



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

**Συγκριτική ανάλυση των νέων τεχνολογιών φωτισμού  
εξοικονόμησης ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΝΤΑΓΓΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Συγκριτική ανάλυση των νέων τεχνολογιών φωτισμού εξοικονόμησης ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΤΑΓΓΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Κ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ν.Ι. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Α. Δ. Πολυκράτη  
Ε.ΔΙ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014

.....  
**ΝΤΑΓΓΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

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

Copyright© Ντάγγας Σπυρίδων, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Την τελευταία πενταετία η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των συστημάτων φωτισμού LED έχουν μεταβάλει σημαντικά την αγορά λαμπτήρων και των συστημάτων φωτισμού. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των ποικίλων εμπορικά διαθέσιμων και διαδεδομένων τύπων λαμπτήρων και συστημάτων φωτισμού έπειτα και από τη διείσδυση στην αγορά των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στα βασικά μεγέθη φωτομετρίας έτσι ώστε να είναι κατανοητοί οι όροι οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στη διπλωματική εργασία. Εν συνεχεία, γίνεται περιγραφή των τύπων των λαμπτήρων οι οποίοι είναι εμπορικά διαθέσιμοι και αποτελούν οικονομικά αποδεκτές λύσεις για τους καταναλωτές. Για τους τύπους αυτούς των λαμπτήρων γίνεται περιγραφή της λειτουργίας τους, όλων των συστημάτων τα οποία είναι απαραίτητα για τη λειτουργία τους, των χαρακτηριστικών τους και των αποδόσεών τους.

Με βάση τα στοιχεία αυτά γίνεται τέλος μια σύγκριση των ποικίλων εμπορικά διαθέσιμων και διαδεδομένων τύπων λαμπτήρων και συστημάτων φωτισμού ως προς την απόδοση, τη φασματική κατανομή, τον δείκτη αναλογίας της σκοτοπικής/φωτοπικής ακτινοβολίας, τη διάρκεια ζωής, τον συντελεστή ισχύος, την ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος, το κόστος φωτισμού, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την αντοχή τους σε ακραίες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος. Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τη σύγκριση αυτή αποτελούν και τους κύριους λόγους για την επιλογή ενός συστήματος φωτισμού για τον φωτισμό ενός χώρου.

### **Λέξεις Κλειδιά:**

Λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, λαμπτήρες άνευ ηλεκτροδίων, λαμπτήρες φθορισμού, LED, μπάλλαστ, απόδοση λαμπτήρων, κόστος φωτισμού, σύγκριση λαμπτήρων

## **Abstract**

During the last five years, the quick growth of the induction lamp and the LED technology has resulted in a dramatic change of the lamp and lighting systems market. Scope of this thesis is the comparison of the various lamp types that are available for the consumers after the recent infiltration of the magnetic induction lamps in the market.

Initially, the basic concepts of photometry are explained in order to clarify the terms that will be used throughout this thesis. In addition, the lamp types which are available in the market and are regarded as economically feasible solutions for the consumer are described. This description consists of the operation procedure, the necessary systems which are required for the operation of the lamp, the technical characteristics of the lamps and the efficiency of the lamps.

The study of the literature provides the data which are used to finally compare the commercial lamp types in terms of efficiency, spectral distribution, S/P ratio, lifetime, power factor, total harmonic distortion, cost of lighting, environmental aspects and the ability to withstand extreme environmental temperatures. The results of this comparison are considered the main aspects by which a lamp or lighting system is selected to light a certain area, depending on the parameters of each situation.

### **Keywords:**

Induction lamp, fluorescent lamp, electrodeless lamp, LED, ballast, lamp efficiency, lighting cost, lamp comparison

## Πίνακας περιεχομένων

	<i>Πίνακας περιεχομένων</i> .....	7
	<i>Περιεχόμενα - Πίνακες</i> .....	9
	<i>Περιεχόμενα - Εικόνες</i> .....	10
<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>14</b>
1.1	Εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού .....	14
1.1.1	<i>Όραση και φωτισμός</i> .....	14
1.1.2	<i>Θερμοκρασία χρώματος-ποιότητα χρώματος φωτεινής πηγής</i> .....	16
1.1.3	<i>Θεμελιώδεις έννοιες τεχνολογίας φωτισμού</i> .....	20
1.1.4	<i>Συντελεστής S/P</i> .....	22
1.2	Κατηγοριοποίηση Λαμπτήρων .....	25
1.2.1	<i>Λαμπτήρες Πυρακτώσεως</i> .....	25
1.2.2	<i>Λαμπτήρες Φθορισμού</i> .....	35
1.2.3	<i>Συμπαγείς Λαμπτήρες Φθορισμού (CFL)</i> .....	59
1.2.4	<i>Λαμπτήρες Νατρίου Υψηλής και Χαμηλής Πίεσης</i> .....	66
1.2.5	<i>Λαμπτήρες Υδραργύρου Υψηλής Πίεσης</i> .....	76
1.2.6	<i>Λαμπτήρες Μεταλλικών Αλογονιδίων</i> .....	79
1.2.7	<i>Συστήματα Φωτισμού LED</i> .....	84
1.2.8	<i>Λαμπτήρες Άνευ Ηλεκτροδίων</i> .....	111
<b>2</b>	<b>Σκοπός της διπλωματικής εργασίας</b> .....	<b>136</b>
<b>3</b>	<b>Σύγκριση Συστημάτων Φωτισμού</b> .....	<b>138</b>
3.1	Απόδοση .....	138
3.2	Φασματική κατανομή .....	140
3.3	Συντελεστής S/P .....	142
3.4	Διάρκεια Ζωής.....	146
3.5	Συντελεστής Ισχύος και THD .....	150
3.6	Ανάλυση Κόστους Φωτισμού .....	153
3.7	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις .....	161
3.7.1	<i>Εξοικονόμηση ενέργειας – Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub></i> .....	161
3.7.2	<i>Χρήση Υδραργύρου</i> .....	165
3.7.3	<i>Ανακύκλωση</i> .....	167

3.8	Αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος .....	168
3.9	Συμπεράσματα.....	173
<b>4</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>176</b>



## Περιεχόμενα - Πίνακες

<i>Πίνακας 1-1: Ισχύς λαμπτήρα-θερμοκρασία νήματος</i>	29
<i>Πίνακας 1-2: Κυριότερα χαρακτηριστικά λαμπτήρων φθορισμού T5</i>	44
<i>Πίνακας 1-3: Συνέπειες ασυμβατότητας συστήματος λαμπτήρα - ballast</i>	53
<i>Πίνακας 1-4: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού</i>	64
<i>Πίνακας 1-5: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού για 12.000 ώρες</i>	65
<i>Πίνακας 1-6: Χαρακτηριστικά λειτουργίας SHP-Standby with dual arc tubes for hot restrike</i>	70
<i>Πίνακας 1-7: Χαρακτηριστικά λειτουργίας SOX-PSG</i>	75
<i>Πίνακας 1-8: Χαρακτηριστικά λειτουργίας CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector</i>	82
<i>Πίνακας 1-9: Σύγκριση απόδοσης λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητες λειτουργίας 60 kHz και 210 kHz</i>	122
<i>Πίνακας 1-10: Απόδοση λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητα λειτουργίας 250 kHz</i>	123
<i>Πίνακας 1-11: Χαρακτηριστικά λειτουργίας Philips Electrodeless QL 85W Half Coated</i>	126
<i>Πίνακας 1-12: Χαρακτηριστικά λειτουργίας Endura Electrodeless Induction Lamp</i>	128
<i>Πίνακας 1-13: Παράδειγμα μετρήσεων αποστάσεων ασφαλείας από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές για λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής 250 kHz</i>	134
<i>Πίνακας 3-1: Αποδόσεις εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων</i>	139
<i>Πίνακας 3-2: Αποδόσεις λαμπτήρων προσαρμοσμένες στη μεσοπική όραση</i>	145
<i>Πίνακας 3-3: Συντελεστές Ισχύος Τυπικών Ηλεκτρικών Συσκευών</i>	151
<i>Πίνακας 3-4: Ενεργειακή απόδοση και απόδοση φωτεινής ροής ανά τύπο συστήματος φωτισμού</i>	153
<i>Πίνακας 3-5: Κόστος φωτισμού ανά τύπο συστήματος φωτισμού</i>	154
<i>Πίνακας 3-6: Σύγκριση Ενεργειακής Απόδοσης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής</i>	156
<i>Πίνακας 3-7: Σύγκριση Ενεργειακής Απόδοσης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής για ίδια Lumen</i>	157
<i>Πίνακας 3-8: Σύγκριση Κόστους συντήρησης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής</i>	158
<i>Πίνακας 3-9: Σύγκριση συνολικού κόστους – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής</i>	160
<i>Πίνακας 3-10: Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO2</i>	164
<i>Πίνακας 3-11: Χρήση υδραργύρου εμπορικά διαθέσιμων λαμπτήρων</i>	166
<i>Πίνακας 3-12: Αποδεκτές θερμοκρασίες περιβάλλοντος για κάθε τύπο λαμπτήρα</i>	173

## Περιεχόμενα - Εικόνες

<i>Εικόνα 1-1: Η δομή του ανθρώπινου ματιού .....</i>	<i>14</i>
<i>Εικόνα 1-2: Περιοχή ορατής ακτινοβολίας .....</i>	<i>15</i>
<i>Εικόνα 1-3: Γεωμετρικός τόπος του Planck ή καμπύλη μέλανος σώματος.....</i>	<i>17</i>
<i>Εικόνα 1-4: Καμπύλες ευαισθησίας ανθρώπινης όρασης .....</i>	<i>19</i>
<i>Εικόνα 1-5: Φασματική ευαισθησία φωτοκύτταρων ανθρώπινου οφθαλμού .....</i>	<i>19</i>
<i>Εικόνα 1-6: Υπολογισμός φωτεινής έντασης .....</i>	<i>21</i>
<i>Εικόνα 1-7: Μεσοπική όραση .....</i>	<i>23</i>
<i>Εικόνα 1-8: Συναρτήσεις ευαισθησίας της ανθρώπινης όρασης .....</i>	<i>24</i>
<i>Εικόνα 1-9: Κοινοί λαμπτήρες πυρακτώσεως .....</i>	<i>25</i>
<i>Εικόνα 1-10: Λαμπτήρας πυρακτώσεως .....</i>	<i>26</i>
<i>Εικόνα 1-11: Τύποι κώδωνα λαμπτήρα πυρακτώσεως .....</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 1-12: Μορφές στηρίξεως νήματος σε λαμπτήρες πυρακτώσεως .....</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 1-13: Καμπύλες μετατόπισης του Wien .....</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 1-14: Μοντέλα λαμπτήρων πυρακτώσεως .....</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 1-15: Λαμπτήρας αλογόνου με χρήση φίλτρου υπεριώδους ακτινοβολίας .....</i>	<i>32</i>
<i>Εικόνα 1-16: Λαμπτήρες πυρακτώσεως αλογόνου .....</i>	<i>33</i>
<i>Εικόνα 1-17: Μοντέλα λαμπτήρων πυρακτώσεως αλογόνου .....</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 1-18: Μοντέλα λαμπτήρων πυρακτώσεως αλογόνου με χρήση ανακλαστήρα .....</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 1-19: Λειτουργία λαμπτήρα φθορισμού .....</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 1-20: Μεταβολή τάσης-ρεύματος για διάφορα είδη εκκενώσεων .....</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 1-21: Ballast λαμπτήρων φθορισμού .....</i>	<i>39</i>
<i>Εικόνα 1-22: Εκκινητής λαμπτήρα φθορισμού .....</i>	<i>39</i>
<i>Εικόνα 1-23: Υλοποιήσεις μη γραμμικών λαμπτήρων φθορισμού .....</i>	<i>40</i>
<i>Εικόνα 1-24: Υλοποιήσεις γραμμικών λαμπτήρων φθορισμού .....</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 1-25: Μαγνητικό ballast λαμπτήρα φθορισμού .....</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 1-26: Διάταξη λαμπτήρα φθορισμού που οδηγείται από ηλεκτρομαγνητικό ballast με εκκινητή .....</i>	<i>49</i>
<i>Εικόνα 1-27: Ηλεκτρονικό ballast λαμπτήρα φθορισμού .....</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 1-28: Βασικό κύκλωμα ηλεκτρονικού ballast .....</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 1-29: Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού με ενσωματωμένη ηλεκτρονική έναυση .....</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 1-30: Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού για σύνδεση σε εξωτερικό μαγνητικό ballast .....</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 1-31: Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού για σύνδεση σε εξωτερικό ηλεκτρονικό ballast ....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 1-32: Εικόνες λαμπτήρα CFL εξωτερικά και το αντίστοιχο εσωτερικό κύκλωμα με ενσωματωμένο ballast .....</i>	<i>61</i>

<i>Εικόνα 1-33: Φάσματα λαμπτήρων CFL, LED, πυρακτώσεως και απόκριση ανθρωπίνου οφθαλμού</i>	62
<i>Εικόνα 1-34: Παραμορφωμένο ρεύμα συμπαγούς λαμπτήρα φθορισμού</i>	63
<i>Εικόνα 1-35: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού</i>	64
<i>Εικόνα 1-36: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού για 12.000 ώρες</i>	65
<i>Εικόνα 1-37: Υλοποιήσεις συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού</i>	65
<i>Εικόνα 1-38: Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης</i>	66
<i>Εικόνα 1-39: Διάγραμμα λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης</i>	67
<i>Εικόνα 1-40: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης</i>	68
<i>Εικόνα 1-41: Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης Philips SON-T Master 600 W</i>	68
<i>Εικόνα 1-42: Φάσμα ακτινοβολίας SHP-Standby with dual arc tubes for hot restrike</i>	69
<i>Εικόνα 1-43: Υλοποιήσεις λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης</i>	71
<i>Εικόνα 1-44: Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης</i>	72
<i>Εικόνα 1-45: Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης σε λειτουργία</i>	72
<i>Εικόνα 1-46: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα νατρίου χαμηλής πίεσης</i>	73
<i>Εικόνα 1-47: Φάσμα ακτινοβολίας SOX-PSG</i>	74
<i>Εικόνα 1-48: Χρόνος ζωής SOX-PSG</i>	74
<i>Εικόνα 1-49: Υλοποιήσεις λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης</i>	75
<i>Εικόνα 1-50: Λαμπτήρας υδραργύρου υψηλής πίεσης</i>	76
<i>Εικόνα 1-51: Λαμπτήρας υδραργύρου υψηλής πίεσης 175 W</i>	77
<i>Εικόνα 1-52: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα υδραργύρου υψηλής πίεσης</i>	77
<i>Εικόνα 1-53: Υλοποιήσεις λαμπτήρων υδραργύρου υψηλής πίεσης</i>	78
<i>Εικόνα 1-54: Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων κατά τη διαδικασία της προθέρμανσης</i>	79
<i>Εικόνα 1-55: Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων</i>	80
<i>Εικόνα 1-56: Ηλεκτρονικό ballast για λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων 35W</i>	81
<i>Εικόνα 1-57: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων</i>	81
<i>Εικόνα 1-58: Φάσμα ακτινοβολίας CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector</i>	83
<i>Εικόνα 1-59: Χρόνος ζωής CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector</i>	83
<i>Εικόνα 1-60: Υλοποιήσεις λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων</i>	84
<i>Εικόνα 1-61: Αρχή λειτουργίας LED</i>	85
<i>Εικόνα 1-62: Διαφορετικές απεικονίσεις της κατασκευαστικής δομής μίας LED</i>	86
<i>Εικόνα 1-63: Διαφορετικά χρώματα και μεγέθη LED</i>	86
<i>Εικόνα 1-64: Φασματική διαφορά εκπομπής του ψυχρού λευκού με το ζεστό λευκό</i>	87
<i>Εικόνα 1-65: Φωτισμός γέφυρας με φωτιστικά Led</i>	91
<i>Εικόνα 1-66: Μεταβολή φωτεινής ροής / Θερμοκρασίας χρώματος με θερμοκρασία διεπιφάνειας</i>	92
<i>Εικόνα 1-67: Η αντοχή στην θερμοκρασία της διεπαφής για δυο διαφορετικά LED</i>	93
<i>Εικόνα 1-68: Οδήγηση LED με αντίσταση σειράς</i>	95

Εικόνα 1-69: Οδήγηση πολλαπλών LED με αντίσταση σειράς για μείωση των απωλειών .....	96
Εικόνα 1-70: Εξάρτηση τάσης και φωτεινότητας των LED από τη θερμοκρασία .....	97
Εικόνα 1-71: Εξάρτηση του χρώματος και της φωτεινότητας των LEDs από το ρεύμα οδήγησης .....	97
Εικόνα 1-72: Μικρές μεταβολές της τάσης προκαλούν μεγάλες μεταβολές στο ρεύμα του LED .....	98
Εικόνα 1-73: Γραμμικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος .....	99
Εικόνα 1-74: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου boost .....	101
Εικόνα 1-75: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου Buck .....	102
Εικόνα 1-76: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου Buck-boost .....	102
Εικόνα 1-77: Τοπολογία σειράς .....	104
Εικόνα 1-78: Τοπολογία παράλληλων σειρών .....	106
Εικόνα 1-79: Προσομοίωση διακοπής λειτουργίας ενός LED στην τοπολογία παράλληλων σειρών. .....	107
Εικόνα 1-80: Προσομοίωση ανομοιόμορφης κατανομής ρεύματος στην τοπολογία παράλληλων σειρών. ....	109
Εικόνα 1-81: Εξισορρόπηση των ρευμάτων παράλληλων κλάδων με καθρέπτη ρεύματος .....	109
Εικόνα 1-82: Προσομοίωση διακοπής λειτουργίας ενός LED στην τοπολογία πίνακα .....	110
Εικόνα 1-83: Διάταξη λαμπτήρα πλάσματος .....	112
Εικόνα 1-84: Λαμπτήρας πλάσματος .....	113
Εικόνα 1-85: Λαμπτήρας HEP .....	113
Εικόνα 1-86: Βασική αρχή λειτουργίας λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής .....	114
Εικόνα 1-87: Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα .....	115
Εικόνα 1-88: Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα .....	116
Εικόνα 1-89: Μπλοκ διάγραμμα των βασικών λειτουργιών ηλεκτρονικού συστήματος ballast λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής .....	119
Εικόνα 1-90: Ισοδύναμο κύκλωμα λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής και κυκλώματος ballast .....	120
Εικόνα 1-91: Κύκλωμα ηλεκτρονικού ballast λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής 60 kHz εναλλασσόμενου ρεύματος .....	121
Εικόνα 1-92: Κύκλωμα ηλεκτρονικού ballast λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής 60 kHz συνεχούς ρεύματος .....	121
Εικόνα 1-93: Ηλεκτρονικά ballast λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής 210 kHz και 60 kHz .....	122
Εικόνα 1-94: Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 60 kHz σε λειτουργία .....	123
Εικόνα 1-95: Κατανομή έντασης φωτεινότητας λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητα λειτουργίας 250 kHz .....	124
Εικόνα 1-96: Τυπικές φασματικές κατανομές λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής .....	124
Εικόνα 1-97: Λαμπτήρας Philips Electrodeless QL 85W Half Coated .....	127
Εικόνα 1-98: Φάσμα ακτινοβολίας Philips Electrodeless QL 85W Half Coated .....	127
Εικόνα 1-99: Χρόνος ζωής Philips Electrodeless QL 85W Half Coated .....	127
Εικόνα 1-100: Λαμπτήρας Endura Electrodeless Induction Lamp .....	129

<i>Εικόνα 1-101: Φάσμα ακτινοβολίας Endura Electrodeless Induction Lamp</i> .....	129
<i>Εικόνα 1-102: Χρόνος ζωής Endura Electrodeless Induction Lamp</i> .....	129
<i>Εικόνα 1-103: Σχέση μεταξύ της μετρούμενης έντασης φωτισμού (κάθετος άξονας) και της αντιληφθείσας έντασης φωτισμού (οριζόντιος άξονας)</i> .....	130
<i>Εικόνα 1-104: Παράδειγμα dimming λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής με έλεγχο συχνότητας</i> .....	131
<i>Εικόνα 1-105: Μπλοκ διάγραμμα ballast με δυνατότητα dimming με τη χρήση ελέγχου κύκλου λειτουργίας</i> .....	132
<i>Εικόνα 1-106: Κύκλωμα ballast λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής με δυνατότητα ελέγχου τάσης διαύλου</i> .....	132
<i>Εικόνα 1-107: Παράδειγμα dimming λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής με έλεγχο της τάσης διαύλου</i> .....	133
<i>Εικόνα 3-1: Αποδόσεις των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων</i> .....	140
<i>Εικόνα 3-2: Τυπική φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός μεσημβρινής ώρας με αίθριο καιρό</i> .....	141
<i>Εικόνα 3-3: Φασματικές κατανομές του φωτός για διάφορους τύπους λαμπτήρων</i> .....	141
<i>Εικόνα 3-4: Ο δείκτης S/P για ποικίλους τύπους λαμπτήρων</i> .....	142
<i>Εικόνα 3-5: Αποδόσεις λαμπτήρων σε VEL</i> .....	144
<i>Εικόνα 3-6: Αποδόσεις λαμπτήρων προσαρμοσμένες στη μεσοπική όραση</i> .....	145
<i>Εικόνα 3-7: Τυπική διάρκεια ζωής λαμπτήρων</i> .....	147
<i>Εικόνα 3-8: Η διατήρηση της φωτεινής ροής διαφόρων τύπων λαμπτήρων</i> .....	148
<i>Εικόνα 3-9: Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα</i> .....	162
<i>Εικόνα 3-10: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορες χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης</i> ....	162
<i>Εικόνα 3-11: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για ΗΠΑ και Καναδά</i> .....	163
<i>Εικόνα 3-12 Ηλεκτρική κατανάλωση διαφόρων τύπων λαμπτήρων</i> .....	164
<i>Εικόνα 3-13: Κατανάλωση Υδραργύρου ανά 20.000 ώρες λειτουργίας</i> .....	167
<i>Εικόνα 3-14: Επίδραση της θερμότητας στα κυκλώματα των συστημάτων φωτισμού LED</i> .....	172

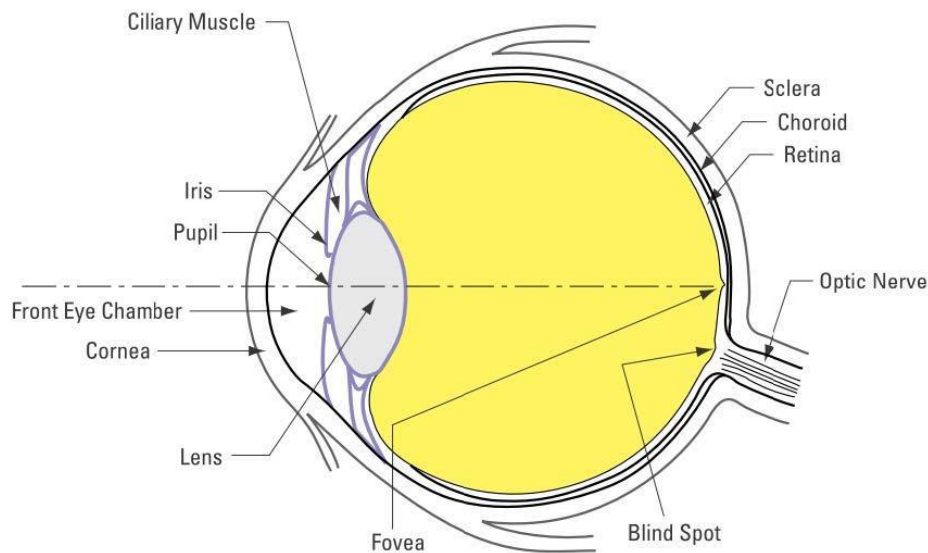
# 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή σε βασικές έννοιες φωτισμού

#### 1.1.1 Όραση και φωτισμός

Η όραση είναι μια διαδικασία η οποία αφορά την ακαριαία επικοινωνία του οφθαλμού και του εγκεφάλου μέσω ενός μεγάλου δικτύου νευρώνων και άλλων κυττάρων. Η όραση αποτελεί μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία η ακριβής λειτουργία της οποίας δεν έχει γνωστοποιηθεί ακόμα και σήμερα. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή το φως το οποίο προσπίπτει πάνω στον ανθρώπινο οφθαλμό, διέρχεται από μια σειρά οργάνων και φίλτρων πριν την κατάληξή του στον αμφιβληστροειδή.



