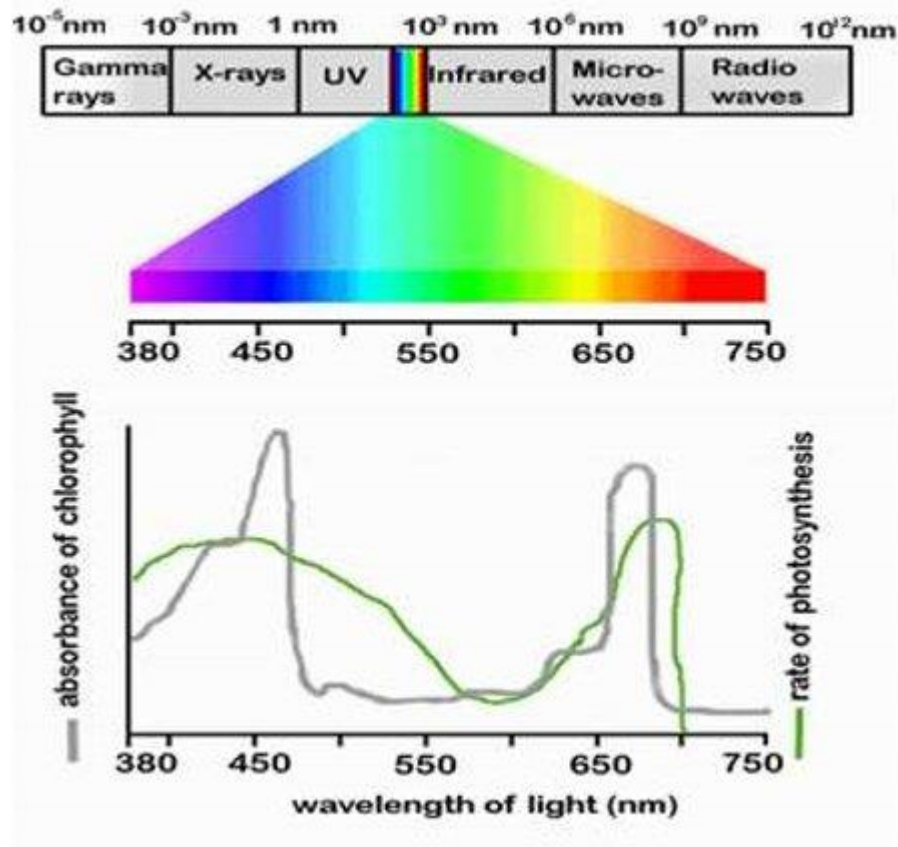
Περίπου το 10% του υφιστάμενου οδικού φωτισμού στις ΗΠΑ έχει μετατραπεί σε τεχνολογία LED στερεάς κατάστασης, ενώ γίνονται προσπάθειες για την επιτάχυνση αυτής της μετατροπής. Είναι όμως σημαντικό να γίνει η σωστή επιλογή, ανάμεσα στις επιλογές φωτισμού LED, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν δυνητικά προβλήματα για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Ο κύριος λόγος για τη μετατροπή σε LED του οδικού φωτισμού είναι η ενεργειακή απόδοση. Ο φωτισμός LED μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας έως και κατά 50% σε σύγκριση με το συμβατικό φωτισμό νατρίου υψηλής πίεσης (HPS). Ο φωτισμός LED δεν απαιτεί καμία προθέρμανση με γρήγορη "ενεργοποίηση και απενεργοποίηση" σε πλήρη φωτεινότητα. Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος, τα φώτα LED ενεργοποιούνται αμέσως όταν επανέλθει το ρεύμα, σε αντίθεση με το φωτισμό με βάση το νάτριο που απαιτεί παρατεταμένη περίοδο προθέρμανσης. Ο φωτισμός LED έχει επίσης τη δυνατότητα του dimming και έτσι κατά τη διάρκεια των περιόδων χρήσης εκτός αιχμής (π.χ., το βράδυ 1.00- 5.00), μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας με μείωση των επιπέδων φωτισμού ('In depth: Advantages of LED Lighting' 2016).

Ο φωτισμός LED έχει επίσης μια πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, όπως αναφέραμε (50.000 ώρες ή 15 έως 20 έτη), μειώνοντας το κόστος συντήρησης με μείωση της συχνότητας του εξαρτήματος ή και αντικατάσταση του λαμπτήρα. Η διάρκεια ζωής του λοιπόν, υπερβαίνει εκείνη του συμβατικού φωτισμού HPS κατά 2-4 φορές. Επίσης, ο φωτισμός LED δεν έχει υδράργυρο ή μόλυβδο, και δεν απελευθερώνει αυτές τις τοξικές ουσίες αν κάποιο σημείο έχει υποστεί βλάβη, σε αντίθεση με τον φωτισμό υδράργυρου ή HPS.

Παρά τα πλεονεκτήματα του φωτισμού LED, μερικά πιθανά μειονεκτήματα είναι προφανή. Πρώτον, το αρχικό κόστος είναι υψηλότερο από ό, τι στα συμβατικά φωτιστικά συστήματα συνεπώς απαιτούνται αρκετά χρόνια εξοικονόμησης ενέργειας για την απόσβεση της αρχικής δαπάνης (Silverman, 2009). Επίσης, τα φασματικά χαρακτηριστικά του φωτισμού LED μπορεί να είναι προβληματικά. Ο φωτισμός LED έχει στενό εύρος ζώνης, με το "λευκό" να λαμβάνεται μετά την προσθήκη στρωμάτων επικάλυψης φωσφόρου και με φως υψηλής

ενέργειας (όπως το μπλε). Αυτά τα στρώματα φωσφόρου μπορεί με το πέρασμα του χρόνου να χαλάσουν οδηγώντας σε υψηλότερη φασματική απόκριση από ό,τι είχε σχεδιαστεί αρχικά. Οι κατασκευαστές για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιούν πιο ανθεκτικά επιχρίσματα, φίλτρα αποκλεισμού, ή τη χρήση LED χαμηλότερης θερμοκρασίας χρώματος. Με την κατάλληλη σχεδίαση, οι υψηλότερες φασματικές αποκρίσεις μπορεί να ελαχιστοποιηθούν. (Kraus, 2016).



Σχήμα 39 Κατάταξη της ακτινοβολίας

Ανάλογα με τον σχεδιασμό, ένα μεγάλο ποσό μπλε φωτός εκπέμπεται από κάποιες λυχνίες LED που εμφανίζονται λευκές με γυμνό μάτι. Η πρώτη γενιά LED για το φωτισμό των εξωτερικών χώρων και των εγκαταστάσεων που εξακολουθούν να εγκαθίσταται σε μεγάλο βαθμό είναι τα LED «4000K» μονάδων.

Η ονοματολογία που προέρχεται από την κλίμακα Kelvin απεικονίζει το αντίστοιχο χρώμα για κάθε θερμαινόμενο μεταλλικό αντικείμενο αυτής της θερμοκρασίας.. Συγκριτικά, η CCT που σχετίζονται με τα επίπεδα του φωτός στη διάρκεια της ημέρας ισοδυναμεί με 6500K ενώ ο φωτισμός νατρίου υψηλής πίεσης (το σημερινό πρότυπο) έχει CCT 2100K. Είκοσι-εννέα

τοίς εκατό του φάσματος του φωτισμού των 4000K LED εκπέμπεται ως μπλε φως, αλλά το ανθρώπινο μάτι το αντιλαμβάνεται ως ένα ψυχρό λευκό χρώμα.

Σήμερα, ο μηχανικός φωτισμός LED είναι διαθέσιμος στα 3000K ή και χαμηλότερα. Στο 3000K, το ανθρώπινο μάτι εξακολουθεί να αντιλαμβάνεται το φως ως "λευκό", αλλά είναι λίγο πιο ζεστό, και μόνο το περίπου 21% των εκπομπών του είναι στο μπλε τμήμα του φάσματος. Αυτή η εκπομπή είναι ακόμα πολύ μπλε για το νυχτερινό περιβάλλον, αλλά θεωρείται μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με το φωτισμό των 4000K. Λόγω των διαφορετικών επιχρισμάτων, η ενεργειακή απόδοση του φωτισμού των 3000K είναι μόνο 3% λιγότερο από ό,τι αυτή των 4000K, αλλά το φως είναι πιο ευχάριστο για τους ανθρώπους και έχει λιγότερο αντίκτυπο στην άγρια πανίδα ('LED Lighting Facts', 2016).

Το 60% των ζώων είναι νυκτόβια και ενδέχεται να επηρεαστούν αρνητικά από την έκθεση στο νυχτερινό ηλεκτρικό φωτισμό. Αρκετά είδη πουλιών που ζούν τη νύχτα, από τις αντανάκλασεις του φεγγαριού, των αστεριών και σε συνδυασμό με τον υπερβολικό νυχτερινό φωτισμό που δημιουργεί αντανάκλασεις σε διάφορα αντικείμενα (όπως σε ουρανοξύστες στην Αμερική), μπορεί να οδηγηθούν σε σύγχυση, συγκρούσεις ή και θάνατο (Pawson & Bader, 2014).

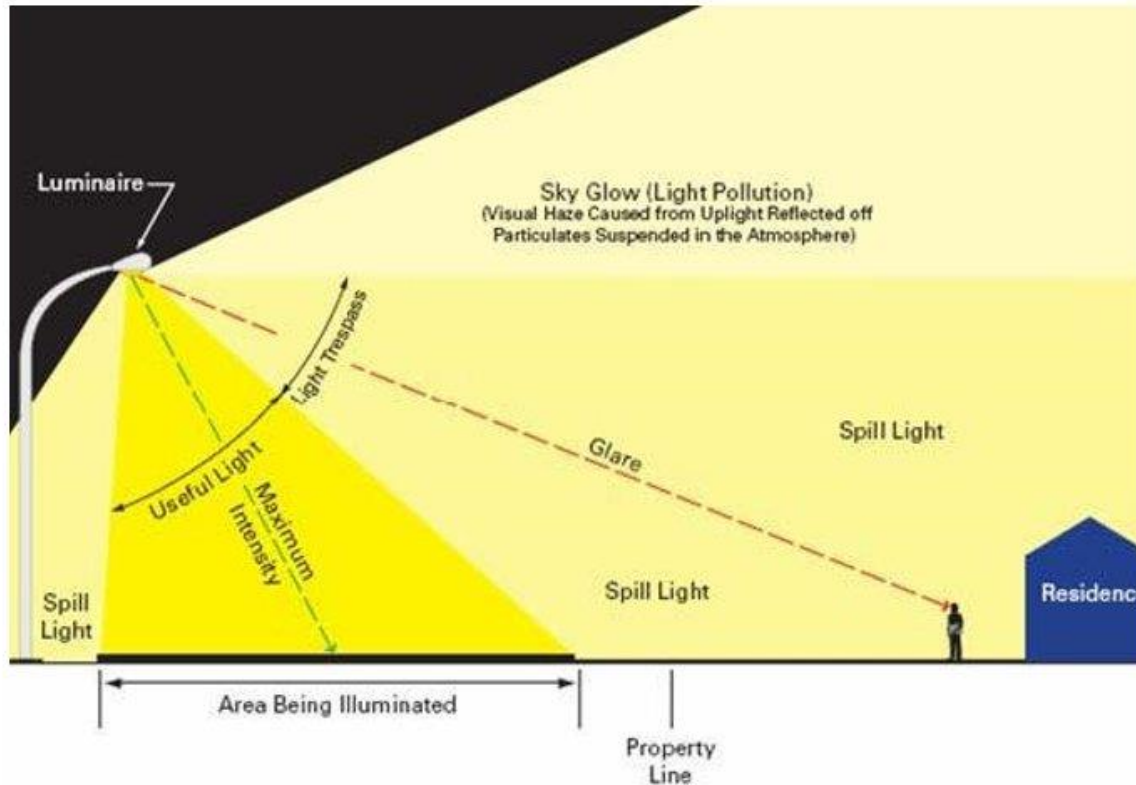
Πίνακας 11 Θεσπισμένα επιτρεπόμενα όρια διαφεύγοντος προς τον ουρανό φωτός με βάση τις περιβαλλοντικές ζώνες (Νικολάου, 2013)

Environmental zone	Sky glow ULR* (max %)
E1	0.0
E2	2.5
E3	5.0
E4	15.0

* ULR is the Upward Light Ratio of the installation and is the maximum permitted percentage of luminaire flux for the total installation that goes directly into the sky.