Εικόνα 1-1: Η δομή του ανθρώπινου ματιού [1]

Στον αμφιβληστροειδή υπάρχουν δυο είδη φωτοευαίσθητων κυττάρων, τα κωνία και τα ραβδία, τα οποία, αν και έχουν παρόμοια δομή, ενεργοποιούνται σε διαφορετικές εντάσεις φωτισμού. Τα κωνία ευθύνονται για την λειτουργία της κεντρικής όρασης με

τον αριθμό τους να υπολογίζεται σε 70 εκατομμύρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη κωνίων, με το εκάστοτε είδος είναι εξειδικευμένο στην αντίληψη αποκλειστικά του μπλε, του κόκκινου και του πράσινου χρώματος.

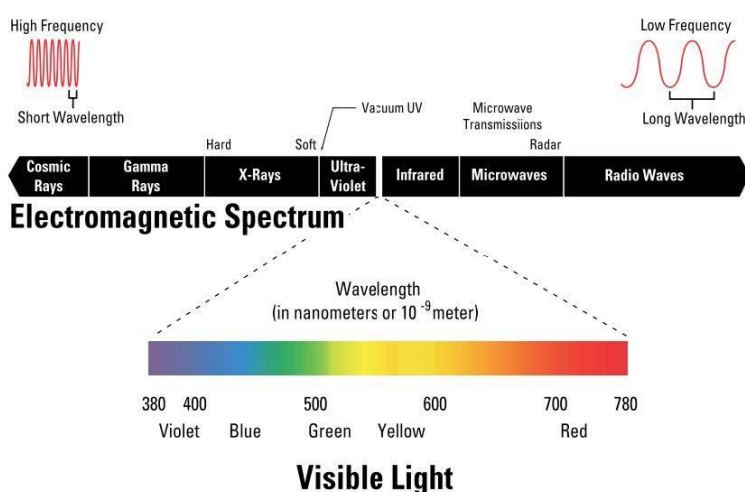
Οι χαμηλές εντάσεις φωτισμού ενεργοποιούν τα ραβδία, τα οποία δεν διαθέτουν τη δυνατότητα αναγνώρισης χρωμάτων, ευθύνονται για την λειτουργία της περιφερειακής όρασης και ο αριθμός τους ανέρχεται σε 120 εκατομμύρια.

Στον αμφιβληστροειδή πραγματοποιείται η προσαρμογή του οφθαλμού στην κατάσταση φωτισμού. Κατά τη διαδικασία αυτή, ο οφθαλμός ρυθμίζεται με βάση την μεταβαλλόμενη φωτεινότητα του περιβάλλοντος η οποία είναι δυνατόν να προκαλείται από εξωτερικούς παράγοντες όπως ένα σύστημα φωτισμού. Οι τύποι όρασης μπορούν να διαχωριστούν ως εξής: [1] [2]

- Φωτοπική. Ο τύπος όρασης αυτός αφορά την όραση κατά την οποία είναι ενεργοποιημένα τα κωνία και έχουμε πλήρη ικανότητα των χρωμάτων. Σύμφωνα με την CIE, ο τύπος όρασης αυτός εμφανίζεται για λαμπρότητες μεγαλύτερες των  $5 \text{ cd/m}^2$ .

- Μεσοπική. Ο τύπος όρασης αυτός αφορά την όραση κατά την οποία έχουμε ταυτόχρονη λειτουργία των κωνίων και των ραβδίων. Σύμφωνα με την CIE, ο τύπος όρασης αυτός εμφανίζεται για λαμπρότητες  $0.001 \text{ cd/m}^2 < L < 5 \text{ cd/m}^2$

- Σκοτοπική. Ο τύπος όρασης αυτός αφορά την όραση κατά την οποία έχουμε λειτουργία μόνο των ραβδίων και δεν έχουμε δυνατότητα αναγνώρισης χρωμάτων. Σύμφωνα με την CIE, ο τύπος όρασης αυτός εμφανίζεται για λαμπρότητες  $L < 0.001 \text{ cd/m}^2$



Εικόνα 1-2: Περιοχή ορατής ακτινοβολίας [1]

### **1.1.2 Θερμοκρασία χρώματος-ποιότητα χρώματος φωτεινής πηγής**

Το χρώμα του φωτός το οποίο εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή παρουσιάζει σημαντική επίδραση στην «ατμόσφαιρα» του χώρου τον οποίο φωτίζει. Η εντύπωση η οποία προκαλείται από έναν λαμπτήρα πυρακτώσεως στον χώρο τον οποίο φωτίζει είναι συνήθως «θερμή». Αντίθετα, η εντύπωση η οποία προκαλείται από έναν λαμπτήρα ατμών υδραργύρου μη διορθωμένου φάσματος, οποίος χρησιμοποιείται για τον φωτισμό ενός δωματίου ή ενός γραφείου είναι «ψυχρή». Η «θερμή » εντύπωση προκαλείται από το πλούσιο σε ερυθρές ακτινοβολίες φως του λαμπτήρα πυρακτώσεως ενώ η «ψυχρή» εντύπωση προκαλείται από το μεγάλο ποσοστό κυανής και κίτρινης ακτινοβολίας του φωτός το οποίο εκπέμπεται από έναν λαμπτήρα υδραργύρου. [3]

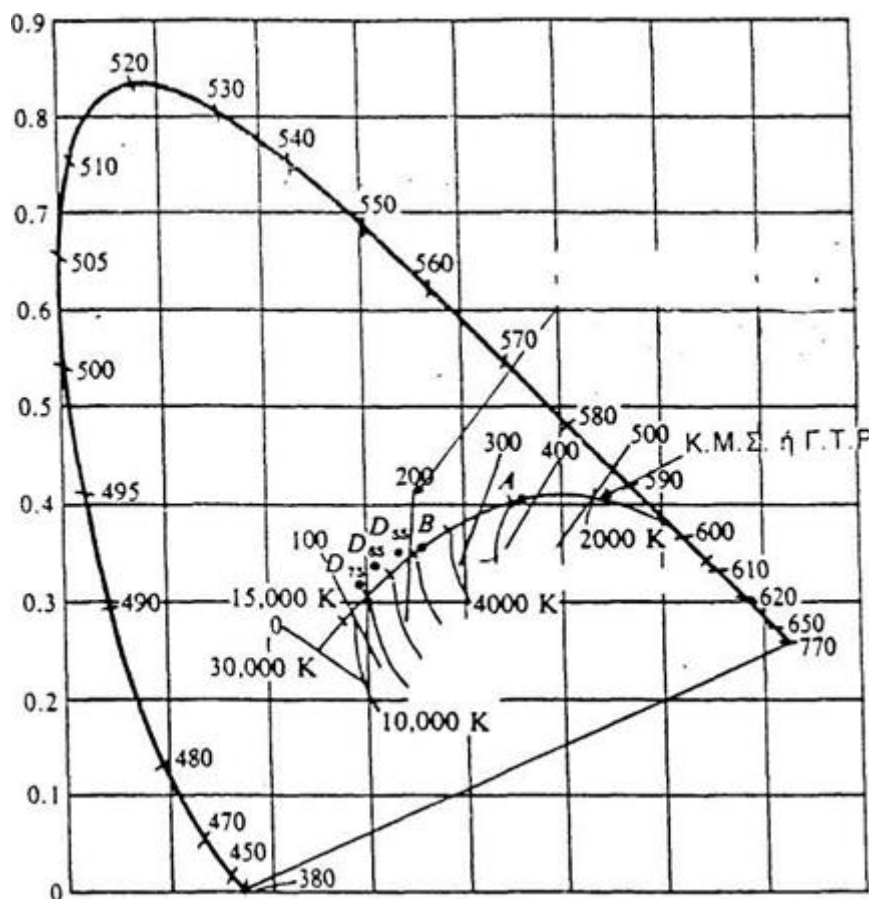
Η θερμοκρασία χρώματος αποτελεί το μέτρο περιγραφής του χρώματος και της απόχρωσης των φωτεινών πηγών. Η μέτρηση της θερμοκρασίας χρώματος γίνεται σε βαθμούς Kelvin και η θερμοκρασία χρώματος ισοδυναμεί με την θερμοκρασία στην οποία όταν βρεθεί το μέλαν σώμα του Planck, θα παράγει φως ίδιου χρώματος με την μετρούμενη φωτεινή πηγή.

Με τον όρο μέλαν σώμα ορίζεται ένα θεωρητικό μοντέλο σώματος το οποίο έχει την δυνατότητα απορρόφησης όλων των μηκών κύματος ακτινοβολίας που δέχεται, δεν ανακλά τίποτα και εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και προς όλες τις διευθύνσεις. [2]

Στο σχήμα 1-3 δίδεται σε διάγραμμα X,Y,Z η γραμμή η οποία δημιουργείται από τις χρωματικές συντεταγμένες των ακτινοβολιών εκπομπής μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες (Plankian locus). Δίδονται επίσης οι ισοθερμοκρασιακές γραμμές οι οποίες βοηθούν στον υπολογισμό της συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος. Με την βοήθεια των γραμμών αυτών είναι δυνατό να εξακριβώσουμε την αντίστοιχη συσχετισμένη θερμοκρασία για κάθε χρώμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συσχετισμένη θερμοκρασία δεν έχει νόημα της αν υπάρξει μεγάλη απομάκρυνση από τον τόπο του μέλανος σώματος .

Η αύξηση της θερμοκρασίας του μέλανος σώματος προκαλεί μεταβολή του χρώματος αυτού από ερυθρό (κόκκινο) σε λευκό και στην συνέχεια κυανό (μπλε) και η καμπύλη του μέλανος σώματος διαγράφεται από δεξιά προς τα αριστερά.





Εικόνα 1-3: Γεωμετρικός τόπος του Planck ή καμπύλη μέλανος σώματος [3]

Παρατηρείται ότι:

- Το μέλαν σώμα είναι ερυθρό πλησίον των 1000 °K
- Το μέλαν σώμα είναι κίτρινο πλησίον των 3000 °K
- Το μέλαν σώμα είναι άσπρο πλησίον των 5000 °K
- Το μέλαν σώμα είναι κυανό λευκό πλησίον των 10000 °K και
- Το μέλαν σώμα είναι απαλό μπλε πλησίον των 30000 °K.

Το αντιλαμβανόμενο χρώμα του μέλανος σώματος σε εκάστοτε από τις θερμοκρασίες αυτές είναι δυνατό να είναι τελείως διαφορετικό από το υποδεικνυόμενο χρώμα από τις χρωματικές συντεταγμένες, φαινόμενο το οποίο οφείλεται στην προσαρμογή του παρατηρητή. Κατά συνέπεια, ο ανθρώπινος οφθαλμός διαθέτει την ικανότητα να προσαρμόζεται όχι μόνον στα διάφορα επίπεδα φωτισμού, αλλά και στο χρώμα των πηγών. Επομένως το φως διάφορων αποχρώσεων πηγών είναι δυνατό να δίνει την εντύπωση λευκού χωρίς να είναι στην πραγματικότητα λευκό και λευκά αντικείμενα φαίνονται ως λευκά είτε φωτίζονται από το φως της ημέρας είτε από λαμπτήρες πυρακτώσεως είτε από το φως ενός απλού κεριού.

Το είδος του χρώματος μιας πηγής η οποία κείται στον τόπο του Planck, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με βάση τη θερμοκρασία του χρώματος, ενώ το είδος του χρώματος μιας πηγής η οποία κείται πλησίον του τόπου Planck είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με βάση τη συσχετισμένη θερμοκρασία.

Οι συσχετισμένες θερμοκρασίες χρώματος των πηγών των οποίων οι συντεταγμένες χρωματικότητας κείνται πλησίον του τόπου του Planck είναι δυνατόν να οριστούν προσεγγιστικά με τη σχεδίαση γραμμών σταθερής θερμοκρασίας χρώματος στο διάγραμμα χρωματικότητας πλησίον του τόπου του Planck. Οι γραμμές αυτές αποκαλούνται ισοθερμοκρασιακές γραμμές .

Οι φωτεινές πηγές οι οποίες παρουσιάζουν χρωματική θερμοκρασία σχεδόν 3000 °K χαρακτηρίζονται ως θερμού λευκού φωτός. Οι φωτεινές πηγές οι οποίες παρουσιάζουν χρωματική θερμοκρασία σχεδόν 6500 °K χαρακτηρίζονται ως λευκού φωτός ημέρας. Οι φωτεινές πηγές οι οποίες παρουσιάζουν χρωματική θερμοκρασία σχεδόν 4000 °K χαρακτηρίζονται ως ουδέτερες λευκές. Το φως της ημέρας προερχόμενο από την φωτοβόλο πηγή του Ήλιου παρουσιάζει χρωματική θερμοκρασία 20000° K με διαγωγή και κυανό ουρανό, η οποία μειώνεται έως 4000° K κατά την δύση του. Επομένως η θερμοκρασία χρώματος του φωτός της ημέρας δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του ήλιου και την ύπαρξη ή μη νεφώσεων στον ουρανό.

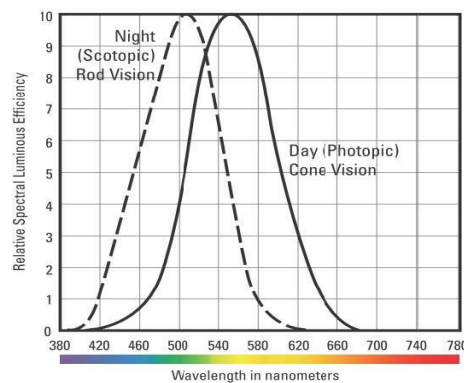
Η ποιότητα χρώματος εκφράζει την ικανότητα της φωτεινής πηγής να αναπαράγει ρεαλιστικά το χρώμα ενός αντικειμένου και εκφράζεται από τον δείκτη χρωματικής απόδοσης Ra ή CRI ο οποίος παίρνει τιμές από το 0 έως το 100. Όσο πιο χαμηλές τιμές παίρνει ο δείκτης τόσο χειρότερη είναι η αναπαράσταση των χρωμάτων από την φωτεινή πηγή. Ο δείκτης χρωματικής απόδοσης της προτύπου πηγής λαμβάνεται ίσος με 100 και το άλλο ακραίο σημείο της κλίμακας ορίζεται ίσο με 50. Το σημείο αυτό παριστά το δείκτη χρωματικής αποδόσεως του πρότυπου λαμπτήρα φθορισμού Warm white Standard Color 3 της CIE. Η κλίμακα αυτή έχει επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε μια διάφορα πέντε μονάδων να έχει ως συνέπεια οριακά αντιληπτή διαφορά στην χρωματική απόδοση. Χρωματικές διαφορές οι οποίες προκύπτουν από φωτεινές πηγές με συντελεστή  $R > 90$  δεν είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτές υπό κανονικές συνθήκες.

Η σύγκριση μεταξύ δύο πηγών με κριτήριο το δείκτη χρωματικής απόδοσης δεν είναι δυνατόν να γίνει παρά μόνο για πηγές οι οποίες έχουν την ίδια θερμοκρασία χρώματος. Επομένως ο δείκτης R έχει σχετική και όχι απόλυτη έννοια. Στο ανωτέρω συνηγορεί

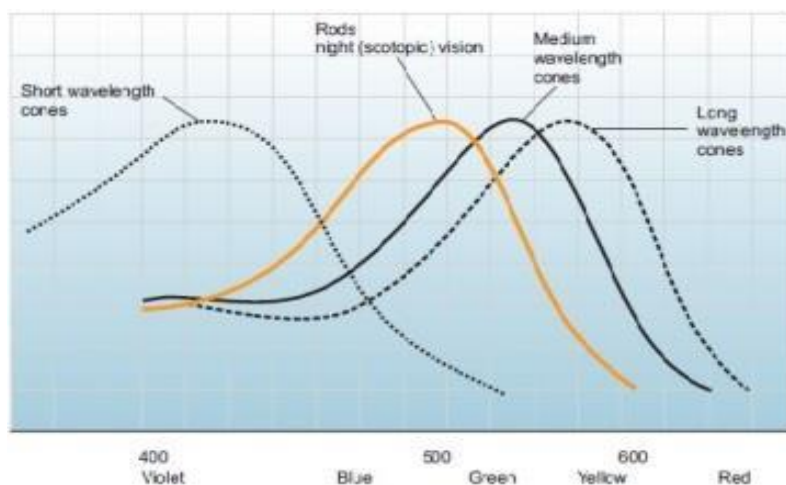
και το γεγονός ότι το μέλαν σώμα 3000° K ως πηγή αναφοράς έχει δείκτη R ίσο με 100, ενώ η ίδια τιμή αποδίδεται και στον δείκτη R πηγής αναφοράς ημέρας και θερμοκρασίας 7500° K. Είναι επίσης εμπειρικά γνωστό ότι οι προαναφερθείσες πηγές αποδίδουν τα χρώματα κατά τελείως διαφορετικό τρόπο.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο καθορισμός του δείκτη R πραγματοποιείται με τη λήψη του μέσου όρου των αποκλίσεων της απόδοσης των χρωμάτων των δειγμάτων, επομένως ο δείκτης δεν είναι δυνατό να αναφέρεται σε συγκεκριμένα χρώματα. Κατά συνέπεια, μία πηγή η οποία παρουσιάζει δείκτη χρωματικής απόδοσης  $R=85$ , ο οποίος χαρακτηρίζεται καλός, είναι δυνατό να παρουσιάζει σημαντική διαφορά από την πηγή αναφοράς στην απόδοση κάποιου χρώματος. Η μοναδική περίπτωση μια πηγή να θεωρηθεί ότι αποδίδει καλά όλα τα χρώματα είναι παρουσιάζει τιμή του δείκτη R μεγαλύτερη του 95.

Κατά συνέπεια είναι αναμενόμενο οι λαμπτήρες με δείκτη R της τάξεως του 80 να εμφανίζουν ορισμένα αδύνατα σημεία στη στην απόδοση ορισμένων χρωμάτων. [4]



Εικόνα 1-4: Καμπύλες ευαισθησίας ανθρώπινης όρασης [1]



Εικόνα 1-5: Φασματική ευαισθησία φωτοκτύπων ανθρώπινου οφθαλμού [2]

### 1.1.3 Θεμελιώδεις έννοιες τεχνολογίας φωτισμού

**Φωτεινή ροή (Luminous Flux):** Η φωτεινή ροή  $\Phi$  ορίζεται ως η φωτεινή ενέργεια την οποία εκπέμπει μια φωτεινή πηγή ανά μονάδα χρόνου και η μονάδα μέτρησης της είναι το lumen (lm). Το μέγεθος αυτό ουσιαστικά αναπαριστά την φωτεινή ενέργεια την οποία εκπέμπει ένας λαμπτήρας υπό την κανονικοποίηση της φωτοπικής συνάρτησης ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού.

Η φωτεινή ροή ορίζεται ως εξής:

Φωτοπική όραση:

$$\Phi = \kappa \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Όπου,  $\kappa = 680 \text{ lm/W}$  είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση,  $P(\lambda)$  η ισχύς ακτινοβολίας σε Watt και  $V(\lambda)$  η φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση.

Σκοτοπική όραση:

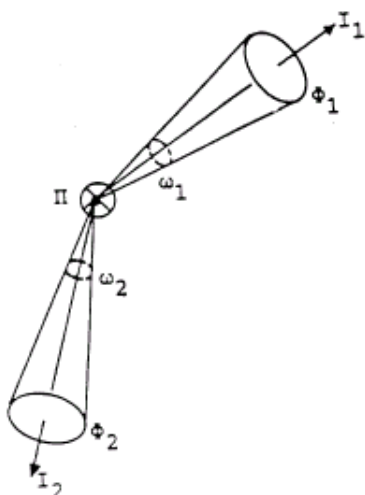
$$\Phi' = \kappa' \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda$$

Όπου,  $\kappa' = 1700 \text{ lm/W}$  είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία για την σκοτοπική όραση,  $P(\lambda)$  η ισχύς ακτινοβολίας σε Watt και  $V'(\lambda)$  η φασματική ευαισθησία για την σκοτοπική όραση.

**Φωτεινή ένταση (luminous intensity):** Η φωτεινή ένταση είναι ένα διανυσματικό μέγεθος. Η εισαγωγή του μεγέθους αυτού καλύπτει την ανάγκη καθορισμού του ποσού της φωτεινής ροής  $\Phi$  την οποία εκπέμπει μια φωτεινή πηγή προς κάθε συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η φωτεινή ένταση  $I$  ορίζεται ως ο λόγος της στοιχειώδους φωτεινής ροής  $d\Phi$  την οποία εκπέμπει μία φωτεινή πηγή μέσα σε μία στοιχειώδη στερεά γωνία  $d\omega$  προς τη γωνία αυτή:

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

Η μονάδα μέτρησης της φωτεινής εντάσεως ονομάζεται Candela (Cd), λαμβάνεται όταν μέσα σε στερεά γωνία 1 Sr ακτινοβολεί φωτεινή ισχύς 1 lm και συνοδεύεται και από την κατεύθυνση παρατηρήσεως. Είναι εμφανές ότι η φωτεινή Ένταση  $I$  και η φωτεινή ροή  $\Phi$  έχουν τις ίδιες διαστάσεις, καθώς το Sr είναι μονάδα χωρίς διαστάσεις.



Εικόνα 1-6: Υπολογισμός φωτεινής έντασης [5]

**Ένταση φωτισμού επιφάνειας E (illuminance):** Η ένταση φωτισμού μιας επιφάνειας ορίζεται ως η φωτεινή ροή η οποία προσπίπτει ανά μονάδα επιφάνειας. Αν θεωρηθεί μια στοιχειώδης επιφάνεια  $dS$  ενός αντικειμένου στην οποία πέφτει κάθετα στοιχειώδης ποσότητα φωτεινής ροής  $d\Phi$ , ορίζεται ως ένταση φωτισμού ο λόγος:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Ο φωτισμός  $E$  δίδεται με την μονάδα lux :

$$lx = \frac{lm}{m^2}$$

Οι εμπορικά διαθέσιμοι λαμπτήρες δεν εκπέμπουν ομοιόμορφη φωτεινή ροή. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται η προσεγγιστική σχέση :

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Με  $\Phi$  σταθερό σε κάθε στοιχειώδες τμήμα, η σχέση αυτή παρέχει την μέση ένταση φωτισμού σε οποιοδήποτε επιφάνεια  $S$  η οποία φωτίζεται ομοιόμορφα.

**Λαμπρότητα (luminance):** Η λαμπρότητα ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής έντασης  $I$  στην κατεύθυνση του παρατηρητή προς το εμβαδόν της προβαλλόμενης επιφάνειας της πηγής την οποία βλέπει ο παρατηρητής και έχει μονάδα μέτρησης  $cd/m^2$ .

$$L = \frac{I}{S}$$

Η λαμπρότητα είναι το μοναδικό βασικό φωτομετρικό μέγεθος το οποίο γίνεται αντιληπτό από τον ανθρώπινο οφθαλμό, χαρακτηρίζει την φωτεινότητα της

επιφάνειας και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάκλαση της. Από τον ορισμό της λαμπρότητας γίνεται αντιληπτό πως πρόκειται για διανυσματικό μέγεθος και μεταβάλλεται ανάλογα με την θέση του παρατηρητή.

**Φωτεινή απόδοση φωτεινής πηγής ( luminous efficiency):** Οι φωτεινές πηγές οι οποίες κάνουν χρήση ηλεκτρικού ρεύματος, όπως οι λαμπτήρες, καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε ακτινοβολία, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας είναι φωτεινή. Ο καθορισμός της απόδοσης του λαμπτήρα επιτυγχάνεται με τη γνώση της φωτεινής ισχύος. Η απόδοση ενός φωτιστικού σημείου ή σώματος έχει ως μονάδα μέτρησης lm/W και εκφράζει το ποσό της αποδιδόμενης φωτεινής ισχύος ή ροής για κάθε Watt καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

$$n = \frac{\Phi}{P_{\eta\lambda}}$$

όπου  $\Phi$  η φωτεινή Ροή λαμπτήρα και

$P_{\eta\lambda}$  η καταναλισκόμενη από τον λαμπτήρα ηλεκτρική ισχύ [5]

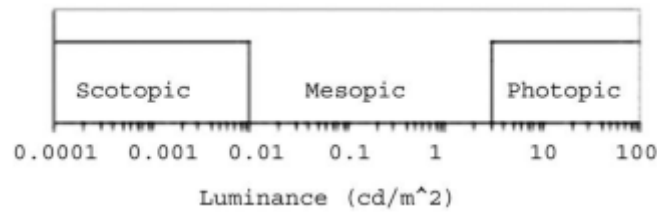
#### **1.1.4 Συντελεστής S/P**

Ο ανθρώπινος οφθαλμός έχει τη δυνατότητα αντίληψης ενός περιορισμένου φάσματος από την ακτινοβολία την οποία δέχεται, το οποίο αποκαλείται ορατό φάσμα ακτινοβολίας. Επίσης, ο ανθρώπινος οφθαλμός, ακόμα και εντός του φάσματος λειτουργίας του, δεν είναι το ίδιο ευαίσθητος σε όλα τα μήκη κύματος. Η σχετική συνάρτηση φασματικής ευαισθησίας περιγράφει την ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού στα διάφορα μήκη κύματος ακτινοβολίας.

Το 1924 η διεθνής επιτροπή φωτισμού CIE εισήγαγε την έννοια της συνάρτησης φασματικής απόδοσης φωτοπικής όρασης ( $V(\lambda)$ ), η οποία βασίζεται στην ευαισθησία των κωνίων. Η φωτοπική ευαισθησία  $V(\lambda)$  έχει εύρος από 360 μέχρι τα 830nm, και έχει κανονικοποιηθεί στην μονάδα στα 555nm. Η συνάρτηση σκοτοπικής ευαισθησίας  $V'(\lambda)$ , έχει ως βάση τη λειτουργία των ραβδίων του οφθαλμού, εισήχθη το 1951 από την CIE και εμφανίζει την μέγιστη τιμή της στα 507nm.

Η μεσοπική όραση αφορά τα επίπεδα φωτισμού μεταξύ της φωτοπικής και της σκοτοπικής όρασης. Κατά την λειτουργία της μεσοπικής όρασης, βρίσκονται σε λειτουργία τόσο τα κωνία όσο και τα ραβδία. Η συνάρτηση μεσοπικής ευαισθησίας, δεν παίρνει συνεχείς τιμές στο ορατό φάσμα, αλλά εξαρτάται από το επίπεδο φωτισμού και από την γωνία θέασης. Αυτό οφείλεται στην κατανομή των

φωτοανιχνευτών στον αμφιβληστροειδή του οφθαλμού.



Εικόνα 1-7: Μεσοπική όραση [2]

Η συνάρτηση μεσοπικής ευαισθησίας  $V_{mes}(\lambda)$  η οποία ορίστηκε από τη διεθνή επιτροπή φωτισμού (CIE) το 2010, αποτελεί το γραμμικό συνδυασμό της φωτοπικής και της σκοτοπικής συνάρτησης ευαισθησίας. Τα όρια λειτουργίας της μεσοπικής όρασης βασίζονται στο επίπεδο λαμπρότητας και είναι :

$$0.005 \text{ cd/m}^2 < L < 5 \text{ cd/m}^2$$

Το μεσοπικό σύστημα είναι της μορφής:

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda)$$

όπου  $M(m)$  είναι συνάρτηση κανονικοποίησης τέτοια ώστε η  $V_{mes}(\lambda)$  να παίρνει μέγιστη τιμή το 1, και το  $m$  συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από την λαμπρότητα και το φάσμα ακτινοβολίας, με  $0 \leq m \leq 1$ .

Ο συντελεστής  $m$  και η μεσοπική λαμπρότητα  $L_{mes}$  μπορούν να υπολογιστούν από το παρακάτω επαναληπτικό σύστημα:

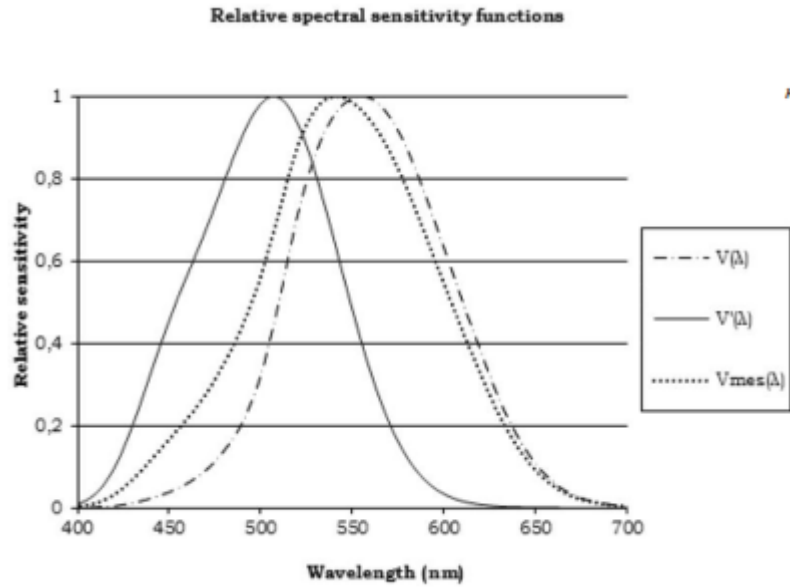
$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_p + (1 - m_{(n-1)})L_s V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)})V'(\lambda_0)}$$

$$m_n = a + b \cdot \log(L_{mes,n}) \text{ με } 0 < m_n < 1$$

όπου  $L_p$  είναι η φωτοπική λαμπρότητα και  $L_s$  η σκοτοπική λαμπρότητα. Επίσης, η σταθερά  $V'(\lambda_0)$  έχει τιμή  $V'(\lambda_0) = 683/1699$ , όπου είναι η τιμή στην οποία  $V(\lambda) = 1$ . Οι παράμετροι  $a, b$  έχουν τιμές 0,7670 και 0,3334 αντίστοιχα.

Για τον απλούστερο υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας απαιτείται η αντίστοιχη φωτοπική λαμπρότητα και ο δείκτης S/P της φωτεινής πηγής που χρησιμοποιείται.

Οι τρεις συναρτήσεις ευαισθησίας της ανθρώπινης όρασης παρουσιάζονται στο σχήμα 1-8. Οι συναρτήσεις αυτές προκύπτουν για δοσμένες τιμές της φωτοπικής λαμπρότητας και για δοσμένη φωτεινή πηγή.



Εικόνα 1-8: Συναρτήσεις ευαισθησίας της ανθρώπινης όρασης [2]

Ο δείκτης αναλογίας της σκοτοπικής/φωτοπικής ακτινοβολίας μιας φωτεινής πηγής, ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής μιας πηγής φωτός ως προς την φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας  $V(\lambda)$ , προς την φωτεινή ροή ως προς την σκοτοπική συνάρτηση ευαισθησίας  $V'(\lambda)$ . Φωτεινές πηγές με μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας τους στα χαμηλά μήκη κύματος θα έχουν μεγαλύτερους δείκτες S/P. Συγκεκριμένα ο δείκτης S/P ορίζεται ως:

$$R_{sp} \text{ ή } S/P = \frac{\Phi_s}{\Phi_p} = \frac{K'_m \int_0^\infty P_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^\infty P_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}$$

όπου  $K_m=683 \text{ lm/W}$ ,  $K'_m= 1699 \text{ lm/W}$  και  $P_{e,\lambda}$  η ισχύς (W) που εκπέμπει η φωτεινή πηγή σε συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda$ . [6] [2] [7]



## 1.2 Κατηγοριοποίηση Λαμπτήρων

### 1.2.1 Λαμπτήρες Πυρακτώσεως

#### 1.2.1.1 Συμβατικοί Λαμπτήρες Πυρακτώσεως

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο τύπο λαμπτήρα και χρησιμοποιούνται σήμερα σε ποικίλες εφαρμογές γενικού φωτισμού από οικιακούς και εμπορικούς καταναλωτές. Ο λαμπτήρας πυρακτώσεως ανακαλύφθηκε ταυτόχρονα από τον Thomas Edison στις ΗΠΑ και από τον Sir Joseph Swan στην Αγγλία το 1879. Ο λαμπτήρας πυρακτώσεως τον οποίο κατασκεύασε ο Edison αποτελούνταν από νήμα μπαμπού το οποίο βρισκόταν μέσα σε γυάλινο κώδωνα. Έως πρόσφατα, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως κατείχαν μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη λαμπτήρων παρά το γεγονός ότι χαρακτηρίζονται από τη χειρότερη απόδοση κατά την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ορατό φως. Μάλιστα η μείωση του μεριδίου αγοράς των λαμπτήρων πυρακτώσεως εν τέλει επετεύχθει με πολιτική παρέμβαση καθώς σε πλήθος περιπτώσεως απαγορεύτηκε η χρήση των συμβατικών λαμπτήρων πυρακτώσεως με απώτερο σκοπό τη μείωση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης και τη μετάβαση σε φωτιστικά συστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη απόδοση. [8] Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως δεν απαιτούν βοηθητικές διατάξεις για τη λειτουργία τους αλλά συνδέονται απευθείας στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

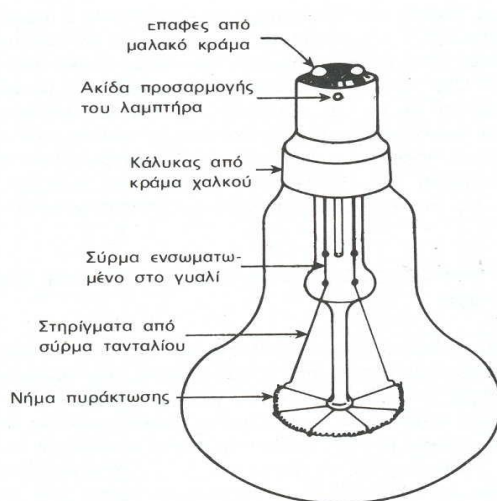


Εικόνα 1-9: Κοινοί λαμπτήρες πυρακτώσεως [9]

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως αποτελούνται από ένα γυάλινο κώδωνα στο εσωτερικού του οποίου είναι τοποθετημένο ένα νήμα πυρακτώσεως το οποίο τίθεται υπό τάση. Στους περισσότερους λαμπτήρες το νήμα αυτό αποτελείται από ένα συρματίδιο βολφραμίου. Το βολφράμιο είναι ένα υλικό με αρκετά μεγάλη αντίσταση και έχει την ιδιότητα να είναι ιδιαίτερα δύστηκτο με σημείο τήξης της τάξης των 3400°C. Για την

στήριξη του νήματος πυρακτώσεως στο εσωτερικό του κώδωνα χρησιμοποιούνται δύο μεταλλικά στηρίγματα από μολυβδαίνιο τα οποία καταλήγουν σε μια γυάλινη βάση και εν συνεχεία στον κάλυκα του λαμπτήρα.

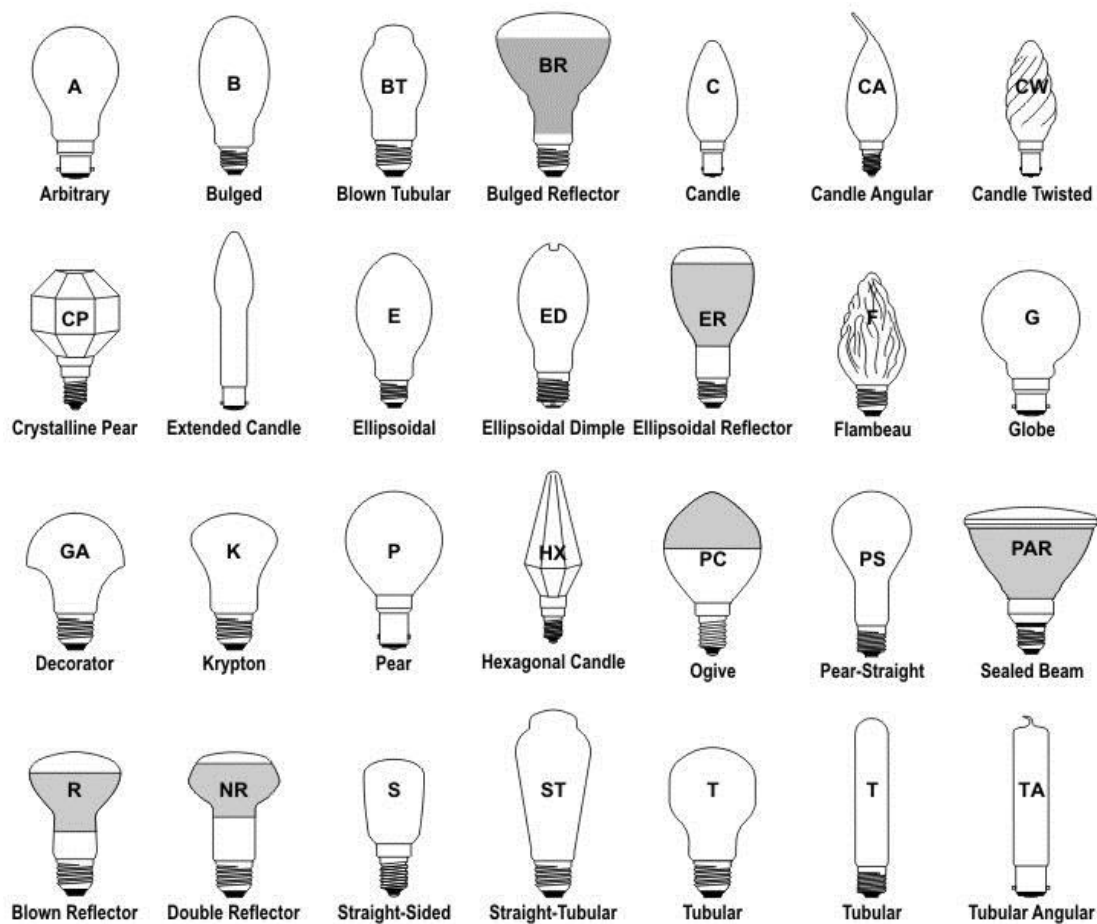
Αρχικά, προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση του νήματος βολφραμίου απομακρύνθηκε από το εσωτερικό του κώδωνα ο αέρας και ο λαμπτήρας λειτουργούσε εν κενώ. Εν συνεχεία ο κώδωνας συμπληρώθηκε με αδρανή αέρια και κυρίως μίγμα αζώτου με αργό ή μίγμα αζώτου με κρυπτό. Ορισμένοι λαμπτήρες πυρακτώσεως ειδικής χρήσης περιέχουν επίσης και άλλα αέρια όπως ιώδιο και φθόριο. [9]



*Εικόνα 1-10: Λαμπτήρας πυρακτώσεως [9]*

Οι κάλυκες των λαμπτήρων πυρακτώσεως συναντώνται συνήθως σε δύο μορφές στους βιδωτούς και στους bayonet. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των πιθανών τύπων των καλύκων των λαμπτήρων πυρακτώσεως, έχει υιοθετηθεί ένα σύστημα ονοματολογίας το οποίο αναπτύχθηκε από τον οργανισμό International Electrotechnical Commission. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό το πρώτο μέρος του ονόματος καθορίζει τον τύπο του κάλυκα (B για bayonet και E για βιδωτό), το δεύτερο μέρος του ονόματος την διάμετρό του σε mm και το τρίτο μέρος τον αριθμό των ακίδων προσαρμογής. [8]

Ο κώδωνας του λαμπτήρα πυρακτώσεως είναι δυνατό να έχει διάφορα σχήματα και μεγέθη. Η ποικιλία αυτή καθώς και το όνομα του εκάστοτε κώδωνα δίδεται στο παρακάτω σχήμα.

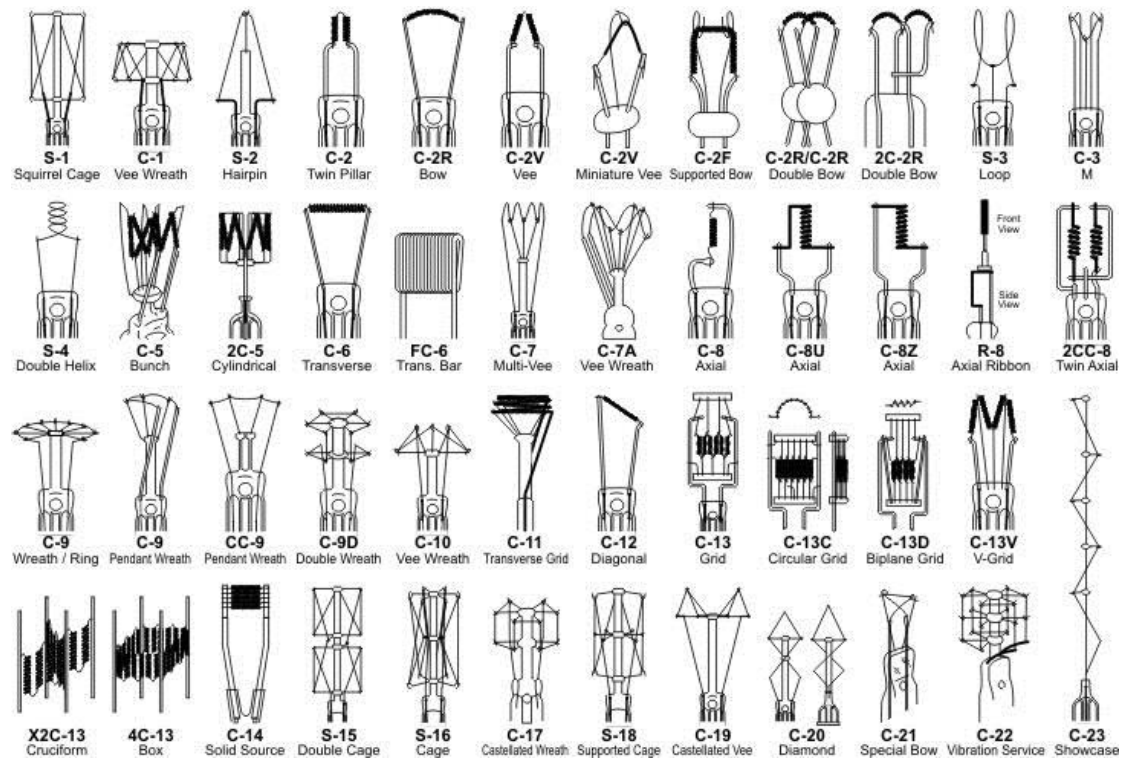


Εικόνα 1-11: Τύποι κώδωνα λαμπτήρα πυρακτώσεως [8]

Όσον αφορά το σχήμα και τη δομή του νήματος πυρακτώσεως παρατηρείται επίσης μεγάλη ποικιλία προτύπων τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί με την πάροδο των ετών. Για το διαχωρισμό τους, αν και δεν έχουν καθιερωθεί διεθνή πρότυπα, χρησιμοποιείται το σύστημα ονοματολογίας το οποίο δημιουργήθηκε από την General Electric το 1910 και σύμφωνα με το οποίο το πρώτο μέρος του ονόματος αντικατοπτρίζει τον τύπο του νήματος το οποίο χρησιμοποιείται και το δεύτερο μέρος σχήμα το οποίο χρησιμοποιείται για τη στήριξη του νήματος. Οι ποικίλοι τύποι νήματος και στηρίξεως του νήματος οι οποίοι χρησιμοποιούνται, παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα. [8]

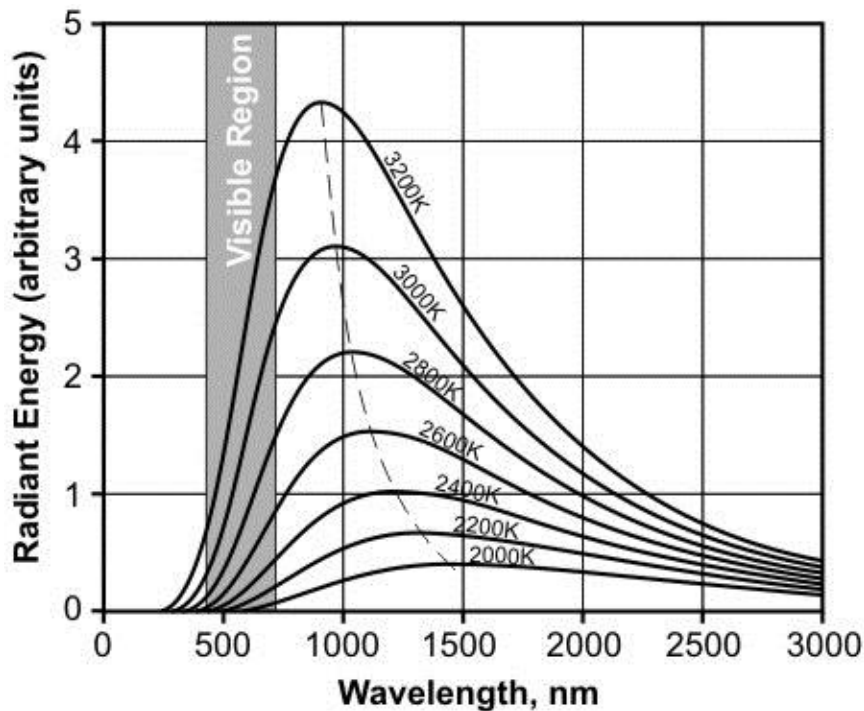
Οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες πυρακτώσεως στηρίζουν τη λειτουργία τους στην θέρμανση του νήματος πυρακτώσεως μέχρι λευκοπυρώσεως και την εκπομπή μέρους της ενέργειας η οποία παράγεται σε μορφή φωτεινής ενέργειας. Κατά την διαρροή του νήματος του λαμπτήρα, αντίστασης  $R$ , από ηλεκτρικό ρεύμα εντάσεως  $I$  παράγεται σύμφωνα με το φαινόμενο Joule θερμότητα με ένα μέρος της θερμότητας αυτής να

μετατρέπεται σε φωτεινή ενέργεια. Η υπόλοιπη ενέργεια διαχέεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Η ισχύς της ακτινοβολίας ορατού φάσματος η οποία εκπέμπεται από το λαμπτήρα πυρακτώσεως είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του νήματος. Επομένως, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του νήματος, τόσο υψηλότερη καθίσταται η απόδοση του λαμπτήρα πυρακτώσεως σε φωτεινή ροή. Το νήμα θα αρχίσει να παράγει ισχύ φωτισμό στη θερμοκρασία των 500 °C αλλά για την παραγωγή χρήσιμης ποσότητας φωτός είναι απαραίτητο το νήμα να θερμανθεί σε θερμοκρασίες πέραν των 2500 °C. Η θερμοκρασία λειτουργίας του νήματος εξαρτάται από την ισχύ η οποία θα παρασχεθεί στο νήμα και η οποία εξαρτάται από την τάση στα άκρα του νήματος και από την αντίσταση του νήματος. [9] [8]



Εικόνα 1-12: Μορφές στηρίξεως νήματος σε λαμπτήρες πυρακτώσεως [8]

Άλλωστε, με βάση το νόμο μετατόπισης του Wien, ο οποίος αποδίδει τη φασματική κατανομή της ενέργειας η οποία προέρχεται από τις διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας των νημάτων πυρακτώσεως, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του νήματος, τόσο περισσότερη ενέργεια ακτινοβολεί.