Πολλά έντομα χρειάζονται ένα σκοτεινό περιβάλλον για να τεκνοποιήσουν, με το πιο γνωστό παράδειγμα τις πυγολαμπίδες που δεν μπορεί να "δει" η μία την άλλη όταν η φωτορύπανση είναι έντονη. Άλλα περιβαλλοντικά ωφέλιμα έντομα έλκονται από το πλούσιο μπλε φωτισμό, που τα περιβάλλει μέχρι να εξαντληθούν και να πεθάνουν (Gaston et al., 2012). Ο αθωράκιστος φωτισμός σε παραλιακές περιοχές οδήγησε σε μαζική πτώση του πληθυσμού των χελωνών καθώς οι νεοσσοί αποπροσανατολίζονται από το ηλεκτρικό φως και τις λάμπες του ουρανού με αποτέλεσμα να μην μπορούν να φτάσουν με ασφάλεια στο νερό (Salmon, 2006). Ακόμα και ο φωτισμός σε γέφυρες αν είναι «πολύ μπλε» έχει αποδειχθεί ότι αναστέλλει την ανάντη μετανάστευση ορισμένων ειδών ψαριών, όπως ο σολομός που επιστρέφουν για να αναπαραχθούν. (Rusenko et al., 2012).

Αναγνωρίζοντας τις αρνητικές συνέπειες της φωτορύπανσης στα νυκτόβια είδη, τα εθνικά πάρκα των ΗΠΑ έχουν υιοθετήσει τις βέλτιστες πρακτικές φωτισμού και τώρα χρησιμοποιούν ελάχιστο και θωρακισμένο φωτισμό. Η φωτορύπανση κατά μήκος των συνόρων των εθνικών πάρκων οδηγεί σε αρνητικές συνέπειες για το τοπικό βιο-περιβάλλον. Η σωστή θωράκιση και η κατάλληλη θερμοκρασία χρώματος των εγκαταστάσεων φωτισμού μπορεί να ελαχιστοποιήσει σημαντικά τις επιβλαβείς επιπτώσεις για αυτά τα είδη στο περιβάλλον μας (Kraus, 2016).



Σχήμα 40 Τα είδη της φωτορύπανσης (Νικολάου, 2013)

Σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες ή αγροτικές περιοχές όπου τα άγρια ζώα μπορούν να επηρεαστούν ιδιαίτερα (π.χ., κοντά σε εθνικά πάρκα ή σε ζώνες βιοπροστασίας όπου υπάρχουν νυκτόβια ζώα), θα πρέπει να γίνει εγκατάσταση με LED εκπομπής 3000K ή και χαμηλότερου φωτισμού που να έχει αποτελεσματική θωράκιση. Μεγάλη προσοχή πρέπει επίσης να δοθεί στη χρήση των φίλτρων που εμποδίζουν τα μπλε μήκη κύματος (όπως χρησιμοποιούνται στη Χαβάη). Το μπλε φως σκεδάζεται ευρύτερα (αυτός είναι άλλωστε ο λόγος που κατά τη διάρκεια της ημέρας ο ουρανός είναι "μπλε"), και ο αθωράκιστος μπλε πλούσιος φωτισμός που ταξιδεύει κατά μήκος του οριζόντιου επιπέδου αυξάνει την αντηλιά και τη νυχτερινή λάμψη του ουρανού προκαλώντας φωτορύπανση (Kraus, 2016).

Συνεπώς, δεν είναι όλοι οι λαμπτήρες LED κατάλληλοι για το φωτισμό του δρόμου. Το υπερβολικά έντονο μπλε φάσμα προκαλεί φωτορύπανση και περιβαλλοντική αναστάτωση σε πολλά νυκτόβια είδη. Κατά συνέπεια, η σωστή μελέτη της επιλογής κατάλληλου φάσματος φωτισμού LED ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

4.1.2 Επίδραση Στην Ανθρώπινη Υγεία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει προχωρήσει σταδιακά στην κατάργηση των ενεργοβόρων λαμπτήρων με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που επιδρά αρνητικά στη δημόσια υγεία (πχ. αύξηση των αναπνευστικών προβλημάτων). Με βάση τον Κανονισμό της 244/2009/ΕΚ, οι συμβατικοί λαμπτήρες πυράκτωσης καταργήθηκαν σταδιακά μέχρι το τέλος του 2012 με στόχο την αντικατάσταση τους από οικονομικότερους και ασφαλέστερους λαμπτήρες. Οι λαμπτήρες εξοικονόμησης ενέργειας συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τελικά στην προστασία του περιβάλλοντος και της υγείας. Όμως δεν είναι όλοι οι λαμπτήρες το ίδιο, αφού κάποιοι κρύβουν πολύ σοβαρούς κινδύνους ιδίως για τα παιδιά και τις εγκύους (‘Εθνική Επιτροπή Κύπρου’, 2012).

Ένας τύπος από τους λαμπτήρες εξοικονόμησης ενέργειας είναι οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού CFL. Όπως και οι προηγούμενης τεχνολογίας λαμπτήρες (πυρακτώσεως, αλογόνου κτλ) περιέχουν μεταλλικό υδράργυρο που είναι μία πολύ τοξική ουσία. Ο υδράργυρος δεν βρίσκεται ελεύθερος κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα αλλά διαχέεται στην ατμόσφαιρα μόνο όταν σπάσει. Συνεπώς, όταν ο λαμπτήρας λειτουργεί και δεν έχει σπάσει, δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος για την υγεία από αυτόν. Σε περίπτωση θραύσης του λαμπτήρα, ο μεταλλικός υδράργυρος εισέρχεται στον οργανισμό, κυρίως, δια της αναπνοής, αλλά και από το στόμα, ιδίως στα μικρά παιδιά που συνηθίζουν να βάζουν το χέρι τους στο στόμα. Ο υδράργυρος όταν εισέρχεται μέσω της αναπνευστικής οδού απορροφάται από τον οργανισμό σε ποσοστό που φτάνει το 80% (‘Εθνική Επιτροπή Κύπρου’, 2012).

Η έκθεση των εγκύων γυναικών σε υδράργυρο είναι επικίνδυνη. Σε περίπτωση εισπνοής του, το αέριο μπορεί να οδηγηθεί μέσω της κυκλοφορίας του αίματος, στον εγκέφαλο και άλλα όργανα του οργανισμού αλλά να διαπεράσει, επίσης, τον πλακούντα φτάνοντας στο έμβρυο. Στο έμβρυο επηρεάζει, άμεσα, την ανάπτυξη των νεφρών και του κεντρικού νευρικού συστήματος. Συγκεκριμένα, πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι δεν υπάρχει ασφαλές επίπεδο έκθεσης στον υδράργυρο του αναπτυσσόμενου εγκέφαλου του εμβρύου. Ακόμη, ο υδράργυρος είναι ιδιαίτερα επικίνδυνος όχι μόνον για την ανάπτυξη του εγκεφάλου του εμβρύου αλλά και για αυτή των μικρών παιδιών (‘Εθνική Επιτροπή Κύπρου’, 2012).

Προσπάθειες για την προστασία της εγκύου και του παιδιού από οποιαδήποτε έκθεση στον υδράργυρο, έχουν γίνει πολλές. Καταρχάς, δημιουργήθηκαν νέοι βελτιωμένοι και λιγότερο επικίνδυνοι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού CFL. Αυτοί οι νέοι CFL δεν περιέχουν ελεύθερο τον υδράργυρο αλλά δεσμευμένο σε αμάλγαμα. Με τον τρόπο αυτό, ακόμα και αν ο λαμπτήρας σπάσει δεν παρατηρείται άμεση ελευθέρωση του υδραργύρου στην ατμόσφαιρα. Έτσι, τα παρακείμενα άτομα δεν εκτίθενται σε τοξικά αέρια και φυσικά έχουν τη δυνατότητα να απομακρύνουν αποτελεσματικά και με ασφαλές τρόπο το υλικό.

Παρ' όλα αυτά, οι λαμπτήρες LED αποτέλεσαν επανάσταση σε αυτό το θέμα αφού είναι οι μόνοι λαμπτήρες που δεν περιέχουν υδράργυρο. Ο κίνδυνος που δημιουργήθηκε με την έλευση των λαμπτήρων LED ήταν διαφορετικός και σχετίζεται με το είδος και την ένταση του φωτός. Συγκεκριμένα, η ένταση του φωτός σε αυτούς είναι πολύ ισχυρή φτάνοντας μέχρι και 1.000 φορές μεγαλύτερη από εκείνη ενός λαμπτήρα παλαιότερης τεχνολογίας και η αναλογία του μπλε ως προς το άσπρο φως είναι ψηλή. Αυτά τα χαρακτηριστικά εγκυμονούν υψηλούς κινδύνους τόσο σε οικιακή όσο και σε δημόσια χρήση τους ('Εθνική Επιτροπή Κύπρου', 2012).

Σε μία μεγάλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στις ΗΠΑ όσον αφορά την αντικατάσταση του οδικού φωτισμού με λαμπτήρες νέας τεχνολογίας LED αποκαλύφθηκε ότι το έντονο μπλε από τη σημειακή πηγή των λαμπτήρων οδηγεί σε δυσφορία και θάμβωση δημιουργώντας μία κατάσταση οδηγητικής επικινδυνότητας (Kraus, 2016).

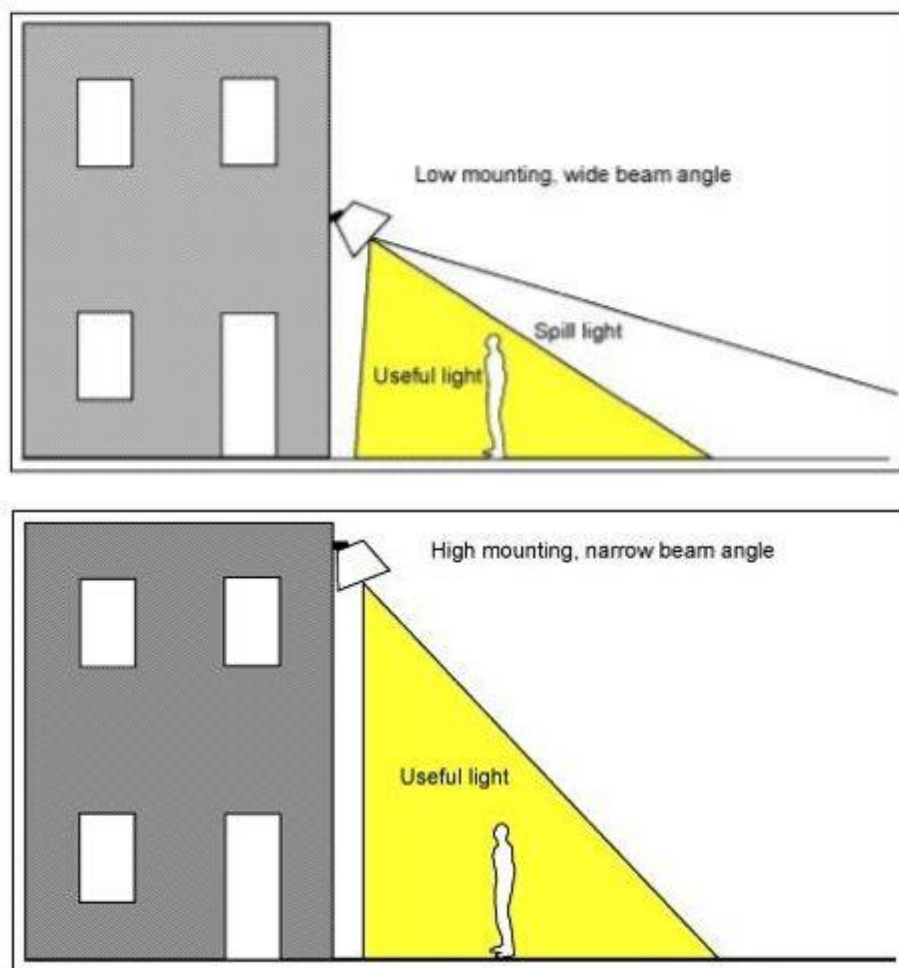
Η προσωρινή αναπηρία λόγω αντηλιάς ορίζεται από το Υπουργείο Μεταφορών της Αμερικής (Department of Transportation ή DOT) ως εξής:

" Η προσωρινή αναπηρία λόγω αντηλιάς συμβαίνει όταν γίνεται εισαγωγή διάχυτου φωτός μέσα στο μάτι μειώνοντας την ικανότητα του να αντιληφθεί τις λεπτομέρειες του χώρου. Είναι μία στοχευόμενη απομείωση της οπτικής απόδοσης. "

Κλασικά μοντέλα αυτού του τύπου της αντανάκλασης αποδίδουν τα επιβλαβή αποτελέσματα της ενδοφθάλμιας σκέδασης φωτός στο μάτι. Η σκέδαση προκαλεί μια επικαλυπτόμενη φωτεινότητα πάνω στον αμφιβληστροειδή, η οποία μειώνει αποτελεσματικά την αντίθεση των εικόνων που σχηματίζονται στον αμφιβληστροειδή. Η επίδραση στην επικαλυπτόμενη

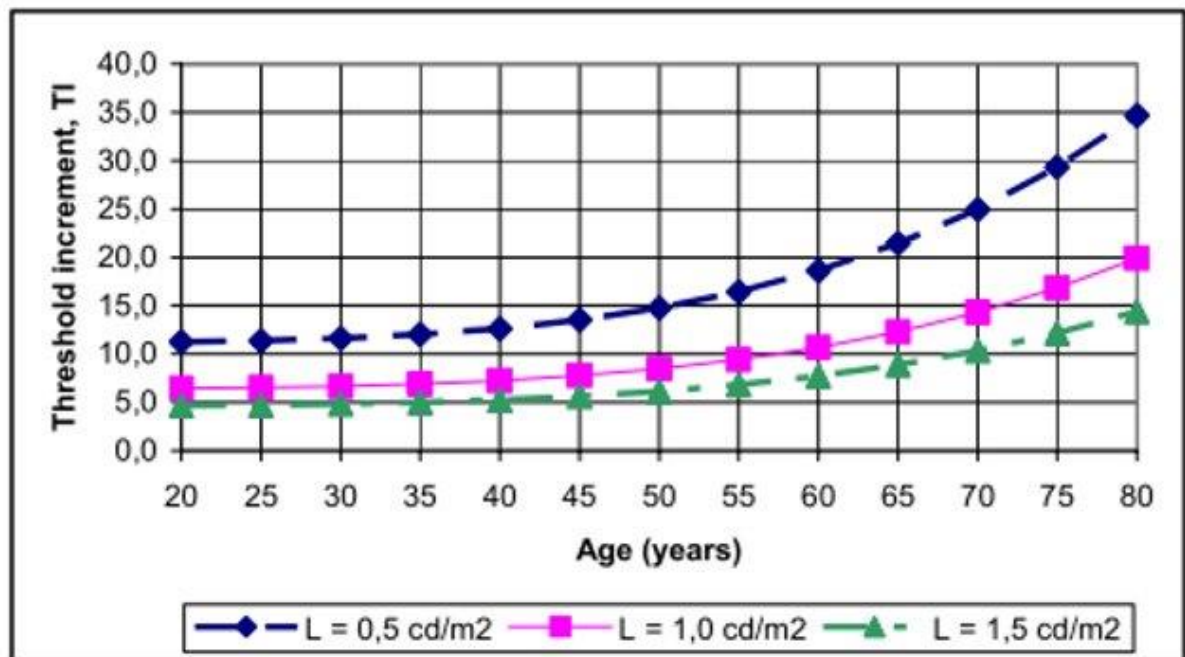
φωτεινότητα έχει σοβαρές επιπτώσεις για τη ορατότητα κατά τη διάρκεια της νυχτερινής οδήγησης ('U.S. DOT', 2005).

Αν και ο φωτισμός LED είναι οικονομικά αποδοτικός μπορεί να οδηγήσει σε χειρότερη αντηλιά από τον συμβατικό φωτισμό. Αυτή η αντηλιά μπορεί να ελαχιστοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό με τον σωστό σχεδιασμό και τη σωστή μηχανική του φωτισμού. Κατά την διεξαγωγή της μελέτης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όλος ο χώρος και να χρησιμοποιούνται φώτα που φωτίζουν αποδοτικά το οδόστρωμα χωρίς απώλειες φωτός στα παρακείμενα πεζοδρόμια και αυλές. Το έντονο φως μπορεί να μεγεθυνθεί με ακατάλληλη θερμοκρασία χρώματος των LED, όπως το έντονο μπλε.



Σχήμα 41 Λανθασμένη και σωστή τοποθέτηση οδηγεί σε αύξηση ή μείωση του ανεπιθύμητου φωτισμού αντίστοιχα (Νικολάου, 2013).

Τα LED είναι πολύ έντονες σημειακές πηγές που προκαλούν δυσφορία στην όραση, ειδικά στους ηλικιωμένους οδηγούς. Όσο αυξάνεται η ηλικία ενός ανθρώπου μειώνεται η περιφερειακή του όραση. Αυτό συμβαίνει γιατί χάνεται σημαντικά η ικανότητα ρύθμισης του ανοίγματος της κόρης του ματιού ανάλογα με το επίπεδο φωτισμού και αυτό γίνεται ακόμη πιο δύσκολο στις συνθήκες φωτισμού κατά τις νυκτερινές ώρες (Νικολάου, 2013) Οι οδηγοί μεγάλης ηλικίας είναι ευαίσθητοι στην προσωρινή αναπηρία λόγω αντηλιάς. Στο επίπεδο φωτισμού των 0,5 cd/m² ένας οδηγός 65 χρονών χρειάζεται 10 % περισσότερη αντίθεση για να δει ένα αντικείμενο στο δρόμο.



Σχήμα 42 Συσχέτιση της αντηλιάς, τα επίπεδα λαμπρότητας του οδοστρώματος με την ηλικία (Νικολάου, 2013).

Εκτός από την αντηλιά και τις επιπτώσεις της στους οδηγούς, πολλοί κάτοικοι είναι δυσαρεστημένοι με τα λαμπερά φώτα LED ιδιαίτερα τις νυκτερινές ώρες. Σε πολλές περιοχές, όπου έχουν εγκατασταθεί 4000K και υψηλότερα LED, η κοινότητα κάνει καταγγελίες για το εκτυφλωτικό φως διαμαρτυρόμενοι για μία "ατμόσφαιρα φυλακής" λόγω της υψηλής ένταση του μπλε φωτισμού. Σε αντίθεση, ο φωτισμός των 3000K θεωρείται από τους πολίτες πολύ καλύτερος. (Kraus, 2016).

Πίνακας 12 Επίπεδα έντασης φωτισμού ανάλογα με την ώρα (Νικολάου, 2013).

Environmental zone	Light into windows, vertical illuminance (lux)	
	Before curfew	After curfew
E1	2	1*
E2	5	1
E3	10	2
E4	25	5

Source: ILE 2000

* Acceptable from public road lighting installations only

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των LED που εγκυμονεί κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία είναι ο αθωράκιστος φωτισμός των λαμπτήρων. Ο αθωράκιστος φωτισμός LED προκαλεί σημαντική δυσφορία λόγω του έντονου φωτός. (Scigliano E, 2013).

Η δυσφορία και η προσωρινή αναπηρία λόγω της αντηλιάς μπορεί να μειώσουν την οπτική οξύτητα, μειώνοντας την ασφάλεια και δημιουργώντας μια οδική επικινδυνότητα. Διάφορα δοκιμαστικά μέτρα έχουν επινοηθεί για τον προσδιορισμό και την ποσοτικοποίηση του επιπέδου της αντανάκλασης και των προβλημάτων της όρασης λόγω κακοσχεδιασμένων εγκαταστάσεων φωτισμού LED (Vos, 2003). Συνήθως ο έλεγχος γίνεται με μέτρηση του φωτός ανά τετραγωνικό μέτρο στο έδαφος. Αυτό είναι χρήσιμο για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας και της ομαλότητας των εγκαταστάσεων φωτισμού. Η μέθοδος αυτή, ωστόσο, δεν λαμβάνει υπόψη την ανθρώπινη βιολογική απόκριση στο σημείο. Είναι γνωστό ότι οι αθωράκιστες πηγές φωτός μπορούν να προκαλέσουν σύσφιξη της κόρης του οφθαλμού, οδηγώντας σε χειρότερη νυχτερινή όραση μεταξύ των φωτιστικών σωμάτων και προκαλώντας το λεγόμενο «πέπλο του φωτισμού». Αυτό οδηγεί σε μείωση της όρασης αντιστρέφοντας τον αρχικό σκοπό των εγκαταστάσεων φωτισμού LED. Ιδανικά οι εγκαταστάσεις φωτισμού θα πρέπει να δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες αξιολογώντας

τις επιπτώσεις στην οπτική οξύτητα, προκειμένου να εξακριβωθούν τα καλύτερα σχέδια για τη δημόσια ασφάλεια

Συνεπώς, σε κάθε φωτισμό LED, θα πρέπει να δοθεί η δέουσα προσοχή στο σχεδιασμό και στα μηχανικά χαρακτηριστικά. Ο φωτισμός LED είναι εγγενώς μία φωτεινή σημειακή πηγή και μπορεί να προκαλέσει κόπωση των ματιών και προσωρινή αναπηρία λόγω της αντηλιάς, αν αντανάκλαστεί άμεσα στο ανθρώπινο μάτι στον οδικό φωτισμό. Αυτό μετριάζεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό, τη θωράκιση και την εγκατάσταση διασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχουν φωτεινές λάμπες πάνω από 80 μοίρες οριζόντια. Η σωστή θωράκιση θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιείται για την πρόληψη της εισόδου του φωτός σε σπίτια κατά μήκος του δρόμου, που είναι μια κοινή αιτία των παραπόνων των πολιτών. Σε αντίθεση με τον τρέχον φωτισμό HPS των δρόμων, τα LED έχουν τη δυνατότητα να ελέγχονται ηλεκτρονικά από μια κεντρική τοποθεσία. Η παροχή αυτού του επιπλέον έλεγχου αυξάνει το κόστος εγκατάστασης, αλλά μπορεί να αξίζει τον κόπο, διότι αυξάνει την μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση ενέργειας και ελαχιστοποιεί το επιζήμιο για τον άνθρωπο και το περιβάλλον εφέ του φωτισμού (Kraus, 2016).

Κατά την τελευταία δεκαετία έχουν αναφερθεί πολλά περιστατικά σχετικά με τις πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία της έκθεσης στο ηλεκτρικό φως, ιδιαίτερα το βράδυ. Το κύριο μέλημα είναι η διατάραξη του κιρκάδιου ρυθμού (Evans & Davidson, 2013). Όταν εξασθενεί το φως του περιβάλλοντος, και με την απουσία του ηλεκτροφωτισμού, οι άνθρωποι αρχίζουν τη μετάβαση στη νυχτερινή φυσιολογία περίπου το σούρουπο. Συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις μελατονίνης στο αίμα αυξάνονται, η θερμοκρασία του σώματος πέφτει, η υπνηλία αυξάνεται, η πείνα υποχωρεί, καθώς και αρκετές άλλες αποκρίσεις. Ένας αριθμός ελεγχόμενων εργαστηριακών μελετών έχουν δείξει καθυστερήσεις του ανθρώπου στην κανονική μετάβαση στη νυχτερινή φυσιολογία το βράδυ λόγω της έκθεσης του σε οθόνες υπολογιστών, tablets, e-readers με οπίσθιο φωτισμό, και του φωτός του δωματίου (Gooley et al., 2011).

Αυτά τα αποτελέσματα είναι εξαρτώμενα από το μήκος κύματος και την ένταση του φωτισμού, με κύριο ένοχο στη διατάραξη της μετάβασης τις ηλεκτρικές πηγές φωτός με μικρο μήκος κύματος (μπλε). Επίσης, τα αποτελέσματα αυτά δεν φαίνονται με φωτεινές πηγές που έχουν dimmer, και μεγαλύτερα μήκη κύματος (όπως η φωτιά από ξύλα ή οι λαμπτήρες πυρακτώσεως χαμηλής ισχύος).

Σε μελέτες σε ανθρώπους, έχει παρατηρηθεί μια βραχυπρόθεσμη μείωση στην ποιότητα του ύπνου μετά από έκθεση σε φως μικρού μήκους κύματος πριν τον ύπνο. Αν και τα δεδομένα είναι ακόμη υπό συζήτηση, κάποια στοιχεία υποστηρίζουν μακροπρόθεσμη αύξηση του κινδύνου για καρκίνο, διαβήτη, καρδιαγγειακές παθήσεις και παχυσαρκίας μετά από χρόνια διαταραχή του ύπνου ή εργασία με νυχτερινές βάρδιες που συνδέονται με την έκθεση σε πιο φωτεινές πηγές φωτός το βράδυ (Koo et al., 2016).