Εικόνα 1-13: Καμπύλες μετατόπισης του Wien [8]

Η φωτεινή ροή ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως καθώς και ο χρόνος ζωής του επηρεάζονται από τη θερμοκρασία του νήματος. Αν και όπως προαναφέρθηκε το μέταλλο από το οποίο είναι κατασκευασμένο το νήμα, είναι αρκετά δύστηκτο η εξάχνωση των ατόμων του αρχίζει από αρκετά χαμηλή θερμοκρασία. Από το φαινόμενο αυτό εξαρτάται η διάρκεια ζωής του λαμπτήρα πυρακτώσεως, καθώς με τη συνεχή εξάχνωση των ατόμων του βολφραμίου η διατομή του νήματος σταδιακά μειώνεται. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως συνηθισμένης χρήσεως έχουν χρόνο ζωής περίπου 1000 ώρες για μια θερμοκρασία νήματος τεχνικοοικονομικά αποδεκτή.

Η αύξηση της τάσεως λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εντάσεως του ρεύματος και με βάση το νόμο του joule την αύξηση της θερμοκρασίας του νήματος με αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερη φωτεινή ροή αλλά ταυτόχρονα μείωση του χρόνου ζωής. Άρα είναι ιδιαίτερα δυσμενής η επίδραση των τυχαίων υπερτάσεων του δικτύου στο χρόνο ζωής των λαμπτήρων πυρακτώσεως.

Ισχύς λαμπτήρα	W	40	60	75	100	150	200	300	500	1000
θερμοκρασία νήματος	°K	2700	2750	2750	2800	2830	2850	2860	2900	2950

Πίνακας 1-1: Ισχύς λαμπτήρα-θερμοκρασία νήματος [10]

Παρά τις προσπάθειες και βελτιώσεις οι οποίες έχουν γίνει μέχρι σήμερα στη κατασκευή των λαμπτήρων πυρακτώσεως, το ποσοστό της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μετατρέπεται σε ωφέλιμη φωτεινή ενέργεια (ακτινοβολία ορατού φάσματος) δεν ξεπερνά το 10-12% και η φωτιστική απόδοση των λαμπτήρων αυτών είναι περίπου 12 με 14 Lm/W. Αν υπήρχε νήμα λαμπτήρος (αντίσταση) η οποία θα μετέτρεπε όλη τη παρεχόμενη σε αυτή ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή ακτινοβολία μήκους κύματος 5550 Å (μεγίστη ευαισθησία Οφθαλμού) τότε θα είχαμε σε αυτό το λαμπτήρα απόδοση 680 Lm/W.

Η φωτεινή απόδοση των λαμπτήρων πυρακτώσεως μπορεί να βελτιωθεί με την εισαγωγή αδρανών αερίων στον κώδωνα του λαμπτήρα πυρακτώσεως. Η πίεση την οποία ασκούν τα μόρια των αδρανών αερίων παρεμποδίζει την περαιτέρω εξάχνωση των ατόμων του βολφραμίου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να αυξηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας του νήματος πυρακτώσεως και συνεπώς να αυξηθεί η παραγόμενη φωτεινή ροή από τον λαμπτήρα με απόδοση η οποία φτάνει τα 15 με 20 lumen ανά Watt. [8] [9] [10] [11]

## General Lighting Lamps

	<b>Lane-Fox 20CP</b> Lane-Fox Carbon Lamp with Mercury Seals 1882		<b>Maxim</b> Maxim Carbon Lamp of suspected British Origin c.1883-90		<b>Edison 16CP</b> Bamboo Filament with Copper Clamps 1884-1886
	<b>Edison 16CP</b> New Type with Cellulose Filament 1893-1899		<b>Novak 16CP</b> Bromine-Filled Carbon Filament Lamp 1893-1894		<b>Robertson 8CP</b> 2 <sup>nd</sup> Generation of Vitrite Cap with Brass Ring 1901-1902

## Decorative Lamps

	<b>Ediswan 16CP</b> Fancy Lamps Series - Natural Coloured Glass c.1890		<b>Ediswan 16CP</b> Fancy Lamps Series - Opal Striped Glass c.1890		<b>Ediswan 16CP</b> Fancy Lamps Series - Iced Glass c.1890
	<b>Gabriel &amp; Angenault 16CP</b> Fancy Lamps Series - Dimpled Brown Glass c.1900				

## Blown Reflector

	<b>GE</b> <b>1000W</b> High Wattage lamp with Compound Reflector c. 1955		<b>Sylvania</b> <b>75W</b> Ellipsoidal Reflector for European market c. 1985		<b>GE</b> <b>45W</b> Miser BR30 Improved Double Reflector 1994
	<b>Philips</b> <b>40W</b> Spotline NR60 Improved Double Reflector 1989		<b>Atlas</b> <b>50W</b> Low Voltage Display - Parabolic Diffuse 1972		<b>GE</b> <b>250W</b> Hardglass Ruby Infrared Reflector 1949

## Sealed Beam

	<b>GE</b> <b>30W</b> PAR36 Auto / Pin Spot with anti glare shield 1951		<b>GE-Mazda</b> <b>150W</b> PAR38 - First model for general display lighting 1942		<b>Thorn</b> <b>200W</b> Unusual PAR46 design with E27 Cap 1974
---	--	---	---	---	---

## Crown Mirror

	<b>Philips</b> <b>150W</b> Crown Silver with Inside Frosted Glass 1990
---	--

## Side Mirror

	<b>Mazda</b> <b>150W</b> Rectalux for Street Lighting Service c. 1960
---	---

Εικόνα 1-14: Μοντέλα λαμπτήρων πυρακτώσεως [8]

### 1.2.1.2 Λαμπτήρες Αλογόνου

Η φωτεινή απόδοση των λαμπτήρων πυρακτώσεως αλλά και ο χρόνος ζωής του είναι δυνατό να βελτιωθεί με την πλήρωση του κώδωνα με αλογόνο, συνήθως ιώδιο. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι διαθέτουν αλογόνο στον κώδωνά τους είναι ευρέως γνωστοί ως λαμπτήρες αλογόνου. [8]

Η χρήση ιωδίου για την πλήρωση του κώδωνα λαμπτήρων πυρακτώσεως προτάθηκε για πρώτη φορά το 1933 και εν συνεχεία το 1959 η General Electric υπέβαλε πατέντα για την κατασκευή λαμπτήρα ο οποίος έκανε χρήση ιωδίου. Κατά τη λειτουργία των λαμπτήρων αλογόνου, τα άτομα του μετάλλου τα οποία εξαχνώνονται από το νήμα αντιδρούν με το αλογόνο σχηματίζοντας μια χημική ένωση το αλογονούχο βολφράμιο το οποίο σε υψηλή θερμοκρασία είναι ασταθές. Όταν το αλογονούχο βολφράμιο έρθει σε επαφή με το πυρακτωμένο νήμα διασπάται και ξαναδίνει μεταλλικό βολφράμιο το οποίο επικάθεται και αναγεννά το συρματίδιο επιμηκώνοντας το χρόνο ζωής του. Οι λαμπτήρες αλογόνου επιτρέπουν την ανάπτυξη

στο νήμα μεγαλύτερων θερμοκρασιών και κατά συνέπεια παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση και αυξημένη διάρκεια ζωής, η οποία είναι περίπου 2000 ώρες, δηλαδή διπλάσια από τη διάρκεια ζωής των κοινών λαμπτήρων πυρακτώσεως. [8] [11]

Οι λαμπτήρες αλογόνου κατασκευάζονται από χαλαζία ή γυαλί το οποίο έχει σημείο τήξης υψηλής θερμοκρασίας λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Η χρήση χαλαζία, ο οποίος έχει αυξημένη αντοχή, επιτρέπει την αύξηση της πίεσης του αερίου που γεμίζει τον κώδωνα με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας του λαμπτήρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς να μειώνεται ο χρόνος ζωής του. Τα νήματα τα οποία αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα να παράγεται υπεριώδης ακτινοβολία με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η χρήση προσμίξεων στο χαλαζία έτσι ώστε να απορροφάται η επιβλαβής υπεριώδης ακτινοβολία.



*Εικόνα 1-15: Λαμπτήρας αλογόνου με χρήση φίλτρου υπεριώδους ακτινοβολίας [11]*

Το βολφράμιο το οποίο απελευθερώνεται από τα σημεία στα οποία αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες δεν επικάθεται στα ίδια σημεία με συνέπεια τα σημεία



στα οποία αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες να καταλήγουν λεπτότερα και τελικώς να υπόκεινται βλάβη.

Οι λαμπτήρες αλογόνου είναι δυνατό να διαχωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες:

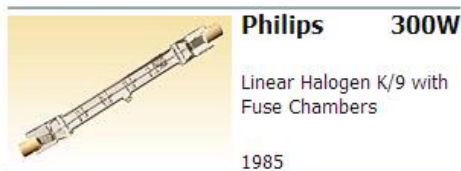
- Λαμπτήρες αλογόνου τάσης δικτύου
- Λαμπτήρες αλογόνου χαμηλής τάσης

Οι λαμπτήρες αλογόνου τάσης δικτύου χρησιμοποιούνται σαν λαμπτήρες προβολέων σε εφαρμογές κυρίως εξωτερικού φωτισμού όπως επί παραδείγματι σε φωτισμό ασφαλείας, σε εξωτερικό φωτισμό κτιρίων και σε φωτισμό αθλητικών χώρων. Ο λαμπτήρας αυτός αποτελείται από νήμα χαλαζίου και περιέχει αδρανές αέριο και μικρή ποσότητα αλογόνου στοιχείου κυρίως ιωδίου. Οι λαμπτήρες αλογόνου τάσης δικτύου έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ότι οι κοινοί λαμπτήρες πυρακτώσεως και εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη απόδοση φωτεινής ροής.

Οι λαμπτήρες αλογόνου χαμηλής τάσης έχουν τάση τροφοδοσίας 6 , 12 και 24 V και είναι απαραίτητη η συμβολή μετασχηματιστή για την εγκατάστασή τους στο δίκτυο. Είναι λαμπτήρες πυρακτώσεως συμπληρωμένοι με αλογόνο και παρουσιάζουν υψηλή φωτεινή απόδοση της τάξεως των 20 lumen / W. Οι λαμπτήρες αυτής της κατηγορίας δεν χρησιμοποιούνται για γενικό φωτισμό αλλά έχουν εφαρμογές κυρίως σε περιπτώσεις τοπικού φωτισμού για φωτισμό βιτρινών καταστημάτων και για διακόσμηση. [9] [11] [8]



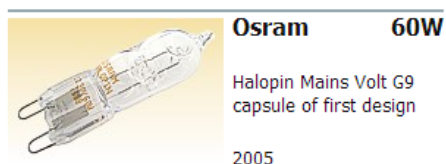
*Εικόνα 1-16: Λαμπτήρες πυρακτώσεως αλογόνου [9]*



### Low Voltage Capsules

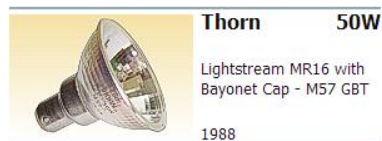
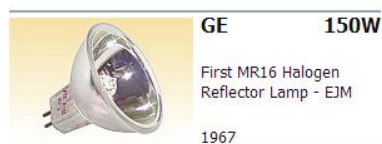


### High Voltage Capsules



Εικόνα 1-17: Μοντέλα λαμπτήρων πυρακτώσεως αλογόνου [8]

### Glass Reflector Types



### Metal Reflector Types



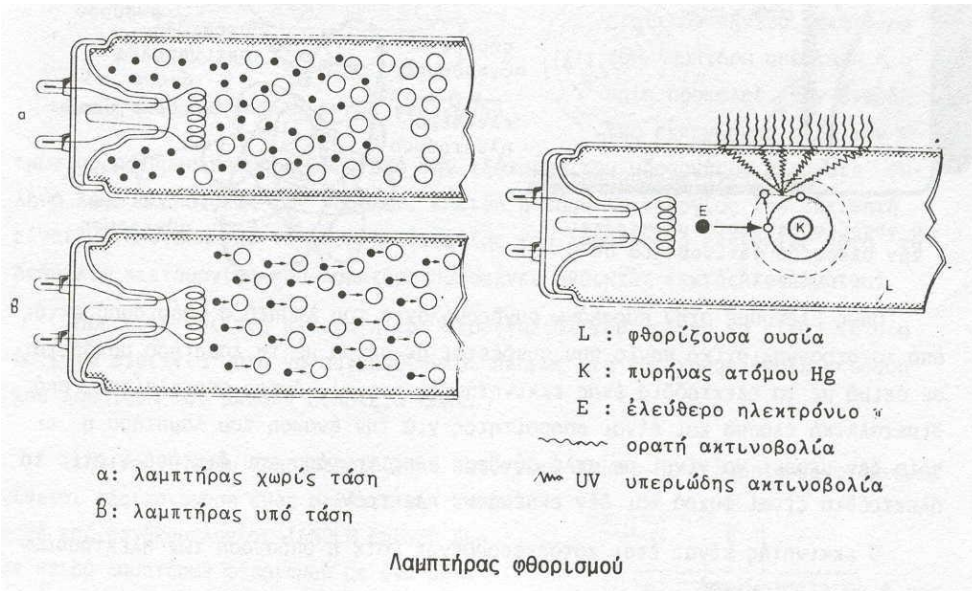
Εικόνα 1-18: Μοντέλα λαμπτήρων πυρακτώσεως αλογόνου με χρήση ανακλαστήρα [8]

## 1.2.2 Λαμπτήρες Φθορισμού

Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι λαμπτήρες εκκένωσης αερίου χαμηλής πίεσης οι οποίοι παράγουν φως μέσω της ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται κατά την εκκένωση ενός αερίου, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι βασίζουν την παραγωγή φωτός στην θέρμανση ενός νήματος. Οι λαμπτήρες φθορισμού αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία λαμπτήρων και η κύρια εφαρμογή τους είναι η χρήση τους σε εφαρμογές γενικού φωτισμού οι οποίες απευθύνονται σε εμπορικούς καταναλωτές.

### 1.2.2.1 Λειτουργία Λαμπτήρων Φθορισμού

Ο λαμπτήρας φθορισμού, ο οποίος έχει συνήθως τη μορφή κυλίνδρου με μεγάλο μήκος και διαθέτει ένα ηλεκτρόδιο σε κάθε άκρη, περιέχει ατμούς υδραργύρου σε χαμηλή πίεση, της τάξεως του ενός Torr, και μικρές ποσότητες ευγενών αερίων για την εκκίνηση, με τα εσωτερικά τοιχώματα του να επικαλύπτονται με φθορίζουσες ουσίες, οι οποίες αποκαλούνται φώσφοροι. Οι ουσίες αυτές έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν σε ορατή την προσπίπτουσα υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία παράγεται στο εσωτερικό του σωλήνα. Με την εφαρμογή της κατάλληλης τάσης, προκαλείται η δημιουργία τόξου από το ρεύμα το οποίο ρέει ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, μέσω των ατμών υδραργύρου. [11] [12]

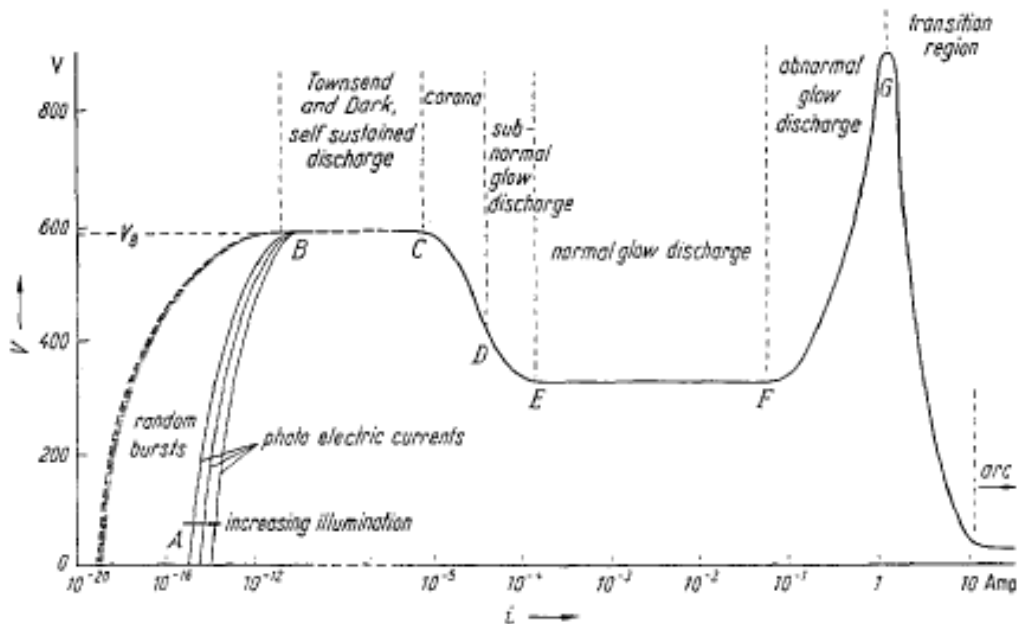


Εικόνα 1-19: Λειτουργία λαμπτήρα φθορισμού [9]

Για να τεθεί σε λειτουργία ένας λαμπτήρας φθορισμού, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων, λόγω της εφαρμογής μιας σχετικά μεγάλης τάσης, της τάξεως μερικών εκατοντάδων Volt. Η τάση αυτή επιβάλλει στα ηλεκτρικά φορτία

τα οποία ήδη υπάρχουν στο σωλήνα ή δημιουργούνται λόγω της τάσης, την μετατόπισή τους προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Επομένως, η εφαρμογή της τάσης αυτής δημιουργεί ροή ηλεκτρονίων στο σωλήνα είτε λόγω της θέρμανσης των ηλεκτροδίων και την εκπομπή θερμοϊονικών ηλεκτρονίων, είτε επειδή προκύπτουν από την εφαρμογή της ιδιαίτερα υψηλής τάσης. Κατά την εκκίνηση της εκκένωσης η ποσότητα των ηλεκτρονίων είναι μικρή αλλά η ανύψωση της θερμοκρασίας του σωλήνα λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης και της σύγκρουσης ηλεκτρονίων με τα άτομα των αερίων και των ατόμων υδραργύρου αυξάνει την ποσότητα των ηλεκτρονίων. Ως άμεσο αποτέλεσμα μικρή ποσότητα του υδραργύρου. Ο υδράργυρος, ως αέριο πλέον, κατέχει το σημαντικότερο ρόλο στην εκκένωση, λόγω της σύγκρουσης των ηλεκτρονίων τα οποία οδεύουν προς την άνοδο με άτομα του υδραργύρου και τη διέγερση των ατόμων του υδραργύρου, δηλαδή την εκδίωξη ενός ηλεκτρονίου της εξωτερικής στοιβάδας σε μια εξωτερική τροχιά. Στην τροχιά αυτή, το εκδιωχθέν ηλεκτρόνιο παραμένει ελάχιστο χρόνο και εν συνεχεία επιστρέφει στην αρχική του θέση προκαλώντας την εκπομπή ενός φωτονίου. Το αποτέλεσμα της εκκένωσης αυτής είναι η παραγωγή ελαχίστων ποσοτήτων ορατής ακτινοβολίας και κυρίως αόρατης υπεριώδους ακτινοβολίας, με μήκη κύματος κυρίως στις περιοχές των 254, 313, 365, 405, 436, 546 και 578 nm. Η υπεριώδης ακτινοβολία εν συνεχεία διεγείρει τις φθορίζουσες ουσίες οι οποίες εκπέμπουν το φως. Η επιλογή και ανάμιξη των φθορίζουσών ουσιών πραγματοποιείται προκειμένου να ανταποκρίνονται αποδοτικότερα στο μήκος κύματος των 254 nm, καθώς αυτό είναι το κύριο μήκος κύματος της ακτινοβολίας η οποία παράγεται κατά την εκκένωση χαμηλής πίεσης υδραργύρου. Οι ποικίλες φθορίζουσες ουσίες οι οποίες χρησιμοποιούνται, ανάλογα με τη σύνθεσή τους εκπέμπουν τη νέα ακτινοβολία σε διάφορες επιθυμητές συχνότητες. [12] [13] [8]

Τα ηλεκτρόδια τα οποία χρησιμοποιούνται σε λαμπτήρες εκκένωσης και άλλες συσκευές εκκένωσης διαχωρίζονται σε δυο κατηγορίες: θερμά ηλεκτρόδια και ψυχρά ηλεκτρόδια. Τα θερμά ηλεκτρόδια (hot cathode) έπειτα από την κατάλληλη θέρμανσή τους εκπέμπουν ηλεκτρόνια λόγω της θερμοϊονικής εκπομπής, δηλαδή της ροής φορτίων από μια επιφάνεια ή πάνω από ένα ενεργειακό κατώφλι (εμπόδιο) το οποίο προκλήθηκε από θερμότητα. Τα θερμά ηλεκτρόδια επιτυγχάνουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με τα ψυχρά και εκπέμπουν μεγαλύτερο πλήθος ηλεκτρονίων.



Εικόνα 1-20: Μεταβολή τάσης-ρεύματος για διάφορα είδη εκκενώσεων [13]

Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως από βολφράμιο και επικαλύπτονται και από άλλο υλικό με μικρότερο έργο εξαγωγής, το οποίο διευκολύνει την εκπομπή ηλεκτρονίων και μειώνει την απαραίτητη θερμοκρασία. Ως έργο εξαγωγής (work function) ορίζουμε την ενέργεια η οποία χρειάζεται για την απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από το άτομο στο άπειρο. Στο βολφράμιο μπορεί να προστεθεί φθόριο προκειμένου να βελτιωθεί η ικανότητα εκπομπής ηλεκτρονίων. Εκτός αυτού, υπάρχουν και ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από ταλάντιο. Το υλικό επικάλυψης κατασκευάζεται από οξείδια. Το πρώτο οξείδιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν του βορίου. Πλέον χρησιμοποιείται συνδυασμός από οξείδια του βορίου στροντίου και ασβεστίου, ενώ είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και οξείδιο βορίου, ασβεστίου και αλουμινίου με αναλογία 5:3:2. Επίσης υπάρχει η περίπτωση να χρησιμοποιηθεί το οξείδιο του θορίου. Για την κατασκευή των ηλεκτροδίων γίνεται χρήση ανθρακικών αλάτων τα οποία μετατρέπονται σε οξείδια με θέρμανση. Η καθαρότητα των υλικών του ηλεκτροδίου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το χρόνο ζωής τους. Το θόριο είναι τοξικό και λόγω αυτού υπάρχει δυνατότητα να αντικατασταθεί από ζirkονιούχο βολφράμιο. Τα ηλεκτρόδια υψηλών ρευμάτων κάνουν χρήση  $LaB_6$ ,  $CeB_6$ . Τα εξαβορίδια ( $B_6$ ) εμφανίζουν χαμηλό έργο εξαγωγής και είναι ανθεκτικά στο «δηλητηριασμό» τους. Τα ηλεκτρόδια βοριδίου παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα φως από τα ηλεκτρόδια βολφραμίου και έχουν 10-15 φορές μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Η χρήση των ηλεκτροδίων αυτών γίνεται σε ηλεκτρονικά μικροσκόπια, σωλήνες μικροκυμάτων και ακτίνων X και σε laser ελεύθερων ηλεκτρονίων. [14] [13]

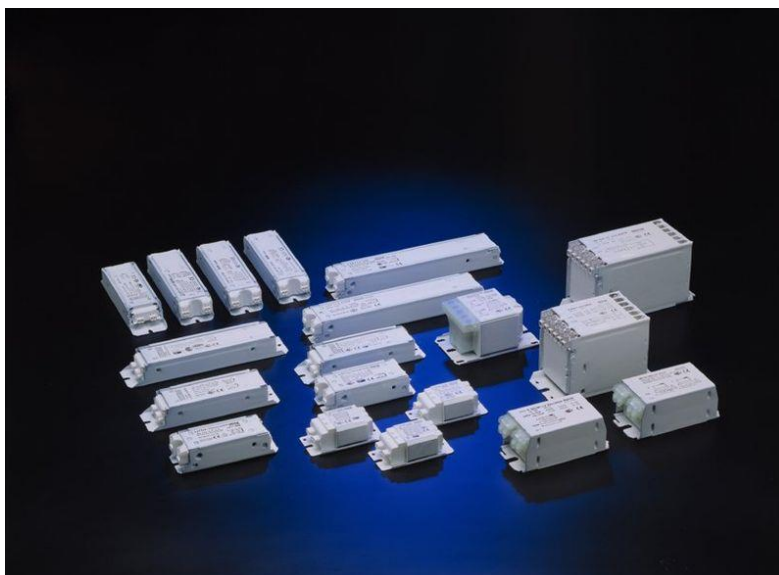
Το υλικό επικάλυψης μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και λόγω της λειτουργία του ηλεκτροδίου. Η φθορά αυτή επιταχύνεται κατά τις περιπτώσεις όπου το ρεύμα των ηλεκτροδίων είναι υψηλό. Το αποτέλεσμα της φθοράς αυτής είναι η εκπομπή λιγότερων ηλεκτρονίων και η εμφάνιση μειωμένης ισχύος ή φωτεινότητας ανάλογα με την εφαρμογή. Τα ηλεκτρόδια είναι δυνατόν να καταστραφούν σε περίπτωση που βρεθούν σε επαφή με οξυγόνο ή άλλες χημικές ουσίες, όπως το πυρίτιο. Οι ουσίες αυτές υπάρχει πιθανότητα να έχουν διαρρεύσει εντός του σωλήνα ή η προέλευσή τους να οφείλεται σε κατασκευαστικά υλικά του λαμπτήρα. Η φθορά η οποία προκαλείται από τη διαδικασία αυτή ονομάζεται «δηλητηριασμός καθόδου». Η σωστή κατασκευή και η χρήση καθαρών αμιγών υλικών σε ποιοτικούς λαμπτήρες είναι δυνατό να αποτρέψει τον δηλητηριασμό. [13] [14]

Τα ψυχρά ηλεκτρόδια (cold cathode) βρίσκουν εφαρμογή σε σωλήνες κενού και λαμπτήρες εκκένωσης. Το ψυχρό ηλεκτρόδιο δεν απαιτεί θερμότητα για την εκπομπή ηλεκτρονίων, παρά το γεγονός ότι το ηλεκτρόδιο είναι δυνατό να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες ανάλογες με τις υψηλές θερμοκρασίες του θερμού ηλεκτροδίου. Το θερμό ηλεκτρόδιο κάνει χρήση θερμότητας και της θερμοϊονικής εκπομπής την εκπομπή ηλεκτρονίων, ενώ το ψυχρό ηλεκτρόδιο δεν απαιτεί θερμότητα αλλά κάνει χρήση μιας υψηλής τάσης η οποία προκαλεί την αποδέσμευση των ηλεκτρονίων ακόμη και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ψυχρή κάθοδος δε θερμαίνεται αρχικά αλλά μετά την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία. Για την επίτευξη της εκπομπής ηλεκτρονίων τα ψυχρά ηλεκτρόδια λειτουργούν σε μεγαλύτερη τάση απ' ό τι τα θερμά ηλεκτρόδια δημιουργώντας ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο πλησίον των ηλεκτροδίων. Οι λαμπτήρες ψυχρής καθόδου είναι συνήθως λιγότερο αποδοτικοί, καθώς η πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη κατά μήκος του σωλήνα και παρατηρείται μεγαλύτερος διασκορπισμός ενέργειας στα άκρα του λαμπτήρα που δεν αποδίδει φως. [13] [14] [11]

Σε αντίθεση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι δεν έχουν ανάγκη τη χρήση κανενός εξαρτήματος για τη λειτουργία τους, οι λαμπτήρες φθορισμού εξαρτώνται από μια σειρά εξαρτημάτων προκειμένου να λειτουργήσουν. Τα εξαρτήματα αυτά είναι το ballast, ο εκκινητής (starter) και ο πυκνωτής αντιστάθμισης όταν γίνεται αντιστάθμιση.

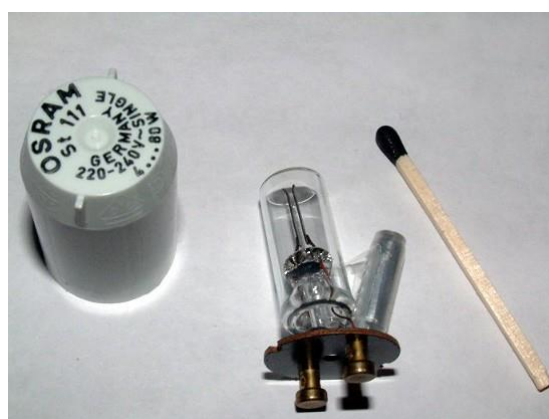
Τα ballast, τα οποία συχνά αναφέρονται και ως στραγγαλιστικά πηνία, είναι απαραίτητος εξοπλισμός για τους λαμπτήρες φθορισμού. Τα ballast εκτελούν κατά την λειτουργία του λαμπτήρα δύο βασικές λειτουργίες. Η πρώτη λειτουργία είναι η

εξασφάλιση της απαιτούμενης τάσης για την επίτευξη της εκκίνησης λειτουργίας του λαμπτήρα, η οποία είναι μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου. Η δεύτερη λειτουργία των ballast είναι ο περιορισμός του ρεύματος μετά την επίτευξη της εκκίνησης του λαμπτήρα, με αποτέλεσμα τα ballast να εκτελούν το ρόλο ηλεκτρικής αντίστασης. [12]



*Εικόνα 1-21: Ballast λαμπτήρων φθορισμού [11]*

Ο εκκινητής (starter) είναι απαραίτητος για την εκκίνηση του εκάστοτε κυκλώματος των λαμπτήρων φθορισμού και έπειτα από την εκκίνηση λειτουργίας των λαμπτήρων δεν είναι απαραίτητος στο κύκλωμα. [12]



*Εικόνα 1-22: Εκκινητής λαμπτήρα φθορισμού [11]*

Ο χαμηλός συντελεστής ισχύος των διατάξεων των λαμπτήρων φθορισμού επιβάλλει αντιστάθμιση με τη χρήση πυκνωτών. Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος επιτυγχάνεται με τη σύνδεση τροφοδοσίας κατάλληλου μεγέθους πυκνωτή σε παράλληλη διάταξη με τους αγωγούς. Ο πυκνωτής λόγω της χωρητικής συμπεριφοράς προκαλεί αντιστάθμιση της επαγωγική συμπεριφορά της

στραγγαλιστικής διάταξης του λαμπτήρα. Η αντιστάθμιση είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σε μεμονωμένο λαμπτήρα, σε ομάδα λαμπτήρων, ακόμη και στο σύνολο της εγκατάστασης φωτισμού. [13]

#### 1.2.2.2 Κατηγοριοποίηση Λαμπτήρων Φθορισμού

Οι γραμμικοί λαμπτήρες φθορισμού είναι κατασκευασμένοι από ευθείς κυλινδρικούς σωλήνες, με διάμετρο από 6 mm (0,25 ίντσες T-2) έως 54 mm (2,125 ίντσες T-17) και συνολικό μήκος από 100 έως 2440 mm (4 έως 96 ίντσες). Εκτός των προαναφερθέντων, διατίθενται και λαμπτήρες φθορισμού σε μη γραμμικούς τύπους με χαρακτηριστικότερους τους λαμπτήρες σχήματος U, οι οποίοι σχηματίζονται λυγίζοντας τις λυχνίες στο μέσον, και τους κυκλικούς λαμπτήρες οι οποίοι είναι λυχνίες λυγισμένες σε κύκλο με τις δύο άκρες παρακείμενες. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην κατηγορία των μη γραμμικών λαμπτήρων φθορισμού ανήκουν και οι μικρότερης διαμέτρου, ενός άκρου, συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι θα εξεταστούν στη συνέχεια αναλυτικότερα.



Εικόνα 1-23: Υλοποιήσεις μη γραμμικών λαμπτήρων φθορισμού [8]

Ιστορικά, οι λαμπτήρες ορίζονται από ένα γράμμα το οποίο αντιπροσωπεύει το σχήμα τους και εν συνεχεία από έναν αριθμό ο οποίος αντιπροσωπεύει τη μέγιστη διάμετρο του σωλήνα, σε όγδοα της ίντσας. Επί παραδείγματι, ο κωδικός T-8 καταδεικνύει έναν κυλινδρικό (tubular) λαμπτήρα, με διάμετρο 8/8 της ίντσας ή 1 ίντσα (26 mm). [12]

#### Λαμπτήρες Φθορισμού T-12

Οι λαμπτήρες αυτού του τύπου ήταν κατά τις προηγούμενες δεκαετίες οι πλέον συχνά χρησιμοποιούμενοι, αλλά η χαμηλή ενεργειακή και χρωματική τους απόδοση οδήγησε σταδιακά στην αντικατάστασή τους από νεότερους περισσότερο αποδοτικούς τύπους λαμπτήρων φθορισμού, με κυριότερους τους τύπους T-8 και T-5. Σε αρκετές χώρες μάλιστα, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς, η χρήση των περισσότερων μοντέλων T-12 λαμπτήρων έχει απαγορευτεί πλέον και νομικά. [12]

#### Λαμπτήρες Φθορισμού T-8

Η ενεργειακή κρίση τη δεκαετία του 1970, οδήγησε τις εταιρείες κατασκευής στην παραγωγή λαμπτήρων φθορισμού τύπου T-8, οι οποίοι είναι λαμπτήρες χαμηλότερης



ενεργειακής κατανάλωσης, σε σχέση με τους συμβατικούς T-12. Οι T-8 λαμπτήρες φθορισμού αποτελούνται από έναν ευθύγραμμο σωλήνα διαμέτρου 25,4 mm (1 ίντσα) και το μήκος τους είναι σε πλήθος περιπτώσεων ίδιο με εκείνο των T-12. Το πλέον συνηθισμένο μήκος για έναν T-8 λαμπτήρα είναι 1,22m (4 ft). Εκτός του προαναφερθέντος, στο εμπόριο υπάρχουν επίσης λαμπτήρες μήκους 0,6, 0,91, 1,52 και 2,44 m (2, 3, 5 και 8 ft αντίστοιχα). Οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-8 σχεδιάζονται για τη λειτουργία σε συνδυασμό με χαμηλής συχνότητας μαγνητικά ballast έντασης ρεύματος 256 mA ή με υψηλής συχνότητας ηλεκτρονικά ballast σε λίγο μικρότερες τιμές ρεύματος.

Κατά τα πρώτα έτη ύπαρξής τους οι λαμπτήρες αυτοί, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, θυσίαζαν, χάριν της αποδοτικότητας τους, ένα μέρος της φωτεινής ροής σε ποσοστό περίπου 12 %, αλλά η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όσον αφορά τις φθορίζουσες ουσίες, δημιούργησε νέες προοπτικές για την επίλυση του προβλήματος αυτού και παράλληλα συνεισέφερε στη βελτίωση της χρωματικής απόδοσης των λαμπτήρων. Η καινοτομία αφορά τη χρήση τριών υψηλής απόδοσης και περιορισμένου φάσματος, φωσφόρων, οι οποίοι ανήκουν στις σπάνιες γαίες. Η μέγιστη εκπομπή των ουσιών αυτών εμπίπτει στις περιοχές μικρού, μέσου και μεγάλου μήκους κύματος του ορατού φάσματος. Η μικρότερη διάμετρος των λαμπτήρων τύπου T-8, σε σύγκριση με τους λαμπτήρες τύπου T-12, καθιστά οικονομικότερη την χρήση των φωσφόρων σπάνιας γαίας, οι οποίοι είναι αποδοτικότεροι αλλά και ακριβότεροι. Επίσης, στους μεγάλους σε μήκος τριφωσφορικούς λαμπτήρες γίνεται χρήση ενός συστήματος διπλής επικάλυψης το οποίο κατασκευάζεται από οικονομικότερα φωσφορικά άλατα πάνω στα οποία επιτίθενται εκείνα τα οποία ανήκουν στις σπάνιες γαίες. Οι ενεργές φθορίζουσες ουσίες οι οποίες ανήκουν στις σπάνιες γαίες είναι πλησιέστερα στην εκκένωση του υδραργύρου και επομένως η κατανομή φασματικής ισχύος του λαμπτήρα επηρεάζεται περισσότερο από αυτές. Η θερμοκρασία χρώματος των πλέον συνηθισμένων εμπορικά διαθέσιμων υλοποιήσεων είναι 3000, 3500 και 4100 K. [12] [11] [15]

Η αύξηση του συνολικού κόστους του λαμπτήρα, λόγω της χρήσης φωσφόρων σπάνιας γαίας, παραμένει σημαντική και για το λόγο αυτό, υφίστανται εμπορικά διαθέσιμοι τόσο συμβατικοί όσο και τριφωσφορικοί λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-8. Οι τριφωσφορικοί λαμπτήρες αυτοί είναι δυνατό να συνδυαστούν με υψηλή χρωματική απόδοση και καλύτερη διατήρηση της έντασης φωτισμού, με σχετική θερμοκρασία χρώματος από 2500 έως 6000 K, αντίστοιχη με τις συμβατικές λάμπες

φωσφορικού άλατος. Η χρωματική απόδοση ενός λαμπτήρα εξαρτάται ως επί το πλείστο από την φωσφορική επικάλυψη στο εσωτερικό του. Στους συμβατικούς λαμπτήρες τύπου T-8 γίνεται χρήση φωσφορικών αλάτων τα οποία είναι δυνατό να εξασφαλίσουν συνήθως είτε καλή ποιότητα χρώματος είτε υψηλή αποδοτικότητα για τον εκάστοτε λαμπτήρα, αλλά όχι και τα δύο χαρακτηριστικά ταυτόχρονα. Επομένως, ένας τυπικός T-8 συμβατικός λαμπτήρας φθορισμού αποδίδει αρκετά υψηλή φωτεινή ροή με το δείκτης χρωματικής απόδοσης (Color Rendering Index, CRI) να μην ξεπερνά το 65. Στην περίπτωση που η χρωματική απόδοση του λαμπτήρα βελτιωθεί, με σκοπό η τιμή του δείκτη να αυξηθεί στο 89, η φωτεινή ροή η οποία παράγεται μειώνεται κατά 28 % περίπου. Σε αντίθεση με τους T-8 συμβατικούς λαμπτήρες φθορισμού, οι τριφωσφορικοί T-8 λαμπτήρες φθορισμού έχουν τη δυνατότητα, λόγω των φωσφόρων σπάνιας γαίας, να συνδυάσουν την καλή ποιότητα χρώματος και την υψηλή απόδοση του λαμπτήρα. [12] [11] [15]

Κατά την εξέταση των λοιπών τεχνικών χαρακτηριστικών των T-8 λαμπτήρων φθορισμού, δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές ανάμεσα στους συμβατικούς και στους τριφωσφορικούς λαμπτήρες. Οι λαμπτήρες και των δύο κατηγοριών κατασκευάζονται στις ίδιες διαστάσεις και χαρακτηρίζονται από την ίδια ονομαστική ισχύ. Επίσης, η μέση διάρκεια ζωής όλων των T-8 λαμπτήρων φθορισμού είναι 20.000 ώρες, για λειτουργία με τη χρήση ηλεκτρονικού ballast. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι για κάθε χρονικό διάστημα τριών ωρών συνεχούς λειτουργίας, παρεμβάλλεται εικοσάλεπτη διακοπή. Έχοντας υπόψιν ότι η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα εξαρτάται σημαντικά από τη συχνότητα εκκίνησης του, είναι εμφανές ότι πιθανή διαφοροποίηση του κύκλου λειτουργίας ενός λαμπτήρα, επηρεάζει άμεσα είτε θετικά είτε αρνητικά τη διάρκεια ζωής του. Η διαφοροποίηση του κύκλου λειτουργίας ενός λαμπτήρα φθορισμού εμφανίζεται πολύ συχνά στην πράξη, καθώς διαφοροποιείται η χρήση των χώρων στους οποίους εγκαθίστανται οι λαμπτήρες. Επί παραδείγματι, σε ένα σχολείο οι λαμπτήρες φθορισμού παραμένουν πιθανότατα συνεχώς ανοικτοί, με αποτέλεσμα η διάρκεια ζωής τους να φτάνει σε ορισμένες περιπτώσεις έως τις 38.000 ώρες. Τέλος, διευκρινίζεται ότι οι λαμπτήρες και των δύο κατηγοριών λειτουργούν με τα ίδια ballast, επομένως ένα ballast το οποίο χειρίζεται ένα συμβατικό T-8 λαμπτήρα φθορισμού, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί, το ίδιο αποδοτικά, και για τη λειτουργία ενός τριφωσφορικού T-8 λαμπτήρα, ίδιας ισχύος. [12] [11] [15]

Εξαιτίας της μεγαλύτερης αποδοτικότητας τους, τα συστήματα με λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-8 έχουν σταδιακά αντικαταστήσει εκείνα με λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-12 στις περισσότερες εφαρμογές. Στο γεγονός αυτός συνέβαλε προφανώς και το χαρακτηριστικό ότι και τα δύο είδη λαμπτήρων έχουν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ίδιο μήκος, καθώς και το ότι και στις δύο περιπτώσεις γίνεται χρήση μεσαίων βάσεων διπλού ακροδέκτη. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι σε ένα ενσωματωμένο, κλειστό φωτιστικό, η αντικατάσταση τεσσάρων λαμπτήρων T-12, οι οποίοι λειτουργούν με δύο μαγνητικά ballast, με τέσσερις T-8 λαμπτήρες οι οποίοι λειτουργούν με ένα ηλεκτρονικό ballast, είναι δυνατό να εξοικονομήσει έως και 40 % της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, με τη μείωση της φωτεινής ροής να είναι αμελητέα ή και μηδενική. [12] [11] [15]