Τα ηλεκτρικά φώτα διαφέρουν στον αντίκτυπο που έχουν στο κινκάρδιο ρυθμό. Με την κατανόηση της νευροεπιστήμης του κινκάρδιου ρυθμού και της αντίληψης μας στο φως μπορούμε να βελτιώσουμε το σχεδιασμό του ηλεκτρικού φωτισμού με σκοπό την ελαχιστοποίηση των κινκάρδιων διαταραχών αλλά και τη βελτίωση της οπτικής αποτελεσματικότητας. Τα λευκά LED φώτα του δρόμου επί του παρόντος βρίσκονται στην αγορά και πωλούνται μαζικά, στο όνομα της ενεργειακής απόδοσης και της μακροπρόθεσμης εξοικονόμησης του κόστους, αλλά έχουν φάσμα φωτός που καταστέλλει πιο αποτελεσματικά τη μελατονίνη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Εκτιμάται ότι ένας "λευκός" λαμπτήρας LED είναι τουλάχιστον 5 φορές πιο ισχυρός στον επηρεασμό της κινκαρδιανής φυσιολογίας από ένα λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης, με βάση τη καταστολή της μελατονίνης (Kraus, 2016).

Πρόσφατες ερευνητικές μεγάλες διαπίστωσαν ότι φωτεινός νυχτερινός φωτισμός κατοικιών σχετίζεται με μειωμένο χρόνο και κακή ποιότητα του ύπνου, νυχτερινές αφυπνίσεις, υπερβολική υπνηλία, μειωμένη ημερήσια λειτουργία, και παχυσαρκία (Koo et al., 2016). Έτσι, ο λευκός φωτισμός με LED του δρόμου θα μπορούσε επίσης, να συμβάλει στον κίνδυνο χρόνιων διαταραχών στους πληθυσμούς των πόλεων που εγκαθίστανται. Θα πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στο επίπεδο του δρόμου για να εκτιμηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι πιθανές κινκαρδικές επιπτώσεις της νυχτερινής έκθεσης σε λευκούς λαμπτήρες LED στο δρόμο.

Επίσης, το μπλε φως λόγω του μικρού μήκους κύματος εκτός από διαταραχή στο κινκάρδιο ρυθμό προκαλεί όπως αναφέραμε και τοξικό στρες στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού. Εκτός από το δημόσιο φωτισμό και το φωτισμό του δρόμου προσοχή πρέπει να δοθεί και στον οικιακό φωτισμό. Ο κίνδυνος ανεπανόρθωτης βλάβης στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού είναι πολύ αυξημένος στα παιδιά, γιατί ο κρυσταλλικός φακός του ματιού τους είναι υπό ανάπτυξη και άρα μη ικανός για αποτελεσματικό φιλτράρισμα του φωτός. Το

Γραφείο Τροφίμων, Περιβαλλοντικής και Επαγγελματικής Υγείας και Ασφάλειας (ANSES) της Γαλλίας προειδοποιεί να μη χρησιμοποιούνται συστήματα φωτός LED σε παιδικά δωμάτια ή σε χώρους όπου συχνάζουν μικρά παιδιά. Αναμένεται επίσης ανάλογη εκτίμηση του κινδύνου από την Ευρωπαϊκή Ένωση (‘Εθνική Επιτροπή Κύπρου’, 2012).

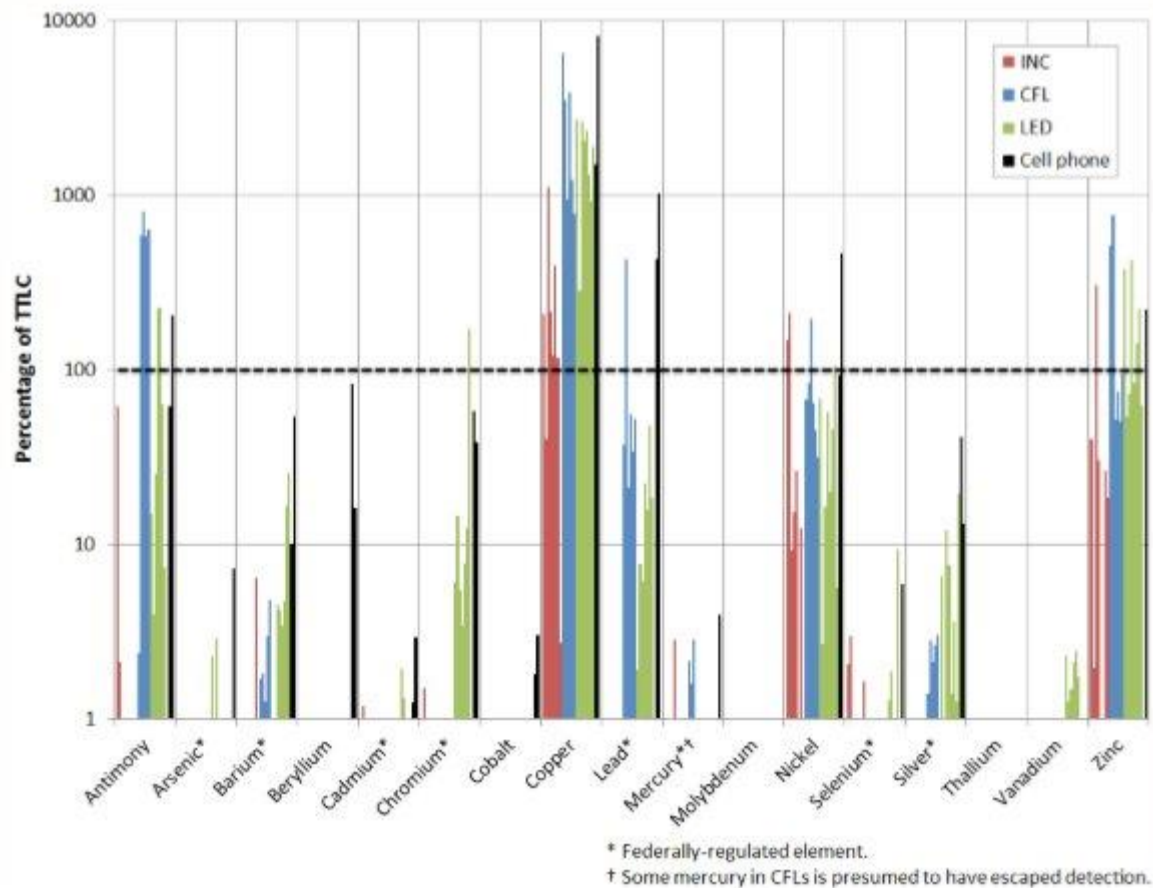
Η τρέχουσα πολιτική υποστηρίζει τις προσπάθειες για τη μείωση των άμεσων (αντηλία, διαταραχή κερκάρδιου ρυθμού, τοξικό στρες αμφιβληστροειδούς) και έμμεσων (φωτορύπανση) επιπτώσεων του φωτισμού στην υγεία. Ειδικά στο φωτισμό του δρόμου, η εφαρμογή των τεχνολογιών για τη μείωση της αντανάκλασης από είναι αναγκαία. Έτσι, η μετατροπή του παρόντος φωτισμού σε χαμηλότερα φώτα CCT LED που θα ελαχιστοποιήσουν τα ενδεχόμενα προβλήματα στην υγεία και στο περιβάλλον κρίνεται απαραίτητη. Το Αμερικανικό Συμβούλιο εξέτασε τις δυσμενείς επιπτώσεις του νυχτερινού φωτισμού στην υγεία, και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διαδεδομένη χρήση του νυχτερινού φωτισμού διαταράσσει διάφορες βιολογικές διαδικασίες, δημιουργώντας δυνητικά επιβλαβείς συνέπειες που σχετίζονται με την άμεση διατάραξη της όρασης αλλά και την προσωρινή αναπηρία λόγω της αντηλίας (Kraus, 2016).



Σχήμα 43 Πρακτική ενημέρωσης των πολιτών για την ασφάλεια χρήσης των λαμπτήρων από το Υπουργείο Υγείας Κύπρου (‘Εθνική Επιτροπή Κύπρου’, 2012).

4.1.3 Απόρριψη και ανακύκλωση

Μία αμερικανική μελέτη επικεντρώθηκε στην διάθεσή και την αποσυναρμολόγηση των λαμπτήρων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, σύμφωνα με τις τυποποιημένες διαδικασίες ελέγχου της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ και της Πολιτείας της Καλιφόρνια ('U.S.DOE', 2013). Στόχος ήταν ο έλεγχος και η σύγκριση των συγκεντρώσεων 17 δυνητικών τοξικών στοιχείων σε σχέση με τα κατώτατα κανονιστικά όρια που έχουν θεσπίσει για τα επικίνδυνα απόβλητα. Ελέγχθηκαν ένα σύνολο 22 δειγμάτων, που αντιπροσωπεύουν 11 διαφορετικά μοντέλα από λαμπτήρες πυρακτώσεως, φθορισμού CFL και LED.



Σχήμα 44 Ποσοστό συγκέντρωσης διαφόρων στοιχείων των λαμπτήρων πυρακτώσεως, φθορισμού και LEDs καθώς και κινητών τηλεφώνων σε σχέση με τα επιτρεπόμενα όρια της Πολιτείας της Καλιφόρνια ('U.S.DOE', 2013)

Οι λαμπτήρες που εξετάστηκαν στη μελέτη επίσης, ήταν σπασμένοι ως μέρος των τυποποιημένων διαδικασιών δοκιμής, εκθέτοντας έτσι έγκλειστα υλικά. Συνεπώς, τα

αποτελέσματα αντιπροσωπεύουν το χειρότερο σενάριο έκπλυσης των εν λόγω στοιχείων των λαμπτήρων σε υπόγεια ύδατα.

Τα ευρήματα της έρευνας ήταν πολύ σημαντικά ('U.S.DOE', 2013):

- Τα επιλεγμένα μοντέλα γενικά βρέθηκαν να είναι κάτω από τους περιορισμούς για τα ομοσπονδιακά ρυθμιζόμενα στοιχεία.
- Σχεδόν όλα οι λαμπτήρες (ανεξαρτήτως τεχνολογίας) υπερβαίνουν τουλάχιστον ένα περιορισμό της Καλιφόρνιας για το χαλκό, το ψευδάργυρο, το αντιμόνιο, ή το νικέλιο.
- Η εξέταση των συστατικών των λαμπτήρων που ξεπέρασε τα όρια αυτά αποκάλυψε ότι τα περισσότερα στοιχεία ήταν στις βίδες των βάσεων, στους οδηγούς, στα στραγγαλιστικά πηνία, στα σύρματα ή στα νήματα.
- Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων στις λάμπες LED ήταν συγκρίσιμες με αυτές των κινητών τηλεφώνων και άλλων ειδών ηλεκτρονικών συσκευών, και συνήθως προέρχονται από συστατικά, εκτός των ίδιων των LEDs.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν πόσο σημαντική είναι η σωστή απόρριψη των προϊόντων φωτισμού ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εγκυμονούντες κίνδυνοι. Τα απομεινάρια των σπασμένων λαμπτήρων, οι άχρηστοι λαμπτήρες και τα υλικά που πιθανώς χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία καθαρισμού ενός λαμπτήρα που έσπασε θεωρούνται επικίνδυνα απόβλητα. Στην Ευρώπη σύμφωνα με το Υπουργείο Υγείας Κύπρου η σωστή απόρριψη των λαμπτήρων που περιέχουν υδράργυρο περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Ποτέ δεν πετάμε τους φθαρμένους ή σπασμένους λαμπτήρες στους απλούς καλάθους αχρήστων του σπιτιού μας.
- Τα τοποθετούμε σε δοχεία που είναι αρκετά ασφαλή, όπως π.χ. η αρχική τους συσκευασία και τα μεταφέρουμε άμεσα στα καταστήματα πώλησης ηλεκτρικών ειδών.
- Τοποθετούμε τα άχρηστα υλικά που χρησιμοποιήσαμε στο καθαρίσμα π.χ. το σάκο της σκούπας, τα γάντια και όλα τα ρούχα/χαρτιά σε διπλές πλαστικές σακούλες που

κλείνουν καλά, έξω από το σπίτι, σε ξεχωριστά κλειστά δοχεία μη προσβάσιμα σε παιδιά. (‘Εθνική Επιτροπή Κύπρου’, 2012)

Μία έρευνα στη Βραζιλία έδειξε ότι μόνο το 6% των λαμπτήρων ανακυκλώνονται σωστά ενώ υπάρχουν μόνο δέκα εταιρείες που μπορούν να ανακυκλώσουν τους λαμπτήρες CFL. Αυτό το χαμηλό ποσοστό ανακύκλωσης συμβαίνει λόγω του υψηλού κόστους που απαιτεί η ανακύκλωση και οι μεταφορές, της παραπληροφόρησης για τους κινδύνους των σπασμένων λαμπτήρων φθορισμού καθώς και της τελικής τοποθέτησης τους σε ακατάλληλα μέρη. Όλα αυτά όμως μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην υγεία των έμβιων όντων.