#### Λαμπτήρες Φθορισμού T-5

Οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 είναι μια οικογένεια λαμπτήρων φθορισμού ευθύγραμμου σωλήνα, η οποία τείνει σταδιακά να καταστεί η πλέον χρησιμοποιούμενη. Η πρώτη εμφάνισή τους πραγματοποιήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1990 στις ΗΠΑ και έκτοτε η χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές αυξάνεται διαρκώς. Η διάμετρος τους είναι 5/8 της ίντσας, (όπως είναι εμφανές και από τον κωδικό T-5), το μήκος τους είναι ελαφρώς μικρότερο από το μήκος των λαμπτήρων τύπου T-8 και συνδυάζονται μόνο με μικρές βάσεις διπλής επαφής, ως εκ τούτου δεν είναι δυνατό να τους αντικαταστήσουν σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις φωτισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν σύγχρονα φωτιστικά τα οποία είναι δυνατό να δεχτούν και τους δύο τύπους λαμπτήρων, με απλή αλλαγή των βάσεων και των ballast. Οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 διαθέτουν επικάλυψη αποκλειστικά από τριφωσφορικές φωσφορίζουσες ουσίες και λειτουργούν σε συνδυασμό μόνο με ηλεκτρονικά ballast. [12] [11] [15]

Τη δεδομένη χρονική στιγμή είναι εμπορικά διαθέσιμοι δύο βασικοί τύποι λαμπτήρων φθορισμού τύπου T-5: οι συμβατικοί λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5, οι οποίοι ονομάζονται και T-5 υψηλής απόδοσης (High Efficiency, HE) και οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 υψηλής φωτεινής ροής (High Output, HO). Όσον αφορά τους λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 HE διατίθενται λαμπτήρες με ονομαστική ισχύ 14, 21, 28 και 35 W, ενώ οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 HO διατίθενται με ονομαστική ισχύ 24, 39, 54 και 80 W. Για την επίτευξη της ίδιας έντασης φωτισμού, η μεγαλύτερη φωτεινή ροή η οποία παράγεται από τους HO

λαμπτήρες είναι δυνατό να οδηγήσει στη χρήση λιγότερων φωτιστικών απο ότι στην περίπτωση των HE λαμπτήρων. [12]

Τύπος Λαμπτήρα	Ονομαστικό Μήκος (in)	CCT (K)	Φωτεινή Ροή (lm)
T5 14W	22	1.350	1.350
T5 21W	34	2.100	2.100
T5 28W	46	2.900	2.900
T5 35W	58	3.650	3.650
T5 HO 24W	22	2.000	2.000
T5 HO 39W	34	3.500	3.500
T5 HO 54W	46	5.000	5.000
T5 HO 80W	58	7.000	7.000

*Πίνακας 1-2: Κυριότερα χαρακτηριστικά λαμπτήρων φθορισμού T5 [12]*

Οι T-5 HO λαμπτήρες παράγουν μεγαλύτερη φωτεινή ροή ανά μονάδα μήκους σε σύγκριση με τους T-8 λαμπτήρες. Αντίθετα, για τους T-5 HE η φωτεινή ροή η οποία παράγεται ανά μονάδα μήκους είναι σχεδόν ταυτόσημη με αυτή των T-8. [12]

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα επίπεδα της παραγόμενης φωτεινής ισχύος επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στους καταλόγους των κατασκευαστών δίδεται συνήθως η φωτεινή ροή την οποία παράγει ο εκάστοτε λαμπτήρας στη βέλτιστη για αυτόν θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος, δηλαδή 35 °C για τους T-5 λαμπτήρες και 25 °C για τους T-8. Σε πλήθος περιπτώσεων δίδονται επίσης και οι τιμές της φωτεινής ροής η οποία παράγεται από τους T-5 λαμπτήρες στους 25 °C και της φωτεινής ροής η οποία παράγεται από τους T-8 στους 35 °C. Συνήθως παρατηρείται ότι στους 25 °C οι T-8 λαμπτήρες παράγουν μεγαλύτερη φωτεινή ροή από τους T-5 HE, ενώ για θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος στους 35 °C παρατηρείται το αντίθετο. Λαμβάνοντας υπόψιν την απόδοση των λαμπτήρων, παρατηρείται ότι οι T-5 HE εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τους T-8 στους 35 °C, ενώ και οι δύο τύποι λαμπτήρων εμφανίζουν πρακτικά ίδιες αποδόσεις στους 25 °C. Εκτός αυτού, όσον αφορά τους T-

5 ΗΟ, παρατηρείται ότι εμφανίζουν τη χαμηλότερη απόδοση στους 25 °C, ενώ και στους 35 °C υπολείπονται των T-5 ΗΕ. [12] [16] [15] [11]

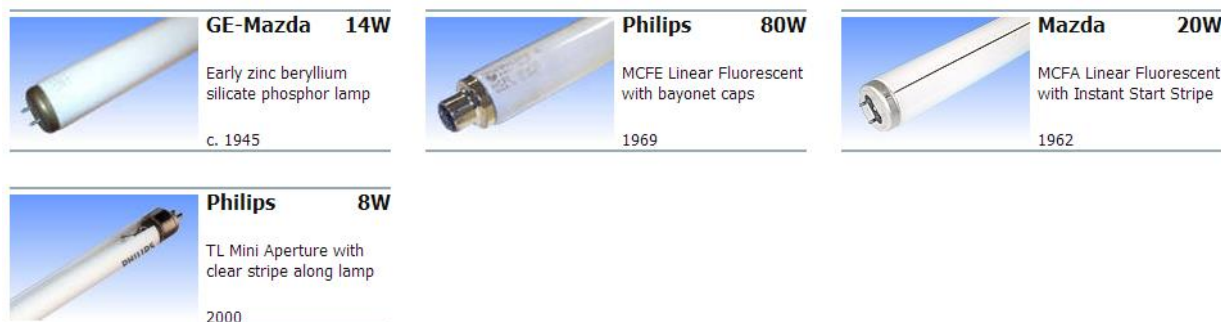
Με βάση τα ανωτέρω, είναι εμφανές ότι οι T-5 λαμπτήρες εμφανίζουν μέγιστη φωτεινή ροή σε θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος περίπου 10 °C υψηλότερη από ότι οι T-8. Επομένως, λόγω αυτού, οι T-5 λαμπτήρες αποδίδουν καλύτερα σε κλειστά, συμπαγή φωτιστικά. Αντίθετα, σε ανοιχτά φωτιστικά, η ροή του αέρα είναι δυνατό να διατηρήσει τη θερμοκρασία εντός του φωτιστικού σε επίπεδα χαμηλότερα των 35 °C, με άμεσο αποτέλεσμα οι T-8 λαμπτήρες να αποδίδουν καλύτερα. Επίσης, λόγω αυτής της διαφοράς των 10 °C στη θερμοκρασία βέλτιστης λειτουργίας, παρατηρείται γενικά ότι οι T-5 λαμπτήρες απαιτούν περισσότερο χρόνο για την εκκίνηση της λειτουργίας τους σε σχέση με τους T-8, εξαιτίας της άυξης του απαιτούμενου χρόνου προθέρμανσης. [12] [16] [15] [11]

Όσον αφορά τη διατήρηση της φωτεινής ροής, οι T-5 λαμπτήρες διατηρούν περισσότερο από το 95 % της φωτεινής ροής τους μέχρι της 8.000 ώρες, δηλαδή περίπου το 30 % της μέσης ονομαστικής διάρκειας ζωής, σύμφωνα με τους κατασκευαστές. Η εξαιρετικά υψηλή αυτή τιμή οφείλεται στη βελτίωση της φωσφορικής επικάλυψης με αποτέλεσμα τη μείωση της απορρόφησης υδραργύρου, η οποία αποτελεί και τη σημαντικότερη αιτία μείωσης της φωτεινής ροής στους λαμπτήρες φθορισμού. Οι μικρότερες διαστάσεις και κατά συνέπεια η μικρότερη επιφάνεια επικάλυψης των λαμπτήρων φθορισμού τύπου T-5 σε σχέση με τους λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-8, επιτρέπει τη χρήση αποκλειστικά τριφωσφορικών φθορίζουσών ουσιών στους λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5, και όχι μείγματος τριφωσφορικών με φωσφορικά άλατα, όπως γίνεται στους T-8 τριφωσφορικούς. Οι τριφωσφορικές αυτές φθορίζουσες ουσίες είναι περισσότερο ευσταθείς και επιτρέπουν υψηλότερα επίπεδα πλήρωσης, με αποτέλεσμα την επίτευξη καλύτερης διατήρησης της φωτεινής ροής. [12] [16] [15] [11]

Η μέση ονομαστική διάρκεια ζωής των T-5 λαμπτήρων είναι 20.000 ώρες σύμφωνα με τους κατασκευαστές, τιμή η οποία υπολογίζεται για θερμοκρασίες μεταξύ 15°C και 50°C και αναφέρεται σε κύκλο λειτουργίας τριών ωρών, δηλαδή θεωρώντας εικοσάλεπτη διακοπή για κάθε τρεις ώρες συνεχούς λειτουργίας. Για την επίδραση της συχνότητας εκκίνησης στη διάρκεια ζωής των T-5 λαμπτήρων, δεν υπάρχει διαφορά σε σχέση με τους T-8 λαμπτήρες, επομένως οι δύο τύποι λαμπτήρων παρουσιάζουν την ίδια μέση διάρκεια ζωής. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόσφατα υπήρξαν εμπορικά διαθέσιμοι T-8 λαμπτήρες παρατεταμένης διάρκειας ζωής, η οποία

είναι δυνατό να ξεπερνά αυτή των T-5 λαμπτήρων κατά 4.000 ή και 10.000 ώρες. [12] [16] [15] [11]

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία των δύο τύπων λαμπτήρων φθορισμού, οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς για την κατασκευή αλλά και τη συσκευασία τους απαιτούνται σημαντικά μικρότερες ποσότητες υλικών λόγω του μικρότερου μεγέθους τους. Χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τους κατασκευαστές, για την κατασκευή ενός λαμπτήρα φθορισμού τύπου T-5 απαιτείται χρήση 38 % λιγότερου γυαλιού από ότι για έναν λαμπτήρα φθορισμού τύπου T-8, ενώ και τα υλικά συσκευασίας μειώνονται έως και 50 %. Εκτός αυτού, η χρήση λαμπτήρων φθορισμού τύπου T-5 οδηγεί σε σημαντική μείωση της πιθανότητας μόλυνσης από τοξικά υλικά, καθώς εξαιτίας της βελτιωμένης φωσφορικής επικάλυψης την οποία διαθέτουν οι λαμπτήρες αυτοί, μειώνεται σημαντικά η απορρόφηση υδραργύρου από το φώσφορο και το γυαλί του σωλήνα. Το πλεονέκτημα αυτό των λαμπτήρων φθορισμού τύπου T-5 οδηγεί τελικά στη χρήση σημαντικά μικρότερων ποσοτήτων υδραργύρου, οι οποίες δεν ξεπερνούν στις περισσότερες περιπτώσεις τα 5 mg. [12] [16] [15] [11]



Εικόνα 1-24: Υλοποιήσεις γραμμικών λαμπτήρων φθορισμού [8]

### 1.2.2.3 Ballast Λαμπτήρων Φθορισμού

Ένα χαρακτηριστικό στοιχείο των λαμπτήρων εκκένωσης αερίου, και κατά συνέπεια τους λαμπτήρων φθορισμού, είναι η αρνητική χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος. Λόγω του χαρακτηριστικού αυτού καθίσταται απαραίτητη για την ορθή λειτουργία τους, η χρησιμοποίηση μιας βοηθητικής συσκευής για τον περιορισμό του ηλεκτρικού ρεύματος. Η συσκευή αυτή, η οποία αποκαλείται ballast και συχνά αναφέρεται στην ελληνική βιβλιογραφία και ως σταθεροποιητής ρεύματος ή στραγγαλιστικό πηνίο, δίνει επίσης την παροχή της απαιτούμενης τάσης για την

έναρξη του τόξου. Η τάση αυτή είναι δυνατό να κυμαίνεται από 1,5 έως 4 φορές την ονομαστική τάση λειτουργίας του λαμπτήρα. [14]

Οι βασικές λειτουργίες τις οποίες εκτελεί ένα ballast είναι οι εξής:

- Περιορίζει και σταθεροποιεί το ρεύμα το οποίο αναπτύσσεται λόγω της αρνητικής αντίστασης που παρουσιάζει ο λαμπτήρας.
- Εξασφαλίζει την διατήρηση της εκκένωσης, η οποία είναι απαραίτητη, αντιμετωπίζοντας το γεγονός ότι σε κάθε περίοδο δυο φορές η τάση και το ρεύμα μηδενίζονται.
- Παρέχει την απαιτούμενη μεγάλη τάση για την έναυση του λαμπτήρα.

Οι βασικές αυτές λειτουργίες εκτελούνται από τα ballast από τότε που παρουσιάστηκαν οι λαμπτήρες φθορισμού. Η ανάγκη χρήσης της σύγχρονης τεχνολογίας για μια σειρά από λειτουργίες οι οποίες παρέχουν αυξημένη απόδοση στο σύστημα φωτισμού και συντελούν στο να επηρεάζονται ελάχιστα κοντινές ηλεκτρονικές συσκευές και το ίδιο το δίκτυο από εισαγωγή αρμονικών επέφερε σταδιακά αύξηση των καθηκόντων των ballast. Για το λόγο αυτό, τη δεδομένη χρονική στιγμή τα ballast εκτελούν, εκτός των προαναφερθέντων, τις εξής λειτουργίες:

- Αναλαμβάνουν την παροχή του απαραίτητου ρεύματος για την θέρμανση των ηλεκτροδίων κατά την έναυση με σκοπό την αύξηση της ζωής των λαμπτήρων.
- Εξασφαλίζουν έναν υψηλό συντελεστή ισχύος.
- Περιορίζουν την εισαγωγή αρμονικών οι οποίες προκαλούν διαταραχές στο δίκτυο.
- Ελαττώνουν ή εξουδετερώνουν τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές τις οποίες πιθανώς θα είχε το σύστημα φωτισμού προς άλλες συσκευές.
- Περιορίζουν τα ρεύματα βραχυκυκλώματος (short - circuit current) στα ηλεκτρόδια κατά την έναυση για την αποφυγή της φθράς τους.
- Θέτουν το κύκλωμα εκτός λειτουργίας όταν δεν πραγματοποιείται η έναυση για οποιοδήποτε λόγο.
- Διατηρούν την τάση, το ρεύμα και την ισχύ σε προκαθορισμένες τιμές αντιμετωπίζοντας τις μεταβολές στο δίκτυο.

Οι ονομαστικές τιμές της διάρκειας ζωής και της φωτεινής ροής των λαμπτήρων φθορισμού οι οποίες δίδονται από τους κατασκευαστές είναι βασισμένες στην

προϋπόθεση ότι ο εκάστοτε λαμπτήρας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το κατάλληλο ballast. Το ballast αυτό πρέπει να είναι ικανό να παρέχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως αυτά έχουν καθιερωθεί στα πρότυπα ANSI για τα διαστασιακά και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των λαμπτήρων φθορισμού (σειρά C78). Ballast τα οποία δεν παρέχουν τις κατάλληλες ηλεκτρικές τιμές είναι δυνατό να προκαλέσουν μείωση της διάρκειας ζωής ή της φωτεινής ροής των λαμπτήρων ή ακόμα και των δύο. Η λειτουργία του βοηθητικού αυτού εξοπλισμού απαιτεί την απορρόφηση ηλεκτρικής ισχύος και κατά συνέπεια η αποδοτικότητα του συστήματος η οποία προκύπτει είναι τελικά μικρότερη από αυτήν η οποία βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στις απαιτήσεις ισχύος του λαμπτήρα.

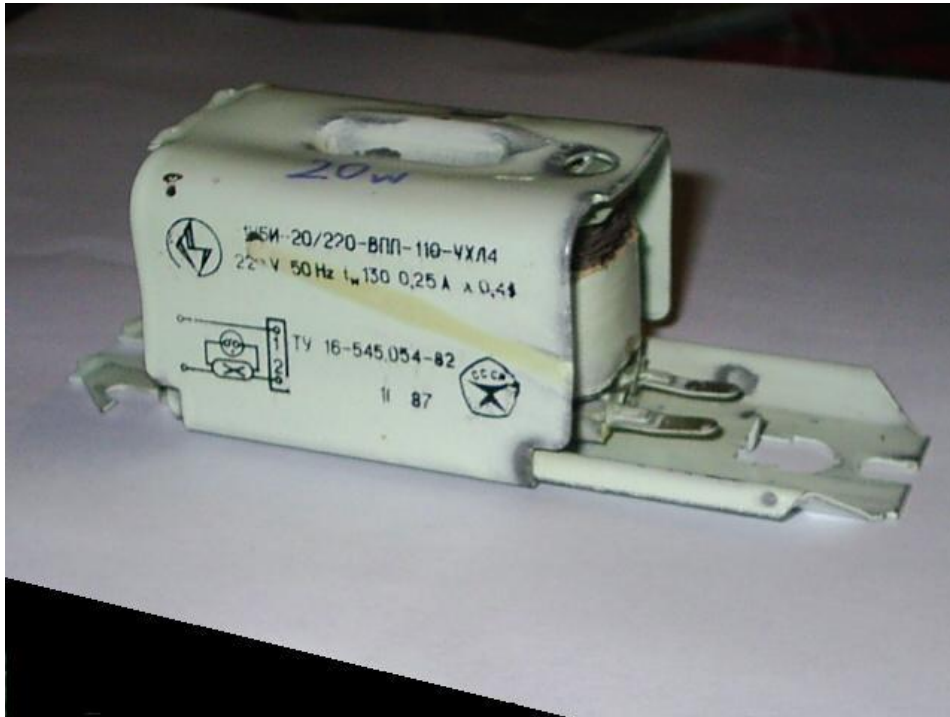
Εμπορικά διαθέσιμοι είναι δύο βασικοί τύποι ballast για λαμπτήρες φθορισμού: το μαγνητικό και το ηλεκτρονικό. [14] [12]

#### Μαγνητικά Ballast

Τα πρώτα ballast τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν ιδιαίτερα απλά και δίχως ιδιαίτερες ποιοτικές απαιτήσεις. Στην περίπτωση της χρήσης σε συνεχές ρεύμα ήταν μια απλή αντίσταση σε σειρά με το λαμπτήρα. Η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του συστήματος ήταν διπλάσια από την απαιτούμενη από το λαμπτήρα και κατά συνέπεια, η αντίσταση κατανάλωνε το 50% της συνολικής ενέργειας. Στο εναλλασσόμενο ρεύμα γίνεται χρήση ενός πηνίου για την σταθεροποίηση της εκκένωσης. Ο πυκνωτής δεν είναι εύχρηστος, καθώς δίνει στο λαμπτήρα μεγάλες κορυφές ρεύματος σε κάθε ημιπερίοδο και κατά συνέπεια μειώνει την απόδοση, καθώς και διότι επιβαρύνει με αρμονικές το δίκτυο. [11] [14]

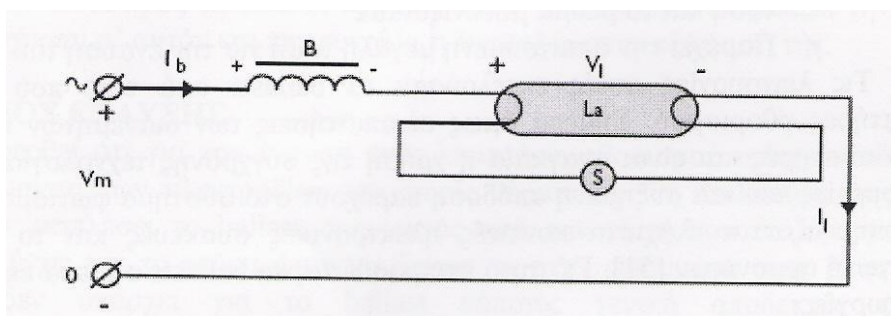
Τα μαγνητικά ballast αποτελούν ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις τύπου «πυρήνα-πηνίου» οι οποίες περιέχουν ένα μαγνητικό πυρήνα, αποτελούμενο από πολλά χαλύβδινα ελάσματα, γύρω από τα οποία τυλίγονται τα χάλκινα ελίγματα. Το μαγνητικό ballast είναι συνδεδεμένο εν σειρά με το λαμπτήρα και κατά την έναυσή του αναλαμβάνει την παροχή της απαιτούμενης τάσης. Κατά τη λειτουργία το μαγνητικό ballast σταθεροποιεί την εκκένωση, με τις σπείρες του και τη συνολική του αντίσταση να είναι υπολογισμένα για την παροχή των επιθυμητών συνθηκών λειτουργίας του λαμπτήρα. Ορισμένα ballast για λαμπτήρες φθορισμού εσωτερικού χώρου περιλαμβάνουν και μια συσκευή θερμικής προστασίας, η οποία εμποδίζει τη λανθασμένη χρήση του ballast σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών και προλαμβάνει την εμφάνιση ανεπιθύμητων καταστάσεων, οι οποίες είναι δυνατό να προκύψουν στο τέλος της ζωής του ballast. [11] [12]





Εικόνα 1-25: Μαγνητικό ballast λαμπτήρα φθορισμού [11]

Για να δοθεί στο λαμπτήρα η μεγάλη τάση η οποία απαιτείται κατά την έναυση δεν επαρκεί μόνο το μαγνητικό ballast. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται και ένας πρόσθετος μηχανισμός ο οποίος ονομάζεται εκκινητής (starter). Ο εκκινητής, κατά την παροχή ρεύματος στο κύκλωμα, δεν αφήνει να εκτελεσθεί η εκκένωση. Το ρεύμα το οποίο διαπερνά τα ηλεκτρόδια τα θερμαίνει και την κατάλληλη στιγμή, κατά το άνοιγμα του εκκινητή, το ρεύμα παύει να διέρχεται απ' αυτά και εν συνεχεία το πηνίο, λόγω αυτεπαγωγής, εφαρμόζει μια μεγάλη τάση στα άκρα του λαμπτήρα. Όταν τα ηλεκτρόδια είναι εύκολο να πραγματοποιήσουν την έναυση. [13]



Εικόνα 1-26: Διάταξη λαμπτήρα φθορισμού που οδηγείται από ηλεκτρομαγνητικό ballast με εκκινητή [13]

Ο τύπος του ballast ο οποίος περιεγράφηκε ονομάζεται τύπος με προθέρμανση στην έναυση (preheat start type), ενώ ο ίδιος τύπος είναι διαθέσιμος και με αυτομετασχηματιστή για υψηλότερες τάσεις. Υπάρχουν ballast με γρήγορη έναυση

(rapid start type) τα οποία θερμαίνουν τα ηλεκτρόδια με χωριστά κυκλώματα και η έναυση πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση εκκινήτη. Η παροχή ρεύματος στα ηλεκτρόδια είτε συνεχίζεται καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας είτε διακόπτεται με κάποιο προγραμματισμό για οικονομία στην ενέργεια. Υπάρχει επίσης και ο τύπος της άμεσης έναυσης (instant start type) ο οποίος δίνει στην εκκίνηση μια μεγάλη τάση ώστε να γίνει η έναυση, αλλά αυτός τον τρόπο επιφέρει την καταστροφή των ηλεκτροδίων συντομότερα. [11] [13]

Τα μαγνητικά ballast εμφανίζουν αρκετά σημαντικές απώλειες ισχύος,. Εκτιμάται ότι ένα σύστημα φωτισμού το οποίο αποτελείται από ένα μαγνητικό ballast και δύο T-8 λαμπτήρες ισχύος 32 W καταναλώνει περίπου 70 W. Τα μαγνητικά ballast λειτουργούν στη συχνότητα γραμμής, δηλαδή 50 Hz στην Ελλάδα, ενώ η μέση διάρκεια ζωής τους, όταν λειτουργούν υπό κατάλληλες συνθήκες οι οποίες καθορίζονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή, εκτιμάται στα δώδεκα χρόνια. Τα παλαιότερα μαγνητικά ballast εμφάνιζαν υψηλότερες απώλειες και ήταν περίπου 10% λιγότερο αποδοτικά από τα σύγχρονα αλλά έχουν πλέον αποσυρθεί από την αγορά, ενώ τώρα συζητείται και η ολοκληρωτική κατάργηση των μαγνητικών ballast, προς όφελος των ηλεκτρονικών. [14] [12] [13]

### Ηλεκτρονικά Ballast

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η ανάπτυξη των υλικών στερεάς κατάστασης (solid state) επέτρεψε στους κατασκευαστές ballast να προχωρήσουν στην αντικατάσταση του μετασχηματιστή τύπου πυρήνα-πηνίου με ηλεκτρονικά εξαρτήματα και να αυξήσουν έτσι τη συχνότητα λειτουργίας των ballast στα 20-60 kHz. Τα ηλεκτρονικά ballast περιλαμβάνουν κυκλώματα για τον περιορισμό του μεταβατικού ρεύματος, κατά την έναρξη λειτουργίας του ballast, το οποίο είναι αποτέλεσμα της φόρτισης των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών ενός ηλεκτρονικού ballast και αποτελεί πρόβλημα για διακόπτες και ρελέ, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την έναρξη ή τη διακοπή λειτουργίας ενός ballast. Τα περισσότερα ηλεκτρονικά ballast διαθέτουν πλέον κυκλώματα τα οποία περιορίζουν την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος κάτω από το 20 % και εξασφαλίζουν συντελεστή ισχύος μεγαλύτερο από 0,9.

Τα ηλεκτρονικά ballast τείνουν σήμερα να αντικαταστήσουν τα μαγνητικά σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές. Στην εξέλιξη αυτή συνέβαλε και το γεγονός ότι τα ηλεκτρονικά ballast έχουν τη δυνατότητα να χειρίζονται ταυτόχρονα περισσότερους λαμπτήρες από ότι τα μαγνητικά (μέχρι και 4 λαμπτήρες), ενώ παρέχουν και πολύ

μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου της φωτεινής ροής (dimming). Σε πλήθος περιπτώσεων τα ηλεκτρονικά ballast κατασκευάζονται στο ίδιο σχήμα και μέγεθος με αντίστοιχα μαγνητικά ballast, για να καταστεί ευκολότερη η άμεση αντικατάσταση. [12]



*Εικόνα 1-27: Ηλεκτρονικό ballast λαμπτήρα φθορισμού [11]*

Ουσιαστικά το ηλεκτρονικό ballast είναι ένας μετασχηματιστής AC/AC, ο οποίος μετατρέπει τη χαμηλή συχνότητα του δικτύου σε υψηλή. Αρχικά περιλαμβάνει ένα ανορθωτή AC/DC, ο οποίος συνήθως αποτελείται από τέσσερις διόδους και ένα bulk capacitor, εάν πρόκειται για μια φθηνή υλοποίηση με χαμηλό συντελεστή ισχύος και μεγάλη ολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion-THD). Τα βελτιωμένα ballast περιλαμβάνουν διατάξεις διόρθωσης του συντελεστή ισχύος (Power Factor Correction). [14]

Μετά τον ανορθωτή υπάρχει ένας μετατροπέας συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα DC/AC, ο οποίος είναι ένα σύνθετο ηλεκτρονικό όργανο το οποίο μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο με τετραγωνικό παλμό, ο οποίος εφαρμόζεται στα άκρα του λαμπτήρα. Ανάλογα με την ποιότητα του ballast, είναι δυνατόν να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μονάδες ελέγχου διαφόρων λειτουργιών. [14] [11]

Για να θεωρηθεί ότι ένα ballast έχει σωστή κατασκευή ώστε να οδηγεί ένα λαμπτήρα φθορισμού, οφείλουν να ελεγχθούν τα εξής σημεία:

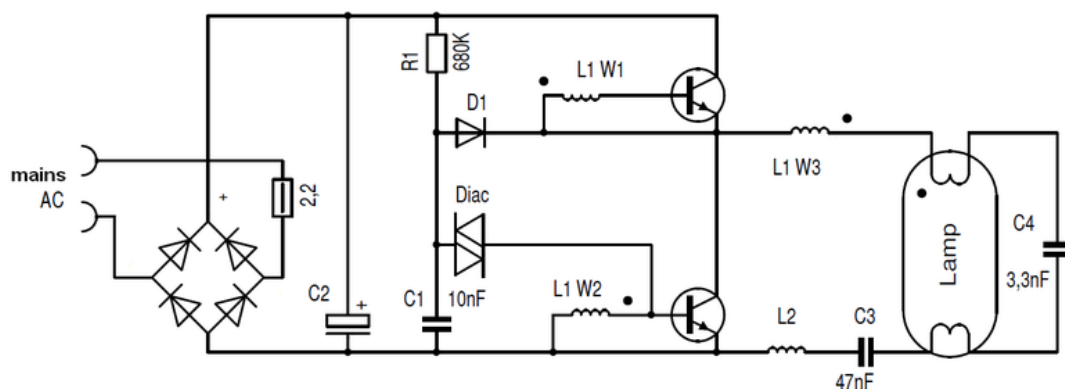
- Η μέθοδος έναυσης
- Το ballast factor
- Ο συντελεστής ισχύος και η ολική αρμονική παραμόρφωση
- Η συμβατότητα λαμπτήρα - ballast
- Το ρεύμα εισροής (inrush current)
- Η αξιοπιστία του ballast (ballast reliability)

Κατά τη λειτουργία του συστήματος το ballast οφείλει να εξασφαλίζει στο λαμπτήρα τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, τα οποία είναι τα εξής:

- Ονομαστική τιμή ρεύματος λειτουργίας
- Ονομαστική τιμή τάσης λειτουργίας
- Ονομαστική τιμή ισχύος
- Χρόνος προθέρμανσης ηλεκτροδίων
- Τάση έναυσης της εκκένωσης
- Λόγος προθέρμανσης  $R_h/R_c$  (preheat ratio)

Το  $R_h$  αφορά την αντίσταση του ηλεκτροδίου στο τέλος της προθέρμανσης και ακριβώς πριν την εφαρμογή της τάσης έναυσης για να αρχίσει η εκκένωση. Είναι δηλαδή η αντίσταση κατά τη χρονική στιγμή την οποία ο λαμπτήρας μεταβαίνει από το στάδιο αίγλης στο στάδιο τόξου. Το  $R_c$  αφορά την αντίσταση του ψυχρού ηλεκτροδίου πριν την έναρξη της διαδικασίας της έναυσης. Επομένως ο λόγος προθέρμανσης είναι ένας δείκτης ο οποίος αφορά τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων κατά την έναυση.

Ο λόγος  $R_h/R_c$  οφείλει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων, εφόσον και η θερμοκρασία των ηλεκτροδίων κατά την έναυση οφείλει να κυμαίνεται σε γενικές γραμμές από 700 oC μέχρι 1000 oC. Το ηλεκτρονικό ballast ελέγχοντας τις τιμές χρόνου, ρεύματος και την τάση προθέρμανσης, καθορίζει το κλάσμα  $R_h/R_c$ . Στην πράξη ο λόγος προθέρμανσης είναι εξαρτημένος και από τα χαρακτηριστικά του λαμπτήρα. [14]



Εικόνα 1-28: Βασικό κύκλωμα ηλεκτρονικού ballast [11]

Τα ηλεκτρονικά ballast χρησιμοποιούν μία από τις τρεις γενικές μεθόδους, ορισμένες από το Αμερικανικό Εθνικό Ινστιτούτο Στανταρτς (ANSI), για την εκκίνηση του λαμπτήρα: προθέρμανση με πρόγραμμα (program start ballast), στιγμιαία έναυση (instant start ballast) και γρήγορη έναυση (rapid start ballast). Τα ballast

προγραμματισμένης έναυσης είναι παρόμοια με αυτά της γρήγορης έναυσης αλλά κατά τη μελέτη της βιβλιογραφίας συναντήθηκαν ως ξεχωριστή τεχνολογία και για το λόγο αυτό καταχωρούνται χωριστά στη συνέχεια. Οι κατασκευαστές λαμπτήρων σχεδιάζουν τους λαμπτήρες φθορισμού για χρήση τους με άνω του ενός τύπου ballast. Οι κατάλογοι του κατασκευαστή και το ballast ή τα ίδια τα προϊόντα του λαμπτήρα συνήθως παραθέτουν τη μέθοδο έναυσης και θα ήταν συνετό να πραγματοποιείται έλεγχος ώστε ο συγκεκριμένος συνδυασμός λαμπτήρα- ballast να συνιστάται και από τους δύο κατασκευαστές. [13]

ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΛΑΜΠΤΗΡΑ - ΜΠΑΛΛΑΣΤ			
	Μπάλλαστ προθέρμανσης	Μπάλλαστ στιγμιαίας έναυσης	Μπάλλαστ γρήγορης έναυσης
Λαμπτήρας προθέρμανσης	Κανονική λειτουργία	Αναξιόπιστη έναυση: μειώνει διάρκεια ζωής λαμπτήρα	Αναξιόπιστη έναυση
Λαμπτήρας στιγμιαίας έναυσης	Πιο πιθανόν δε θα γίνει η έναυση	Κανονική λειτουργία	Πιο πιθανόν δε θα γίνει η έναυση
Λαμπτήρας γρήγορης έναυσης	Κανονική λειτουργία	Συνήθως μειώνει διάρκεια ζωής λαμπτήρα	Κανονική λειτουργία

Πίνακας 1-3: Συνέπειες ασυμβατότητας συστήματος λαμπτήρα - ballast [13]

#### Έναυση με προθέρμανση (preheat start)

Κατά τη λειτουργία της προθέρμανσης, το ballast προκαλεί θέρμανση των ηλεκτροδίων του λαμπτήρα για αρκετά δευτερόλεπτα περίπου στους 700-1000 °C. Μετά την προθέρμανση των ηλεκτροδίων ο διακόπτης του εκκινητή ανοίγει για την εφαρμογή τάσης περίπου 200-300 Volt στο λαμπτήρα ώστε να ξεκινήσει. Τα ηλεκτρομαγνητικά ballast προθέρμανσης είναι δυνατό να προκαλέσουν αναβόσβημα για λίγα δευτερόλεπτα προτού να ανάψουν τελικά το λαμπτήρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κάθοδος δεν έχει θερμανθεί πλήρως και δεν είναι δυνατό να υπάρξει εκκένωση με την παρεχόμενη τάση. Η παροχή τάσης πραγματοποιείται μέσω πηνίου επαγωγικά.

#### Στιγμιαία έναυση (instant start)

Τα ballast στιγμιαίας έναυσης αναπτύχθηκαν προκειμένου να πραγματοποιείται εκκίνηση λαμπτήρων χωρίς καθυστέρηση ή αναβόσβημα. Αντί της θέρμανσης των ηλεκτροδίων πριν την έναυση, τα ballast στιγμιαίας έναυσης παρέχουν μια υψηλή αρχική τάση, πάνω από 400 Volt, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκκίνηση του λαμπτήρα. Η υψηλή τάση είναι απαραίτητη για την εκκίνηση της εκκένωσης μεταξύ

των ψυχρών ηλεκτροδίων. Είναι επόμενο, όπως σε όλα τα συστήματα, ότι η τάση εκκένωσης δεν διατηρείται κατά τη λειτουργία, αλλά ελαττώνεται στην τιμή στην οποία έχει υπολογιστεί ότι εργάζεται το σύστημα. Τα ballast στιγμιαίας έναυσης δεν προβαίνουν στην παροχή επιπρόσθετης τάσης θέρμανσης ούτε πριν ούτε κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, με συνέπεια τα συστήματα στιγμιαίας έναυσης να έχουν χαμηλότερες ενεργειακές απώλειες από τα συστήματα γρήγορης έναυσης, αλλά οι λαμπτήρες οι οποίοι οδηγούνται από αυτά να παρουσιάζουν μικρότερη διάρκεια ζωής.

#### Γρήγορη έναυση (rapid start)

Για την παράταση της διάρκειας ζωής του λαμπτήρα και την εξάλειψη του αναβοσβήματός του (flashing), δημιουργήθηκαν τα ballast γρήγορης έναυσης. Τα συστήματα αυτά έχουν ένα ιδιαίτερο ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο παρέχει μία χαμηλή τάση (περίπου 3,5 Volt για τους λαμπτήρες τύπου T12 και T8 και μεγαλύτερη για τους λαμπτήρες τύπου T5) στα ηλεκτρόδια, θερμαίνοντάς τα περίπου στους 800 °C μέσα σε χρονικό διάστημα από 0,5 έως 2 δευτερόλεπτα. Η θέρμανση των ηλεκτροδίων προκαλεί μείωση της τιμής της τάσης η οποία είναι απαραίτητη για την εκκίνηση του λαμπτήρα. Κατά τη θέρμανση των ηλεκτροδίων τα ballast γρήγορης έναυσης εφαρμόζουν τάση 200-300 Volt για να εκκινήσει ο λαμπτήρας. Τα συστήματα αυτά διατηρούν την παροχή στα ηλεκτρόδια τάσης θέρμανσης ακόμη και μετά την έναυση του λαμπτήρα, γεγονός το οποίο απαιτεί 1,5–2 W επιπρόσθετης ισχύος για κάθε λαμπτήρα. Τα ballast γρήγορης έναυσης εκκινούν τους λαμπτήρες με μικρή καθυστέρηση αλλά δίχως αναβόσβημα.

#### Προγραμματισμένη έναυση (programmed start)

Οι κατασκευαστές αναπτύσσουν νέες τεχνολογίες γρήγορης έναυσης οι οποίες ελέγχουν αποδοτικότερα τη διαδικασία έναυσης, γεγονός το οποίο θα παρατείνει επιπλέον τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Οι νέες τεχνολογίες αυτές αποκαλούνται συστήματα προγραμματισμένης έναυσης (programmed-start) ή τροποποιημένης γρήγορης έναυσης (modified rapid-start) ή ελεγχόμενης γρήγορης έναυσης (controlled rapidstart). Τα ballast θερμαίνουν τα ηλεκτρόδια και εν συνεχεία δημιουργούν την εκκένωση με εφαρμογή της τάσης εκκίνησης η οποία είναι σχετικά χαμηλή. [13]

Το βασικό πλεονέκτημα των ηλεκτρονικών ballast έναντι των μαγνητικών αποτελεί η καλύτερη απόδοση των λαμπτήρων, η οποία επιτυγχάνεται στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας των ballast αυτών, σε σχέση με τη λειτουργία στη συχνότητα των 50 Hz.

Η διαφορά αυτή στην απόδοση είναι δυνατό να ξεπεράσει το 10 % και είναι ιδιαίτερα εμφανής στα πρώτα στάδια αύξησης της συχνότητας (μέχρι περίπου τα 20 kHz). [12]

Η αύξηση της απόδοσης των λαμπτήρων, κατά τη λειτουργία τους σε συνδυασμό με υψηλής συχνότητας ηλεκτρονικό ballast, οφείλεται κατά κύριο λόγο στη βελτίωση της ημιτονοειδούς μορφής της τάσης, η οποία επιτρέπει τη μείωση του ρεύματος το οποίο απαιτείται για την παραγωγή της ίδιας φωτεινής ροής. Η μικρότερη αυτή τιμή του ρεύματος επιφέρει τη μείωση των απωλειών στα ηλεκτρόδια του λαμπτήρα, χωρίς τη μεταβολή της παραγόμενης φωτεινής ροής. Για το λόγο αυτό και για να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας, οι λαμπτήρες φθορισμού οι οποίοι λειτουργούν με ηλεκτρονικά ballast, έχουν μικρότερη κατανάλωση ισχύος από την ονομαστική, ενώ εξακολουθούν να επιφέρουν την παραγωγή ίδιας ή και μεγαλύτερης φωτεινής ροής.

Υπολογίζεται ότι κατά τη λειτουργία δύο T-8 λαμπτήρων φθορισμού ισχύος 32 W με ηλεκτρονικό ballast, γίνεται εξοικονόμηση ισχύος 10 - 15 W, σε σύγκριση με τη λειτουργία με μαγνητικό ballast, ενώ η φωτεινή ροή αυξάνεται κατά περίπου 10-15 %.

Επομένως, καθίσταται εμφανές ότι η επιλογή της χρήσης ηλεκτρονικών ballast αντί των μαγνητικών, κάνει δυνατή την αύξηση της φωτεινής ροής η οποία παράγεται από μια διάταξη φωτιστικών και ταυτόχρονα τη μείωση της συνολικά καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με άμεση συνέπεια τη μείωση του κόστους λειτουργίας.

Η φωτεινή ροή η οποία παράγεται από έναν λαμπτήρα φθορισμού είναι μεταβαλλόμενη, εξαιτίας του εναλλασσόμενου ρεύματος λειτουργίας. Με τον όρο flicker ορίζεται η προκαλούμενη οπτική ενόχληση από τις διακυμάνσεις της φωτεινότητας των λαμπτήρων, εξαιτίας αντίστοιχων διακυμάνσεων της τάσης τροφοδοσίας τους.

Για έναν λαμπτήρα φθορισμού, ο οποίος λειτουργεί με μαγνητικό ballast, στη συχνότητα γραμμής (50 Hz στην Ελλάδα), οι φώσφοροι «ακτινοβολούν» 120 φορές το δευτερόλεπτο, προκαλώντας αντίστοιχη ταλάντωση της παραγόμενης φωτεινής ροής, με συχνότητα 120 Hz. Σε αυτή τη σχετικά χαμηλή συχνότητα, το flicker είναι υπύθυνο συχνά για την καταπόνηση της όρασης ή ακόμα και για πονοκεφάλους. Αντίθετα, η λειτουργία των ηλεκτρονικών ballast γίνεται σε πολύ υψηλότερες συχνότητες οι οποίες ξεπερνούν συνήθως τα 20 kHz, με συνέπεια οι φώσφοροι να ακτινοβολούν σε αυτή την περίπτωση περισσότερες από 40.000 φορές το

δευτερόλεπτο. Το γεγονός αυτό έχει συνήθως ως αποτέλεσμα η μεταβολή της φωτεινής ροής η οποία προκαλείται να μην γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι.

[12]

Για τη μέτρηση της πιθανής οπτικής ενόχλησης, η οποία προκαλείται από τη διακύμανση της φωτεινής ροής ενός λαμπτήρα, γίνεται χρήση του δείκτη flicker, οι τιμές του οποίου κυμαίνονται από 0,00 - 1,00. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη τόσο πιθανότερη είναι και η ύπαρξη flicker. Λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι λειτουργούν με μαγνητικό ballast, εμφανίζουν δείκτη flicker μεταξύ 0,04 και 0,07, ενώ αντίθετα, η λειτουργία με ηλεκτρονικό ballast εμφανίζει δείκτη flicker ο οποίος δεν ξεπερνάει τις περισσότερες περιπτώσεις το 0,01. [12] [14]

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας συνεπάγεται και αυξημένη πιθανότητα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Electromagnetic Interference, EMI). Η απόδοση ενός λαμπτήρα φθορισμού αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση της συχνότητας, μέχρι τα 20 kHz, αλλά για τιμές της συχνότητας λειτουργίας από 20 kHz μέχρι και 100 kHz ο ρυθμός αύξησης της απόδοσης είναι μειωμένος και η απόδοση παραμένει σχεδόν σταθερή. Για το λόγο αυτό και για τον περιορισμό τυχόν ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, η συχνότητα λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών ballast κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 20 kHz και 30 kHz. [12]

Όσον αφορά το χρόνο ζωής, τα μαγνητικά ballast εμφανίζουν διάρκεια ζωής περίπου 12 χρόνια, δηλαδή 20.000-30.000 ώρες ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού, ενώ η χρήση υλικών στερεάς κατάστασης στα ηλεκτρονικά ballast έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής. Κατά μέσο όρο, ένα τυπικό ηλεκτρονικό ballast έχει διάρκεια ζωής η οποία φτάνει τις 50.000 ώρες. Πρέπει επίσης να σημειωθεί το γεγονός ότι από τις δοκιμές οι οποίες γίνονται από τους κατασκευαστές, διαπιστώνεται ότι η συντριπτική πλειοψηφία των ηλεκτρονικών ballast τα οποία αποτυγχάνουν να φθάσουν τη μέση ονομαστική διάρκεια ζωής τους, διακόπτουν τη λειτουργία τους κατά τα πρώτα στάδια αυτής, ενώ αντίθετα η καμπύλη αποτυχίας των μαγνητικών ballast εμφανίζει μικρότερη διασπορά γύρω από τη μέση τιμή.

Οι τιμές αυτές δίδονται από τους κατασκευαστές και είναι δυνατό να μεταβληθούν σημαντικά αν οι συνθήκες λειτουργίας του ballast δεν είναι οι κατάλληλες, με κύριες αιτίες μεταβολής της διάρκειας ζωής ενός ballast την τάση εισόδου, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία λειτουργίας του ballast. Στα φύλλα δεδομένων του εκάστοτε ballast δίδονται πάντα οι επιτρεπτές τιμές για όλους τους παραπάνω



παράγοντες καθώς και οι τύποι λαμπτήρων που ενδείκνυνται για χρησιμοποίηση με το συγκεκριμένο ballast.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τα αρχικά στάδια κυκλοφορίας των ηλεκτρονικών ballast, πραγματοποιήθηκε η παρατήρηση ότι το ποσοστό πρόωρης διακοπής λειτουργίας ήταν ιδιαίτερα υψηλό. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της αντίληψης στους καταναλωτές ότι η νέα αυτή τεχνολογία είναι αναξιόπιστη, με αποτέλεσμα πολλοί να διστάζουν ακόμη και σήμερα να χρησιμοποιήσουν αυτού του είδους τα ballast παρά το γεγονός ότι έχει καταστεί κοινώς αποδεκτό ότι τα όποια προβλήματα έχουν πλέον, κατά βάση, ξεπεραστεί. [11] [12]

Εκτός αυτού, κατά τη λειτουργία ενός μαγνητικού ballast, προκαλείται μερικές φορές ακουστικός θόρυβος, με τη μορφή βόμβου, εξαιτίας της δόνησης των ελασμάτων του μαγνητικού πυρήνα. Τα ηλεκτρονικά ballast σπανίως εμφανίζουν παρόμοια προβλήματα λόγω των διαφορετικών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους αλλά και της υψηλότερης συχνότητας λειτουργίας. Η ένταση του θορύβου, η οποία παράγεται κατά τη λειτουργία ενός ballast, εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως η κατασκευή του ballast, ο αριθμός και η απόσταση μεταξύ των ballast και των φωτιστικών ή ακόμα και τα ακουστικά χαρακτηριστικά και η χρήση του χώρου εγκατάστασης.