Όπως αναφέραμε, κύριο πρόβλημα για την υγεία είναι η υψηλή συγκέντρωση υδράργυρου στους λαμπτήρες παλιάς τεχνολογίας ή στους CFL. Εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το ποσό των 3g σε 30g ήδη θεωρείται μοιραίο για τον άνθρωπο. Ακόμα και αν ο άνθρωπος δεν μολυνθεί άμεσα, ο υδράργυρος περνάει στα υπόγεια ύδατα ή στις πηγές, ρυπαίνοντας τα ποτάμια, μολύνοντας τα ψάρια και, κατά συνέπεια, τον ίδιο τον άνθρωπο.

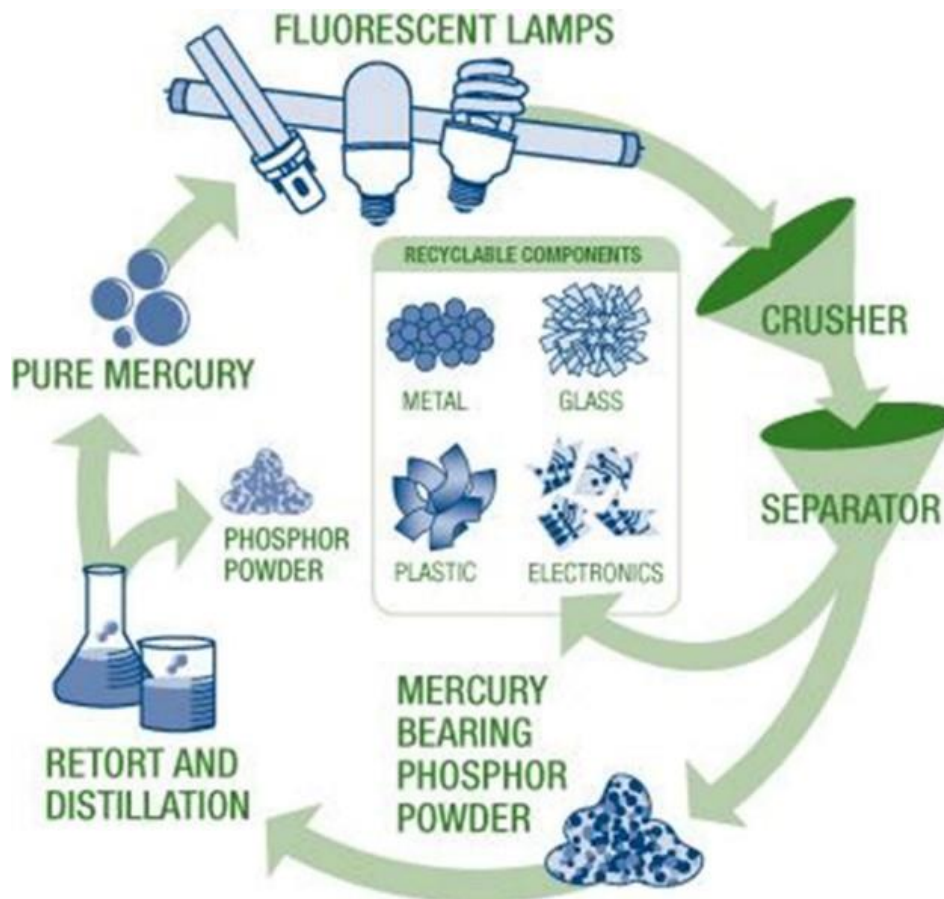
Σύμφωνα με μία έκθεση, λιγότερο από το 1/50 μιας κουταλιάς της σούπας υδραργύρου (δηλαδή μία σταγόνα) σε μια λίμνη 20.000 λίτρων είναι αρκετή για να κάνει τα ψάρια ακατάλληλα για κατανάλωση από τον άνθρωπο. Αυτό γιατί, μόλις γίνει κατάποση τους από τον άνθρωπο, ο μεθυλο-υδράργυρος απορροφάται γρήγορα από το γαστρεντερικό σωλήνα και εύκολα διαπερνά τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό ή τον πλακούντα μιας εγκύου γυναίκας και περνά στο έμβρυο της.

Η ανακύκλωση λοιπόν είναι μονόδρομος. Οι λαμπτήρες πρέπει να τοποθετούνται σε ξεχωριστά δοχεία με προειδοποιήσεις για το τοξικό περιεχόμενό τους. Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, στη Βραζιλία, εκτιμάται ότι η ανακύκλωση κάθε λαμπτήρα φθορισμού κοστίζει κάπου μεταξύ \$0,60 έως \$0,70, τιμή που μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, λόγω του ότι η μεταφορά τους θα πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένες εταιρείες .

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες για την σωστή ανακύκλωση των συμβατικών λαμπτήρων. Η πρώτη είναι η διαδικασία απλού σπασίματος, σύμφωνα με την οποία αλέθεται ο λαμπτήρας και μέσω ενός συστήματος εξάτμισης αφαιρείται μέρος του υδραργύρου. Αυτή η τεχνολογία δεν διαχωρίζει τα συστατικά στοιχεία των λαμπτήρων. Μελέτες όμως πιστοποιούν μείωση του υδραργύρου κατά 98%. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι είναι

κινητό, και άρα έχει τη δυνατότητα να μετακινηθεί σε σημεία όπου δεν υπάρχουν εταιρείες ανακύκλωσης κοντά.

Μία δεύτερη διεργασία είναι το σπάσιμο με θερμική επεξεργασία και θεωρείται η πιο αποτελεσματική διαδικασία στην ανακύκλωση των λαμπτήρων φθορισμού. Αυτή γίνεται σε δύο μέρη, την άλεση και την απόσταξη του υδραργύρου. Στο πρώτο στάδιο της άλεσης, όλα τα υλικά που συνθέτουν το λαμπτήρα χωρίζονται (αλουμίνιο, γυαλί, μέταλλο φωσφόρου σιδήρου, υδράργυρο κτλ). Ο διαχωρισμός ξεκινά με τη συντριβή του λαμπτήρα μέσω ενός θραυστήρα ή μύλου και στη συνέχεια, μέσω ενός συστήματος εξάτμισης διαχωρίζονται τα παραπάνω υλικά λόγω διαφορετικού σταθμικού διαχωρισμού και ηλεκτροστατικότητας. Η σκόνη φωσφόρου με τον υδράργυρο συλλέγονται με ένα φίλτρο στο εσωτερικό του μηχανήματος. Στο δεύτερο στάδιο, η σκόνη απομακρύνεται από το φίλτρο και ακολουθεί μία διεργασία απόσταξης του υδραργύρου. Μία ακόμα διεργασία είναι το σπάσιμο με χημική επεξεργασία. Η χημική επεξεργασία επίσης λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια, τη σύνθλιψη και τη συγκράτηση του υδραργύρου, με διαφορά ότι εδώ η άλεση γίνεται μέσω μίας αυλαίας νερού, έτσι ώστε ο υδράργυρος να μη μπορεί να ξεφύγει.



Σχήμα 45 Η διαδικασία ανακύκλωσης λαμπτήρων φθορισμού μέσω σπασίματος με θερμική διεργασία (EcoLights).

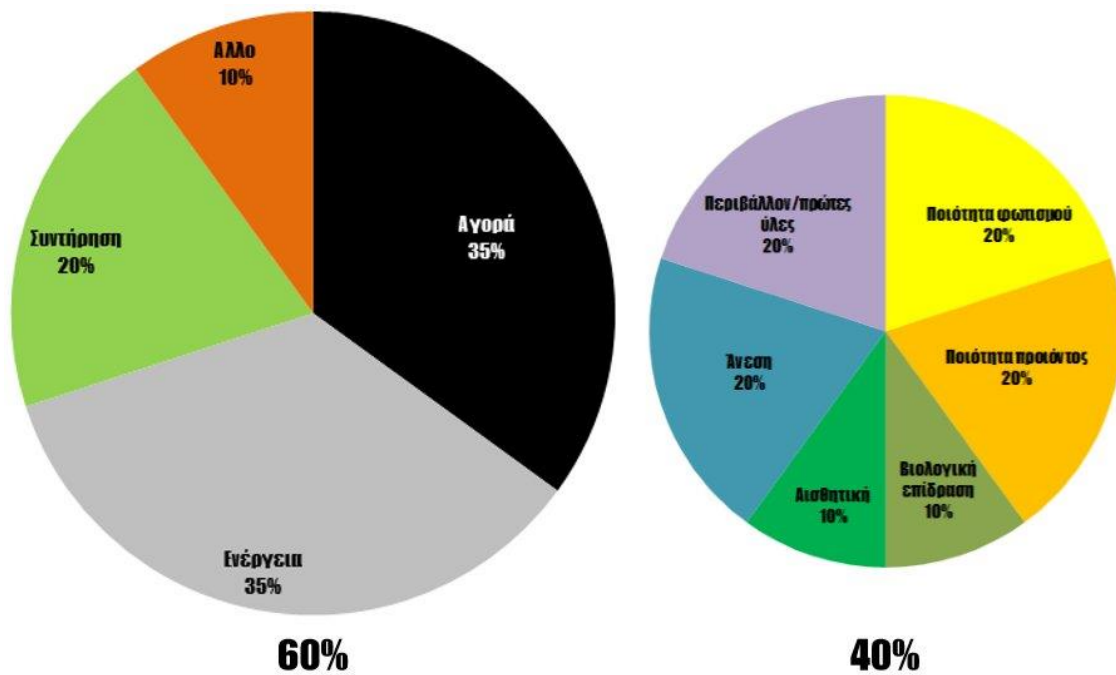
Τέλος, μία ακόμα διεργασία, η διεργασία εμφυσήματος δίνει προτεραιότητα στην ανακύκλωση του γυαλιού των σωλήνων φθορισμού. Ο κύριος στόχος είναι να διατηρηθεί ο σωλήνας στη φυσική του μορφή, ώστε να μπορεί να μεταπωληθεί για τον ίδιο σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκε. Με αυτή τη διαδικασία όμως ελαχιστοποιείται απλά η συγκέντρωση του υδραργύρου που απορρίπτεται στο περιβάλλον, επειδή τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση του υδραργύρου απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής (Carlessi, 2013).

4.1.4 Προτάσεις αντικατάστασης με led

Τα LED όπως είδαμε, είναι μία υπερβολικά αποδοτική μορφή φωτισμού. Όταν πρωτοεμφανίστηκαν παρήγαν ένα πολύ έντονο μπλε φως το οποίο δεν ήταν πάντα κατάλληλο. Με πρόσφατες προόδους στην τεχνολογία αναπτύχθηκε μία νέα γενιά LED που προσφέρει καλύτερες ιδιότητες χρώματος με καλύτερη απόδοση που μπορούν να τοποθετηθούν κατευθείαν στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Όλα αυτά οδήγησαν όλο και περισσότερες ιδιωτικές και δημόσιες εταιρίες να προχωρήσουν σε αντικατάσταση του υπάρχοντος συστήματος φωτισμού τους με LED.

Η εταιρία Travel Foundation για παράδειγμα, ως υπεύθυνη για μεγάλες μονάδες ξενοδοχείων προτείνει την αλλαγή των συστημάτων φωτισμού σε LED. Σύμφωνα με τη μελέτη της λόγω της σπατάλης στο σύστημα θέρμανσης και κλιματισμού από τους πελάτες, τα ξενοδοχεία με την αντικατάσταση με LED των ισοδύναμων λαμπτήρων πυρακτώσεως μπορούν να μειώσουν πάνω από 90% την ενέργεια τους. Ακόμη προτείνει συστήματα διαχείρισης ενέργειας για τα δωμάτια επισκεπτών που να περιλαμβάνουν ανιχνευτές κίνησης και διακόπτες εξοικονόμησης ενέργειας ('Travel Foundation', 2015).

Γενικά, όπως αποκαλύφθηκε, η συντήρηση, το κόστος αγοράς και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την αποδοχή αυτής της τεχνολογίας από τους καταναλωτές. Το υψηλό κόστος εγκατάστασης όμως της νέας τεχνολογίας εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας ήταν αποθαρρυντικός παράγοντας για την υιοθέτηση της. Για να προωθηθεί η νέα τεχνολογία εφαρμόζονται με επιτυχία μέθοδοι όπως οι περιοδικές πληρωμές στους λογαριασμούς του ηλεκτρικού ρεύματος και τα δάνεια για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.



Σχήμα 46 Οικονομικά και ποιοτικά κριτήρια επιλογής συστήματος φωτισμού των καταναλωτών ('Sustainable lighting', 2015)

Στην Ελλάδα, η Κοινοτική Οδηγία 98/11/EG αποτέλεσε τη νομική βάση για την ταξινόμηση της ενεργειακής απόδοσης των οικιακών λαμπτήρων. Στόχος ήταν η απεικόνιση της ενεργειακής απόδοσης των λαμπτήρων (A έως Z) για να είναι ευκολότερη η επιλογή αποδοτικών ενεργειακών προϊόντων. Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) με αυτή την αφορμή, παρείχε φορολογικά κίνητρα στους πελάτες για την αντικατάσταση των λαμπτήρων πυρακτώσεως. Κατά την περίοδο 2000-2001, έγινε αντικατάσταση 120.000 λαμπτήρων πυρακτώσεως η οποία απέδωσε μια εκτιμώμενη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 12 GWh (Υπέρμαχος, 2015).

Στην ΕΕ, επίσης, ο κτιριακός τομέας αποτελεί βασικό τομέα της ευρωπαϊκής οικονομικής κουλτούρας. Στις 25 χώρες της ΕΕ, ο συνολικός χώρος γραφείων μετρήθηκε σε έκταση 1139 km², το 2004, με αύξηση κατά 2% ανά έτος, ή αλλιώς 22,78 km² νέα γραφεία γραφείων ανά έτος. Τα εμπορικά κτίρια, που αποτελούνται από κτίρια γραφείων, κατατάσσονται μεταξύ των κτιρίων που παρουσιάζουν την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η συνολική ετήσια χρήση ενέργειας σε αυτά κυμαίνεται περίπου 100-1000kWh /m² ετησίως, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, τη χρήση και τον τύπο του εξοπλισμού γραφείου, τα επιχειρησιακά προγράμματα, τον τύπο του φακέλου, τη χρήση των συστημάτων HVAC, το είδος του

φωτισμού, κ.λπ. Στη Βόρεια Ευρώπη, η ενεργειακή ένταση γραφείου κυμαίνεται σε 269-350kWh/m² ετησίως και για τα γραφεία σε όλη την Ευρώπη, είναι περίπου 306kWh/m² ετησίως, με μέση τιμή ηλεκτρικού δείκτη 150kWh / m² και μέσο δείκτη καυσίμου 158kWh / m² ετησίως. Μια πρόσφατη μελέτη έδειξε ότι επενδύοντας σε ενεργειακά αποδοτικό φωτισμό μειώνονται οι εκπομπές CO₂ και η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό κατά 50% με τη χρήση της υπάρχουσας τεχνολογίας (Υπέρμαχος, 2015).

Συγκεκριμένα, μία έρευνα από την Ecoboiler έδειξε το ποσό της ενέργειας που εξοικονομείται σε ένα επαγγελματικό χώρο, αν αντικαταστήσουμε 100 λαμπτήρες φθορισμού 120 cm των 36 W με 100 λαμπτήρες LED, 120 cm, 18 W ('Ecoboiler', 2013). Στην έρευνα θεωρήθηκε ότι ο φωτισμός λειτουργεί 12 ώρες ανά ημέρα για 315 ημέρες ετησίως. Συνεπώς, λαμβάνοντας επίσης, υπόψη ότι η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων LED είναι περίπου 50.000 ώρες, έναντι 7.000 ωρών για τους λαμπτήρες φθορισμού, ισχύουν τα παρακάτω:

- Εξοικονόμηση ενέργειας ετησίως: 62%
- Μείωση εκπομπής CO₂ ετησίως: 8.500 kg
- Διάρκεια ζωής λαμπτήρων LED: 13,5 χρόνια
- Απόσβεση επένδυσης: 1,7 χρόνια
- Αξία αγοράς λαμπτήρων: 3.870,00 €
- Κέρδος μετά την απόσβεση για τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων (περίπου 7,8 χρόνια) LED: 27.800 €

Ακόμη, το 2012, μία ανεξάρτητη παγκόσμια έρευνα του προγράμματος LightSavers έδειξε ότι ο φωτισμός LED στους δρόμους μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση ενέργειας έως και 85%. Το παγκόσμιο αυτό πιλοτικό πρόγραμμα αντικατάστασης λαμπτήρων LED νέας γενιάς που διήρκησε δύομιση χρόνια και πραγματοποιήθηκε σε 12 μεγάλες πόλεις όπως το Λονδίνου, τη Νέα Υόρκη, τη Καλκούτα και το Σύδνεϋ με 15 ξεχωριστές δοκιμές, απέδειξε ότι υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί πρακτικά μέσα σε μία νύχτα με σχετικά χαμηλό κόστος. Ανάμεσα στα βασικά ευρήματα του προγράμματος ήταν (Καρυστηναίου, 2014) :

- Οι πολίτες προτιμούν το LED φωτισμό νέας γενιάς, ενώ μάλιστα το 68% μέχρι το 90% των ερωτηθέντων τάχθηκαν υπέρ της εγκατάστασης της τεχνολογίας σε ολόκληρη την πόλη.
- Με την αντικατάσταση αυξήθηκε η αίσθηση της ασφάλειας και η ορατότητα.
- Διαπιστώθηκε ότι ο LED φωτισμός είναι μια ανθεκτική τεχνολογία που απαιτεί ελάχιστες επισκευές – το ποσοστό αποτυχίας των προϊόντων LED άνω των 6.000 ωρών λειτουργίας είναι περίπου στο 1% σε σύγκριση με το παλαιότερο φωτισμό που στη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου είναι στο 10%.

Συμπερασματικά, όλα τα παραπάνω παραδείγματα δείχνουν ότι με την αντικατάσταση του παραδοσιακού φωτισμού με συστήματα LED όχι μόνο εξοικονομείται μεγάλο ποσό ενέργειας αλλά μειώνεται το κόστος και ταυτόχρονα αυξάνονται οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου.

4.2 Νομοθεσία ΕΕ

Μια σειρά κανονισμών, οδηγιών και διατάξεων της Ε.Ε. προβλέπει την αύξηση της χρήσης ενεργειακά αποδοτικών μέσων φωτισμού. Κάποιες από αυτές είναι παρακάτω:

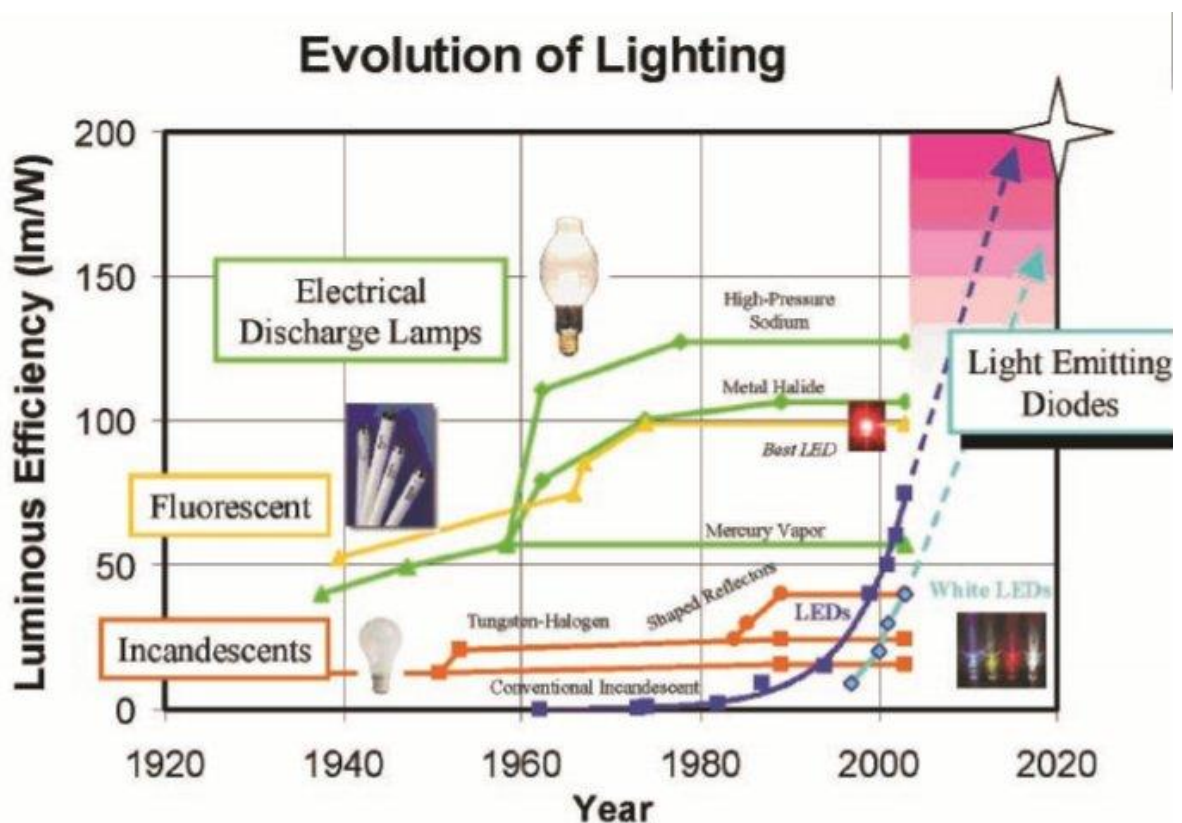
- Οδηγία 2002/95/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού:
<http://www.eoan.gr/uploads/files/195/221976033e8ffd33aec0897e321bf962da71ce5c.pdf>
- Οδηγία 2010/30/ΕΕ σχετικά με την ένδειξη της κατανάλωσης ενέργειας και λοιπών πόρων από τα συνδεδεμένα με την ενέργεια προϊόντα μέσω της επισήμανσης και της παροχής ομοιόμορφων πληροφοριών σχετικά με αυτά:
<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=OqmW1H8Kg9A%3D&tabid=337&language=el-GR>
- Ευρωπαϊκή οικολογική σήμανση για λαμπτήρες σύμφωνα με την Οδηγία 2011/331/ΕΕ:
<https://www.energystar.gov/> και <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficient-products>
- Κριτήρια της ΕΕ για τις ΠΔΣ σχετικά με τον οδικό φωτισμό και τους σηματοδότες κυκλοφορίας:
http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/criteria/street_lighting_el.pdf
- Τεχνικό Δελτίο Πληροφοριών (ΤΔΠ) σχετικά με τον οδικό φωτισμό και τους σηματοδότες κυκλοφορίας:
http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/tbr/street_lighting_tbr.pdf
- Κριτήρια της ΕΕ για τις ΠΔΣ σχετικά με το φωτισμό εσωτερικών χώρων:
http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/criteria/indoor_lighting_el.pdf

- Τεχνικό Δελτίο Πληροφοριών (ΤΔΠ) σχετικά με το φωτισμό εσωτερικών χώρων:
http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/tbr/indoor_lighting_tbr.pdf
- Κριτήρια της ΕΕ για τις ΠΔΣ σχετικά με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό γραφείου:
http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/criteria/office_it_equipment_el.pdf
- Τεχνικό Δελτίο Πληροφοριών (ΤΔΠ) σχετικά με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό γραφείου:
http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/tbr/office_it_equipment_tbr.pdf

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

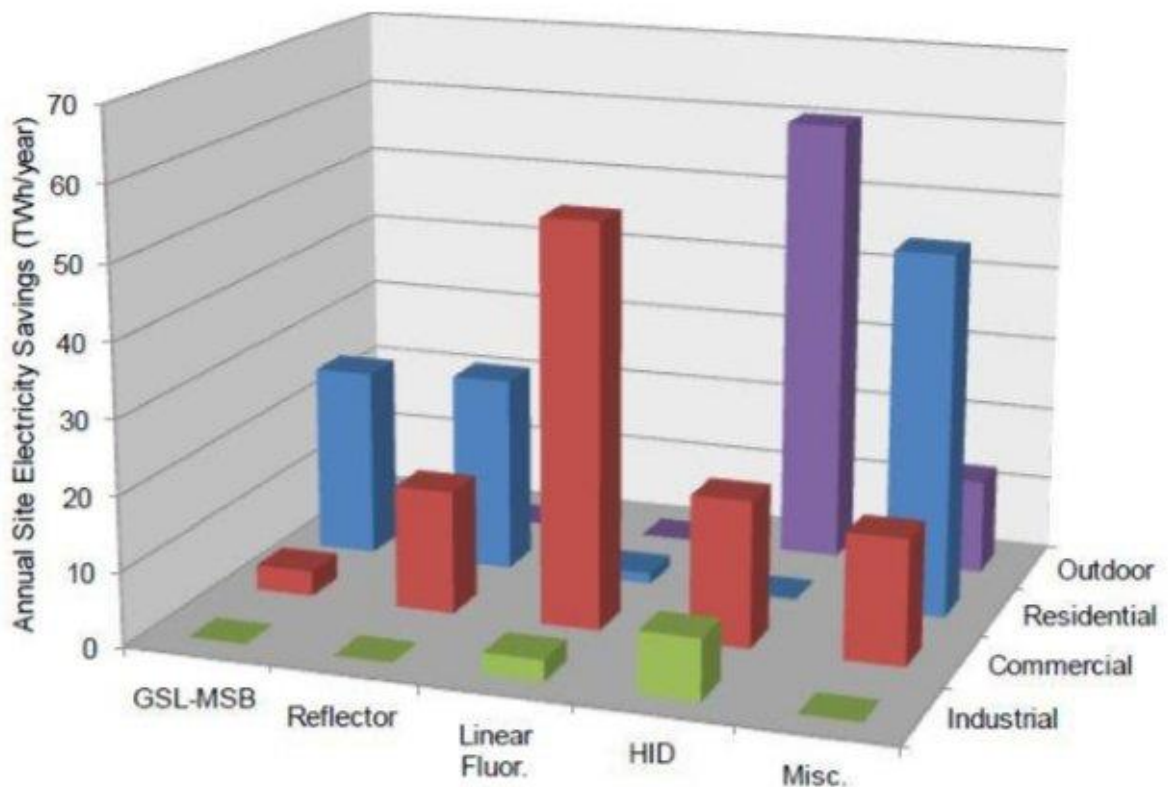
“ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ”

Αυτήν τη στιγμή, η επανάσταση στο φωτισμό συνεχίζεται. Ο φωτισμός με πηγές στερεάς κατάστασης (LEDs και OLEDs), θα αντικαταστήσει πλήρως τις συμβατικές πηγές φωτισμού με τον ίδιο τρόπο που τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αντικατέστησαν τις ηλεκτρονικές λυχνίες περίπου 50 χρόνια πριν. Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ δημοσίευσε μια έκθεση σύμφωνα με την οποία η ευρεία εξάπλωση του φωτισμού LED θα μειώσει την κατανάλωση ενέργειας περίπου κατά το ήμισυ έως το 2030 (‘LEDs Magazine’, 2012).

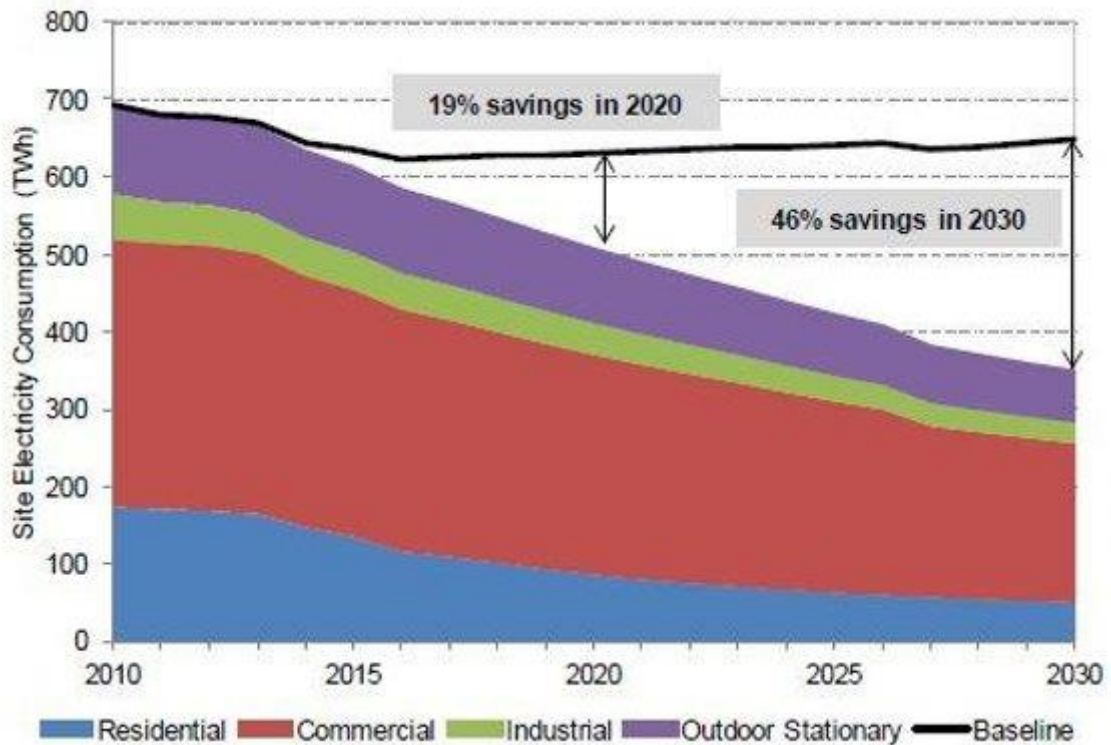


Σχήμα 47 Φωτεινή απόδοση ηλεκτρικών λαμπτήρων στο πέρασμα των χρόνων (Δρακάκης, 2011)

Σύμφωνα με την μελέτη αυτή, η εξοικονόμηση ενέργειας από την προβλεπόμενη άνοδο της αγοράς των LED κατά την περίοδο 2010-2030 θα φτάσει τις 2700 TWh, μια εξοικονόμηση ύψους της τάξης των 250 δις δολαρίων με βάση τις σημερινές τιμές ενέργειας. Η μείωση σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα είναι 1800 εκατομμύρια μετρικούς τόνους. Σύμφωνα με την Υπηρεσία Πληροφοριών Ενέργειας (EIA), προβλέπεται ότι μέχρι το 2020, οι λαμπτήρες LED θα χρησιμοποιούνται κυρίως σε εμπορικές εφαρμογές και εφαρμογές εξωτερικού φωτισμού εκπροσωπώντας το 36% των πωλήσεων στη γενική αγορά φωτισμού. Στο χρονικό διάστημα 2020-2030, προβλέπεται μεγαλύτερη χρήση τους στην οικιστική, βιομηχανική αλλά και εμπορική αγορά κατέχοντας το 74% των πωλήσεων. Το 2010, στις ΗΠΑ καταναλώθηκαν 694 TWh ηλεκτρικής ενέργειας για το φωτισμό, δηλαδή το 18% του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με την παραπάνω έρευνα, η συνολική κατανάλωση ενέργειας για φωτισμό θα μειωθεί κατά 19% έως το 2020 και κατά 46% μέχρι το 2030 (Καρυστηναίου, 2014).



Σχήμα 48 Πρόβλεψη εξοικονόμησης ενέργειας σε διάφορους τομείς μέχρι το 2030 (Καρυστηναίου, 2014).



Σχήμα 49 Προβλέψεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2030 (Καρυστηναίου, 2014)

Οι έρευνες γύρω από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των λαμπτήρων LED είναι μονόδρομος. Επιστήμονες από το Πανεπιστήμιο της Γιούτα αναπτύσσουν λαμπτήρες εξοικονόμησης ενέργειας LED από υπολείμματα φαγητού. Μέχρι στιγμής έχουν χρησιμοποιηθεί μαγιάτικο ψωμί, ψίχουλα από τортίγια και αναψυκτικά ως πρώτες ύλες για την κατασκευή «κβαντικών κουκκίδων» που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις φωτοδιόδους LED. Η χρήση υπολειμμάτων οργανικής ύλης ως πρώτη ύλη για την κατασκευή LED θα μπορούσε να μειώσει ακόμη περισσότερο το κόστος κατασκευής τους, να εκμηδενίσει το ενεργειακό τους αποτύπωμα και να αυξηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας ακόμη περισσότερο (Greenpeace, 2015).

Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ανάγκη εξισορρόπησης μεταξύ τεχνολογίας και περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από ποτέ. Η χρήση και η εξέλιξη των λαμπτήρων LED στοχεύει στην επίτευξη αυτής της ανάγκης με θετικό τρόπο. Συνεπώς, η αντικατάσταση των λαμπτήρων φθορισμού, αλογόνου και πυρακτώσεως αποτελούν μερικές από τους πιο σημαντικές ευκαιρίες για εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της εφαρμογής της τεχνολογίας LED.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τοφαρίδου Μ. (2007). Η τεχνολογία του φωτισμού και η επιρροή της στον άνθρωπο και την οικιακή κατανάλωση ενέργειας. ΑΠΘ Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών http://ikee.lib.auth.gr/record/291061/files/diplomatiki_maria_3.pdf
[Accessed 10 Sep. 2017]
- [2] Διαμαντής Ι.Α. (2003). Αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας στις εγκαταστάσεις φωτισμού σχολικών κτιρίων ΕΜΠ Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών. https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0ahUKEwj99oLMYzrWAhVPF8AKHYZXAbYQFgg6MAY&url=http%3A%2F%2Fartemis.cslab.ntua.gr%2Ffel_thesis%2Fartemis.ntua.ece%2FDT2003-0037%2FDT2003-0037.doc&usg=AFQjCNGY59CCifW5OeAEuS1ablW_8bCfyw [Accessed 10 Sep. 2017]
- [3] Loe, D., Watson, N., Rowlands, E., και Mansfield, K., (1999). Lighting Design for Schools. London: The Stationery Office [online]. Available at https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/276707/Building_Bulletin_90_lighting_design_for_schools.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [4] Jensen, A. (2016). How Office Lighting Affects Productivity [online]. Available at <http://www.andrewjensen.net/how-office-lighting-affects-productivity/> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [5] Μήτσου Γ. (2016) Τμήμα Φυσικής-Χημείας ΤΕΙ Αθήνας. <http://physics.teiath.gr/>
[Accessed 10 Sep. 2017]
- [6] Ιωαννίδης, Γ. (2016). Χαρακτηριστικά Μεγέθη Λαμπτήρων & Βασικά Φωτομετρικά Μεγέθη. Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα <http://eclass.teipir.gr/openecclass/modules/document/file.php/ELEC101/II.%20%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82%20%CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%AF%CE%BF%CF%85/1.%20%CE%A7%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC%20%CE%9C%CE%B5%CE%B3%CE%AD%CE%B8%CE>

- [E%B7%20%CE%9B%CE%B1%CE%BC%CF%80%CF%84%CE%AE%CF%81%CF%89%CE%BD%20%26%20%CE%92%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AC%20%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AC%20%CE%9C%CE%B5%CE%B3%CE%AD%CE%B8%CE%B7%20.pdf](#) [Accessed 10 Sep. 2017]
- [7] <http://physics.teiath.gr/physics/pdf/O8.pdf>
- [8] [ASW] Autodesk Sustainability Workshop (2015). Electric Light Sources [online]. Available at <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/electric-light-sources> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [9] Electric Light Sources Sustainability Workshop. (2016) <https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/electric-light-sources> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [10] Biery, E., Shearer, T., Ledyard, R., Perkins, D., και Feris, M (2014). Controlling LEDs [white paper]. Pennsylvania: Lutron Electronics [online]. http://www.lutron.com/TechnicalDocumentLibrary/367-2035_LED_white_paper.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [11] Coolweb.gr (2017) Δίοδος, Φωτοδίοδος - LED: Πως λειτουργεί; <http://coolweb.gr/fotodiodoi-diodoi-leds/> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [12] Electronic Circuits (2017) Ορισμός της διόδου-αρχή λειτουργίας <http://www.electroniccircuits.gr/diodoi.html> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [13] Ledvance.gr (2017) Βασικά στοιχεία για τα LED <https://www.ledvance.gr/proiiod-tau/nchd-oseu-toud-proiiod-toud/vausika-stouicheuiau-nchiau-tau-led/index.jsp> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [14] Hlektronika.gr (2017) Βασικές αρχές και χαρακτηριστικά των LED <http://www.hlektronika.gr/index.php?page=theory?led> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [15] Theledcompany.gr (2017) Πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά των LED <http://theledcompany.gr/led/led-fotismos-pleonektimata> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [16] Ledcosmos.gr (2017) Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των LED <http://blog.ledcosmos.gr/%CF%80%CE%BB%CE%B5%CE%BF%CE%BD%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CE%BF%CE%BD%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CF%84%CF%89%CE%BD-led/> [Accessed 10 Sep. 2017]

- [17] Electrologos.gr (2017) Τα LED στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις φωτισμού
<http://www.electrologos.gr/news/189> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [18] Illuminating Engineering Society IES Progress Committee (2013). Progress report 2013.
<http://www.ies.org/pdf/progressreport/IES%20Progress%20Report%202013.pdf>
[Accessed 10 Sep. 2017]
- [19] Cooper, D. (2011). Dimming LED Lighting. Available at
https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&act=8&ved=0ahUKEwj1NeE69fPAhXD1iwKHT9wA6YQFggiMAE&url=https%3A%2F%2Fwww.aegps.com%2Fnc%2Fen%2Ftechnology%2Fwhite-papers%2Fparallel-connected-power-converter-combinations%2F%3Fdownload%3DAEG_PS_white_paper_Led_dimming_nov2011_DC_format_.pdf%26did%3D&usg=AFQjCNHBE444KGvu3kW_z1-SDgYf8GVycw&sig2=6TkP4dmovs_JNH6bgKUPA [Accessed 10 Sep. 2017]
- [20] Μιχαλάκος Π.Σ. (2007). Τεχνοοικονομική μελέτη διόρθωσης του συντελεστή ισχύος και εξάλειψης αρμονικών. ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών.
http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2007-0061/DT2007-0061.doc [Accessed 10 Sep. 2017]
- [21] Πληθάρας Χ. (2012) Μελέτη Ποιότητας Ισχύος και ανάλυση αρμονικών. ΤΕΙ Πειραιά
http://okeanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/773/hlg_00668.pdf?sequence=1 [Accessed 10 Sep. 2017]
- [22] Seman SE. (2012). Εξοικονόμηση Ενέργειας με βελτιστοποίηση της ποιότητας τάσης- έντασης ρεύματος <http://www.seman.gr/dat/ED44223A/file.pdf> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [23] Heydt G.T. (2000). A PSERC Tutorial on Contemporary Topics in Electric Power Quality. Arizona State University
https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEWjC54v10prWAhXIKMAKHaoEB2sQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fpserc.wisc.edu%2Fdocuments%2Fgeneral_information%2Fpresentations%2Fpresentations_by_pserc_university_members%2FHEYDT_Tutorial.pdf&usg=AFQjCNHBN3EeG4nTM2gCUZOGw8ja8zRQew [Accessed 10 Sep. 2017]
- [24] ABB. (2013). Guide to harmonics with AC drives. Technical guide No. 6

- <https://www.scribd.com/document/189042452/ABB-Technical-Guide-No-6-REVD>
[Accessed 10 Sep. 2017]
- [25] PSERC EMI'. (2002). Single Phase Harmonic Limits, Power Quality, and Safety Workshop
http://preview.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/2002_general_publications/atlantaworkshoppaper.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [26] NTUA'.(2007) Προβλήματα Ποιότητας Ισχύος. Αρμονικές Αρμονική Ποιότητα Ισχύος Αρμονική παραμόρφωση ημιτονοειδών
<http://ecourses.dbnet.ntua.gr/fsr/11410/PQ-2nd.pdf> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [27] Eurostat (2017) <http://ec.europa.eu/eurostat/web/main> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [28] Δρακάκης Ε. (2011). Επιστήμη και τεχνολογία ηλεκτρικών πηγών φωτός. Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Κρήτης
<https://www.elke.teicrete.gr/LinkClick.aspx?fileticket=6qaDHiWw6ik%3D&tabid=345> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [29] Buy smart' (2012). Έξυπνες αγορές: Υψηλή ενεργειακή απόδοση, εξοικονόμηση χρημάτων και προστασία του περιβάλλοντος. Οδηγός για αποδοτικό φωτισμό. Green procurement in Europe. Intelligent Energy – Europe
<http://www.cea.org.cy/TOPICS/EnergyEfficient/2013/%CE%9F%CE%B4%CE%B7%CE%B3%CF%8C%CF%82%20Buy%20Smart+%20%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82.pdf> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [30] U.S.DOE, (2013). Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Department of Energy
https://energy.gov/sites/prod/files/2015/10/f27/2012_led_lca-pt2_0.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_LED_Lifecycle_Report.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lca_webcast_03-28-2013.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [31] Καρυστηναίου Μ.Μ. (2014). Εφαρμογές διόδων εκπομπής φωτός-Μελέτη και ανάπτυξη νέου προϊόντος. Πολυτεχνείο Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης <http://dias.library.tuc.gr/view/manf/21652> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [32] Θεοφιλίδη Μ. (2016). Τομείς εφαρμογής ενεργειακά αποδοτικών δημόσιων προμηθειών Φωτισμός – Ηλεκτρονικός εξοπλισμός γραφείου. ΚΑΠΕ Cres
<http://docplayer.gr/1629830-Tomeis-efarmogis-energeiaka-apodotikon-dimosion->

- promitheion-fotismos-ilektronikos-exoplismos-grafeioy.html [Accessed 10 Sep. 2017]
- [33] Νικολάου Δ.Π. (2013). Η εφαρμογή των LED στον φωτισμό δρόμων και οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας. ΕΜΠ. Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος.
http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2014-0038/DT2014-0038.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [34] NRDC. (2011) The Facts about Light Bulbs and Mercury
nrdc.org/energy/files/cfl.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [35] Εθνική Επιτροπή Κύπρου. (2012). Λαμπτήρες Εξοικονόμησης Ενέργειας: Μάθετε να κάνετε τις σωστές επιλογές και να αποφεύγετε τους κινδύνους.
http://www.electrocyclosis.com.cy/gr/Lamptires_Exikonomisis.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [36] Kraus L. J. (2016). CSAPH Report 2-A-16. Human and Environmental Effects of Light Emitting Diode (LED) Community Lighting <https://www.ama-assn.org/sites/default/files/media-browser/public/about-ama/councils/Council%20Reports/council-on-science-public-health/a16-csaph2.pdf> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [37] In depth: Advantages of LED Lighting. <http://energy.ltgovernors.com/in-depth-advantages-of-led-lighting.html> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [38] LED Lighting Facts. (2016). A Program of the United States Department of Energy. <http://www.lightingfacts.com> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [39] Pawson SM, Bader MK. (2014). Led lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. Ecological Applications
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/14-0468.1/full> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [40] Gaston K, Davies T, Bennie J, Hopkins J. (2012). Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: Options and developments. J Appl Ecol.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x/full> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [41] Salmon M. (2005). Protecting sea turtles from artificial night lighting at Florida's oceanic beaches. In: Rich C, Longcore T (eds.). Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. 141-68. Island Press, Washington, DC.
https://www.researchgate.net/publication/310006087_Salmon_M_2005_Protecting_sea_turtles_from_artificial_night_lighting_at_Florida's_oceanic_beaches_C_Rich_and_T_Longcore_eds_Island_Press_Washington_DC [Accessed 10 Sep. 2017]

- [42] Rusenko KW, Newman R, Mott C, et al. (2012). Using GIS to determine the effect of sky glow on nesting sea turtles over a ten year period. Jones TT, Wallace BP, compilers. Proceedings of the Thirty-first Annual Symposium on Sea Turtle Biology and Conservation. NOAA Technical Memorandum
- [43] Scigliano E. (2013). Seattle's new LED-lit streets Blinded by the lights. Crosscut. <http://crosscut.com/2013/03/streetlights-seattle-led/> [Accessed 04 Apr. 2017]
- [44] Vos JJ. 2003. On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation. Clin Exp Optom. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1444-0938.2003.tb03080.x/pdf> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [45] Evans JA, Davidson AJ. (2013). Health consequences of circadian disruption in humans and animal models. Prog Mol Biol Transl <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3047226/> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [46] Gooley JJ, Chamberlain K, Smith KA, et al. (2011). Exposure to room light before bedtime suppresses melatonin onset and shortens melatonin duration in humans. J Clin Endocrinol Metab. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21193540> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [47] Koo YS, Song JY, Joo EY, et al.(2016). Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: Cross-sectional analysis in the KoGES study. Chronobiol Int. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/07420528.2016.1143480?journalCode=icbi20> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [48] U.S. Department of Transportation. 2005. Federal Highway Administration.
- [49] Carlessi, M. O. Oliveira H. O. Ando Junior J. M. Neto, A. D. Spacek, V. L. Coelho, L. Schaeffer, H. Bordon, O. E. Perrone, A. S. Bretas F. (2013). Evaluation of Alternative Disposal and Replacement of Fluorescent Lamps. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13) Bilbao (Spain) <http://www.icrepq.com/icrepq'13/399-carlessi.pdf> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [50] Travel Foundation. (2015). The Create Center Energy Guidelines. file:///C:/Users/zeta/Desktop/9696/4/Energy_Guidelines_GREEK_TF_col.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [51] Υπέρμαχος Φ. (2015). Εξοικονόμηση ενέργειας με χρήση λαμπτήρων LED για εσωτερικό φωτισμό γραφείων. Πανεπιστήμιο Πειραιώς http://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/9232/Ypermaxos_Fotis.pdf?sequence=1 [Accessed 10 Sep. 2017]

- [52] Ecoboiler, 2013. Εξοικονόμηση ενέργειας στον φωτισμό με λαμπτήρες LED, <http://ecoboiler.gr/%CE%B5%CE%BE%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%B7%CF%83%CE%B7%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82-%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%BD%CF%86%CF%89%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C/> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [53] Silverman H. (2009). How LED Streetlights Work. HowStuffWorks.com. <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-tech/sustainable/ledstreetlight.htm> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [54] Giamello, N. (2010). LEDs for Lighting Applications: An Overview. Sharp Microelectronics. [online]. <http://studylib.net/doc/18913884/leds-for-lighting-applications--an-overview> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [55] Golkar M.A. (2011). Power Quality in Electric Networks: Monitoring, and Standards. K N Toosi University of Technology, Tehran- Iran http://www.icrepq.com/icrepq07/273_aliakbar.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [56] Energy Efficiency & Renewable Energy (2013). Energy Efficiency of LEDs [fact sheet]. US Department of Energy. Available at http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/led_energy_efficiency.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [57] Golkar M.A. (2011). Power Quality in Electric Networks: Monitoring, and Standards. K N Toosi University of Technology, Tehran- Iran http://www.icrepq.com/icrepq07/273_aliakbar.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]]
- [58] Νικολάου Δ.Π. (2013). Η εφαρμογή των LED στον φωτισμό δρόμων και οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας. ΕΜΠ. Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύς. http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2014-0038/DT2014-0038.pdf [Accessed 10 Sep. 2017]
- [59] Sohel U., Hussain S., Azah M, Ma H., (2013). Investigation of harmonic generation from dimmable LED lamps. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 4/2013 <http://www.red.pe.org.pl/articles/2013/4/33.pdf> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [60] LED Lighting Facts. (2016). A Program of the United States Department of Energy. <http://www.lightingfacts.com>. [Accessed 10 Sep. 2017]
- [61] LEDs Magazine, 2012. DOE estimates energy-saving potential of LEDs in general lighting through 2030, <http://www.ledsmagazine.com/articles/2012/01/doeestimates->

- [energy-saving-potential-of-leds-in-general-lighting-through2030.html](#) [Accessed 10 Sep. 2017]
- [62] Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences (2014) Impact of large-scale installation of LED lamps in a distribution system
<http://dergipark.gov.tr/download/article-file/126297> [Accessed 10 Sep. 2017]
- [63] Greenpeace, 2015 <http://www.econews.gr/2015/10/20/lampes-led-apo-mpagiatiko-psomi/> [Accessed 10 Sep. 2017]