Τα ηλεκτρονικά ballast είναι δυνατό να κατασκευαστούν σε μικρότερες διαστάσεις από τα αντίστοιχα μαγνητικά, αλλά για τις περιπτώσεις λαμπτήρων οι οποίοι είναι δυνατό να λειτουργήσουν τόσο με ηλεκτρονικό όσο και με μαγνητικό ballast (π.χ. T-8), και τα δύο είδη ballast κατασκευάζονται με τις ίδιες ακριβώς διαστάσεις με σκοπό να απλοποιηθεί η αντικατάσταση. Επίσης, η πλειοψηφία των ηλεκτρονικών ballast έχει και μικρότερο βάρος σε σχέση με τα μαγνητικά. [12] [8]

Από όλα τα ανωτέρω, είναι εμφανές το γεγονός ότι τα ηλεκτρονικά ballast υπερτερούν σημαντικά των μαγνητικών σε όλους τους τομείς. Το μειονέκτημα το οποίο εμφανίζουν τα ηλεκτρονικά ballast είναι το υψηλό κόστος κατασκευής τους, λόγω των ακριβών υλικών και της προηγμένη τεχνολογία η οποία απαιτείται για την κατασκευή τους, καθώς υπολογίζεται ότι ένα ηλεκτρονικό ballast είναι περίπου 6 φορές ακριβότερο από το αντίστοιχο μαγνητικό. Το μειονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από τον υπερδιπλάσιο χρόνο ζωής, τα υψηλά ενεργειακά οφέλη και την σημαντική αύξηση της παραγόμενης φωτεινής ροής. Εκτός αυτού η ικανότητα των ηλεκτρονικών ballast να χειρίζονται ταυτόχρονα μέχρι και 4 λαμπτήρες

φθορισμού (ενώ τα μαγνητικά μόνο 2) αποτελεί ένα πρόσθετο οικονομικό πλεονέκτημα.

Επομένως, η χρήση ηλεκτρονικών ballast αντί για μαγνητικά, εκτός από τα καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά (flicker, θόρυβος, μέγεθος κλπ) τα οποία επιφέρει, είναι και οικονομικά αποδοτικότερη. Όπως και είναι αναμενομενόμενο με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν, η αγορά των ηλεκτρονικών ballast αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία έτη και στα προηγμένα τεχνολογικά κράτη τείνει να αντικαταστήσει εξ ολοκλήρου αυτή των μαγνητικών. [14] [12] [13] [11]

Για την επιλογή ενός ηλεκτρονικού ballast υπάρχουν τα εξής κριτήρια σύμφωνα με το NLPIP [17]:

- Μέθοδος έναυσης. Δύο μέθοδοι έναυσης χρησιμοποιούνται κυρίως με ηλεκτρονικό ballast, η γρήγορη έναυση (rapid start) και η στιγμιαία έναυση (instant start).
- Ballast factor. Ο συντελεστής ballast είναι ο λόγος της φωτιστικής απόδοσης του λαμπτήρα όταν λειτουργεί με το συγκεκριμένο ballast προς τη φωτιστική απόδοση του λαμπτήρα όταν λειτουργεί με ένα ballast αναφοράς.
- Συντελεστής Ισχύος και Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD). Ο συντελεστής ισχύος εκφράζει την άεργο ισχύ, η οποία είναι ανεπιθύμητη, την οποία καταναλώνει το ballast, με τις τιμές του συντελεστή ισχύος να είναι ικανοποιητικές όταν είναι μεγαλύτερες από 0,9. Ο Συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD) εκφράζει ποσοτικά πόσο παραμορφωμένη είναι η τάση και το ρεύμα το οποίο εγχέει το ballast στο δίκτυο. Υψηλός THD συνεπάγεται μείωση του συντελεστή ισχύος, παρεμβολές σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές και διαταραχές στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι συνήθειες προδιαγραφές απαιτούν THD του ρεύματος να είναι μικρότερο του 32%, με τα πλέον ποιοτικά ballast να έχουν THD <5%.
- Συμβατότητα ballast -Λαμπτήρα. Οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για ballast για την επίτευξη βέλτιστων χαρακτηριστικών λειτουργίας και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής. Επομένως κάθε τύπος λαμπτήρα είναι συμβατός με συγκεκριμένα ballast. Ασύμβατα ballast είναι δυνατόν να προκαλέσουν κακή εκκίνηση και μειωμένο χρόνο ζωής.

- Αρχικό ρεύμα (inrush current). Το αρχικό ρεύμα είναι ένα στιγμιαίο ρεύμα το οποίο παρουσιάζεται όταν ξεκινά τη λειτουργία της μια ηλεκτρονική συσκευή. Η διάρκειά του είναι μικρότερη από 3ms. Το αρχικό ρεύμα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή του ballast έτσι ώστε να μη προκληθεί άνοιγμα των διακοπών προστασίας και των ασφαλειών του κυκλώματος.
- Αξιοπιστία του ballast. Η εγγύηση την οποία δίνουν οι κατασκευαστές είναι 3-5 έτη, με την αξιοπιστία του ballast να εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον παράμετροι της αξιοπιστίας αποτελούν η αντοχή τους σε υπερτάσεις και μεταβατικές καταστάσεις.

### 1.2.3 Συμπαγείς Λαμπτήρες Φθορισμού (CFL)

Μία ειδική κατηγορία λαμπτήρων φθορισμού αποτελούν οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού. Οι λαμπτήρες αυτοί έκαναν την εμφάνισή τους κατά τη δεκαετία του 1980 και αποτελούν ένα νέο τύπο λαμπτήρα, οι οποίοι κατά το παρελθόν αντικατέστησαν μαζικά τους πολύ υποδεέστερους ενεργειακά λαμπτήρες πυρακτώσεως. Ο τρόπος λειτουργίας τους παρουσιάζει ομοιότητα με αυτόν των λαμπτήρων φθορισμού καθώς η παραγωγή φωτός επιτυγχάνεται από την εκκένωση των ατμών υδραργύρου οι οποίοι βρίσκονται στο εσωτερικό του λαμπτήρα. Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού έχουν μικρότερο μέγεθος σε σχέση με τους σωληνωτούς λαμπτήρες φθορισμού και εμφανίζουν ανάλογα φωτοτεχνικά χαρακτηριστικά. Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού είναι δυνατό να λειτουργήσουν σε οποιαδήποτε θέση έναυσης . [9]

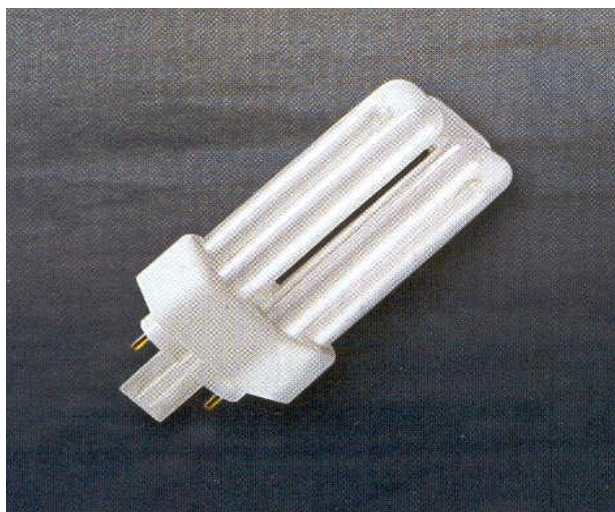


Εικόνα 1-29: Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού με ενσωματωμένη ηλεκτρονική έναυση

[9]

Οι εμπορικά διαθέσιμοι τύποι συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τους συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με κάλυκα βιδωτό ή μπαγιονετ για άμεση τοποθέτηση σε αντίστοιχη λυχνολαβή 230 V. Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού αυτοί διαθέτουν ενσωματωμένο ηλεκτρονικό ballast και είναι δυνατό να αντικαταστήσουν τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, όμως χαρακτηρίζονται από το μειονέκτημα ότι με τη φθορά του λαμπτήρα είναι απαραίτητο να αντικατασταθεί και η διάταξη έναυσης.
- Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με κάλυκα δύο ακίδων και ενσωματωμένο εκκινήτη για σύνδεση σε ειδική λυχνολαβή με εξωτερικό μαγνητικό ballast.
- Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με κάλυκα τεσσάρων ακίδων για σύνδεση σε ειδική λυχνολαβή με εξωτερικό ηλεκτρονικό ballast. Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού της τελευταίας κατηγορίας είναι κατάλληλοι για διαβάθμιση φωτισμού.

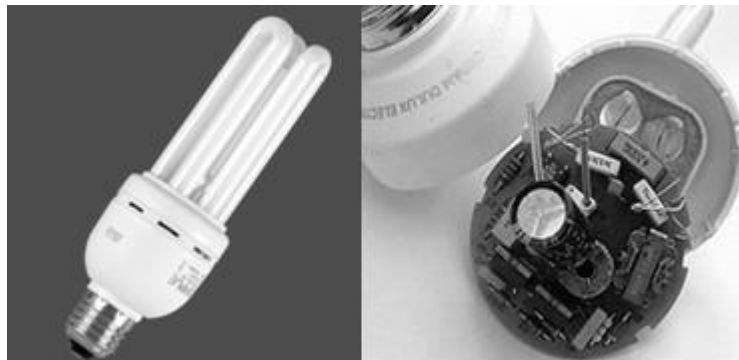


*Εικόνα 1-30: Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού για σύνδεση σε εξωτερικό μαγνητικό ballast [9]*



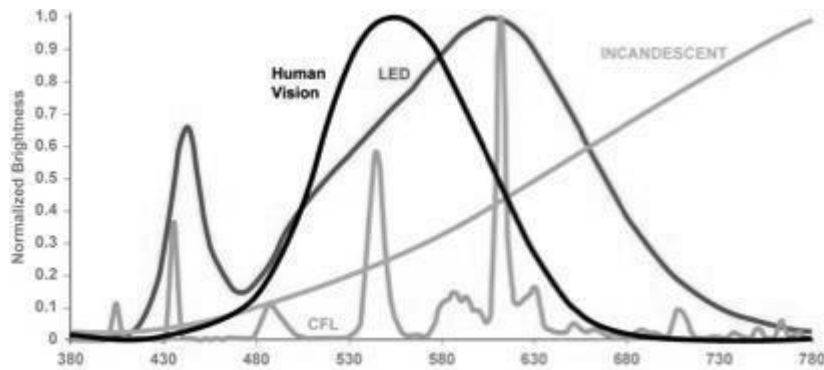
*Εικόνα 1-31: Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού για σύνδεση σε εξωτερικό ηλεκτρονικό ballast [9]*

Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού κατηγοριοποιούνται επίσης σύμφωνα με τη λειτουργία του ballast τα οποία διαθέτουν σε ηλεκτρονικής και ηλεκτρομαγνητικής έναυσης λαμπτήρες. Οι λαμπτήρες με ηλεκτρονική έναυση και εξωτερικό ηλεκτρονικό ballast υπερτερούν των ηλεκτρομαγνητικών λαμπτήρων στο γεγονός ότι διαθέτουν τη δυνατότητα διαβάθμισης του φωτισμού, παρουσιάζουν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα.



*Εικόνα 1-32: Εικόνες λαμπτήρα CFL εξωτερικά και το αντίστοιχο εσωτερικό κύκλωμα με ενσωματωμένο ballast [18]*

Όσον αφορά την απόδοση, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού μεταξύ 9-15Watt παρουσιάζουν απόδοση 65 lumen/watt, ενώ σε επίπεδα ισχύος 40 watt παρατηρείται βελτίωση της απόδοσης με τιμές 80 lumen/watt. Στο εμπόριο έχουν καθιερωθεί ως επί το πλείστον συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού ισχύος 26 watt με τυπική φωτεινή ροή πλησιών των 1800 lumen. Οι τιμές CRI για τους συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού κυμαίνονται μεταξύ 80 και 90. [18]



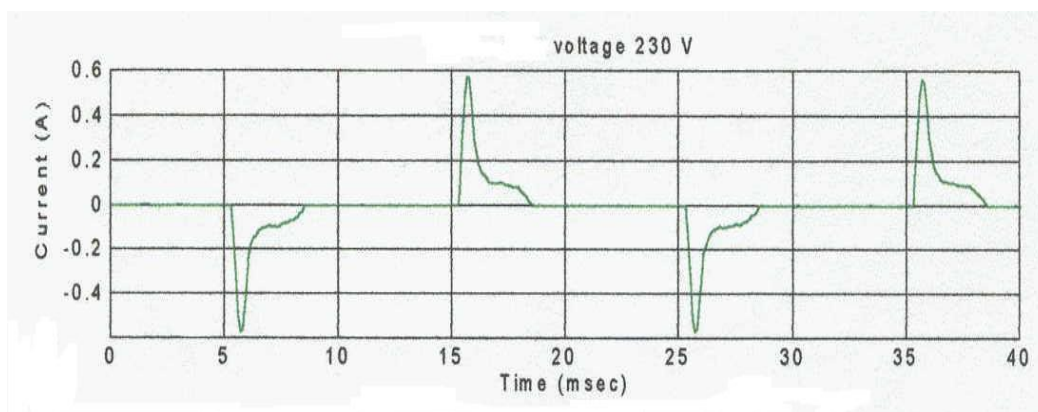
*Εικόνα 1-33: Φάσματα λαμπτήρων CFL, LED, πυρακτώσεως και απόκριση ανθρώπινου οφθαλμού [18]*

Στο σχήμα 1-33 παρουσιάζεται το φάσμα των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού. Όπως προκύπτει η τεχνολογία των λαμπτήρων CFL παρουσιάζει αρκετά κενά και σχετικά φτωχό φάσμα. Τα διάφορα ακρότατα τα οποία εμφανίζονται με την μορφή αιχμών στο διάγραμμα όμως βρίσκονται σε καίριες θέσεις με αποτέλεσμα να συντίθεται τα βασικά χρώματα. Επομένως, παρατηρείται μια αιχμή κοντά στο κίτρινο και τα 540nm στο σημείο όπου αποκρίνεται καλύτερα ο ανθρώπινος οφθαλμός. Αναλόγως παρατηρείται μια μεγάλη αιχμή λίγο πριν το ερυθρό το οποίο περιβάλλεται από κορυφές με μικρότερες τιμές οι οποίες εμπλουτίζουν σημαντικά το φάσμα. Τέλος, παρατηρούνται και κάποια ακρότατα στο ιώδες, κοντά στα 500nm. Από το διάγραμμα διακρίνεται και ένα μεγάλο ποσοστό το οποίο βρίσκεται στην θέση του υπεριώδους και προφανώς αντιστοιχεί σε φωτόνια τα οποία δεν έχουν διεγείρει άτομα της πούδρας φωσφόρου η οποία είναι τοποθετημένη στην εσωτερική επιφάνεια του λαμπτήρα. Όπως παρατηρείται, οι στάθμες διέγερσης παρουσιάζονται κβαντισμένες με αποτέλεσμα να προκαλούν μια καμπύλη αυτής της μορφής. [18]

Η διάρκεια ζωής των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού κυμαίνεται μεταξύ 15000 και 20000 ωρών, αλλά μειώνεται ανάλογα με την χρήση, την θερμοκρασία και τον τρόπο τροφοδοσίας. Επιπλέον, όπως ισχύει και στους σωληνωτούς λαμπτήρες, σε κάποια μοντέλα υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου έντασης φωτεινής ροής και η εύκολη συνεργασία με συστήματα ελέγχου και ρυθμιζόμενης έντασης.

Η εκτεταμένη χρήση των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού προκαλεί προβλήματα στην ποιότητα ισχύος του δικτύου. Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρονική έναυση προκαλούν αρμονική παραμόρφωση στην τάση του δικτύου λόγω του παραμορφωμένου ρεύματος το οποίο εκπέμπουν στο δίκτυο. Οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρονική έναυση αποτελούν ένα έντονα μη γραμμικό

φορτίο δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στην ποιότητα ισχύος των ηλεκτρικών δικτύων. Σε αντίθεση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, οι οποίοι αποτελούν ένα καθαρά ωμικό φορτίο, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού διαρρέονται από έντονα παραμορφωμένο ρεύμα ακόμη και κατά την τροφοδοσία τους με καθαρά ημιτονική τάση. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται μια τυπική κυματομορφή ρεύματος από συμπαγή λαμπτήρα φθορισμού τροφοδοτούμενο με καθαρό ημίτονο τάσης 230V, 50 Hz.



Εικόνα 1-34: Παραμορφωμένο ρεύμα συμπαγούς λαμπτήρα φθορισμού [9]

Όπως είναι εμφανές από το παραπάνω σχήμα οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού χαρακτηρίζονται από ρεύματα με υψηλό φασματικό περιεχόμενο σε αρμονικές ανώτερης τάξης. Μάλιστα είναι χαρακτηριστικό ότι ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος υπερβαίνει το 100%. Λόγω των εκπομπών αρμονικών ανώτερης τάξης από τους συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού είναι δυνατό να έχουμε σημαντική παραμόρφωση της τάσης των καταναλωτών και για το λόγο αυτό είναι περιορισμένη η χρήση τους.

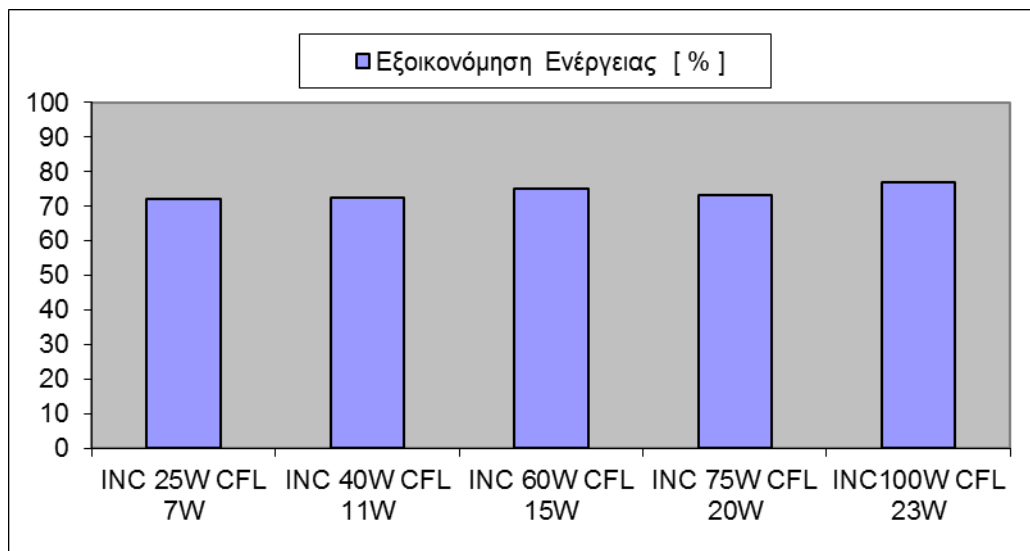
Επιπρόσθετα οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού χαρακτηρίζονται και από πολύ χαμηλό συντελεστή ισχύος γεγονός το οποίο επιβαρύνει τα δίκτυα διανομής με άεργο ισχύ και επιβάλλει τη χρήση μέσων αντιστάθμισης. Η τιμή του συντελεστή ισχύος των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού είναι της τάξης του 0,5. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκτός από την άεργο ισχύ την οποία καταναλώνουν οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού σημαντικό μέρος ενέργειας την οποία απορροφούν μετατρέπεται σε ισχύ αρμονικής παραμόρφωσης (Distortion Power).

Εκτός αυτού, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρονική έναυση μειονεκτούν στο γεγονός ότι έχουν μεγαλύτερη τιμή αγοράς σε σύγκριση με τους κοινούς λαμπτήρες πυρακτώσεως.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού έναντι των κοινών λαμπτήρων πυρακτώσεως αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας και η οικονομικότερη λειτουργία τους. Με βάση την ενεργειακή κατανάλωση των εκάστοτε λαμπτήρων ποαρατίθεται στον παρακάτω πίνακα η εξοικονόμηση ενέργειας από την εναλλακτική χρήση των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού εκφρασμένη σε ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος των λαμπτήρων πυρακτώσεως. [9]

Κοινός λαμπτήρας πυρακτώσεως ( W )	Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού ( W )	Εξοικονόμηση ενέργειας ( % )
25	7	72.0
40	11	72.5
60	15	75.0
75	20	73.3
100	23	77.0

Πίνακας 1-4: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού [9]



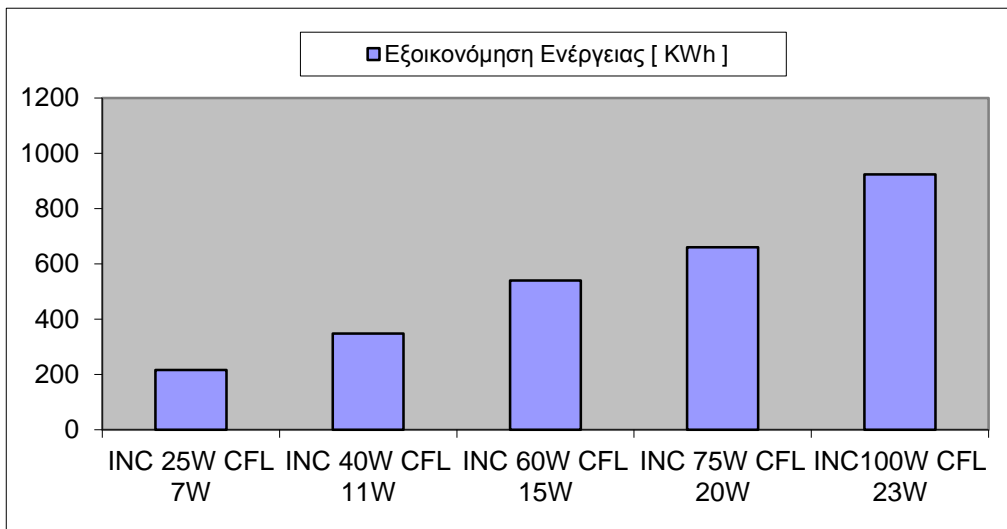
Εικόνα 1-35: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού [9]

Επί παραδείγματι, η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε μεμονωμένο λαμπτήρα σε χρονική διάρκεια όσο ο χρόνος ζωής του λαμπτήρα (12.000 ώρες ) είναι:

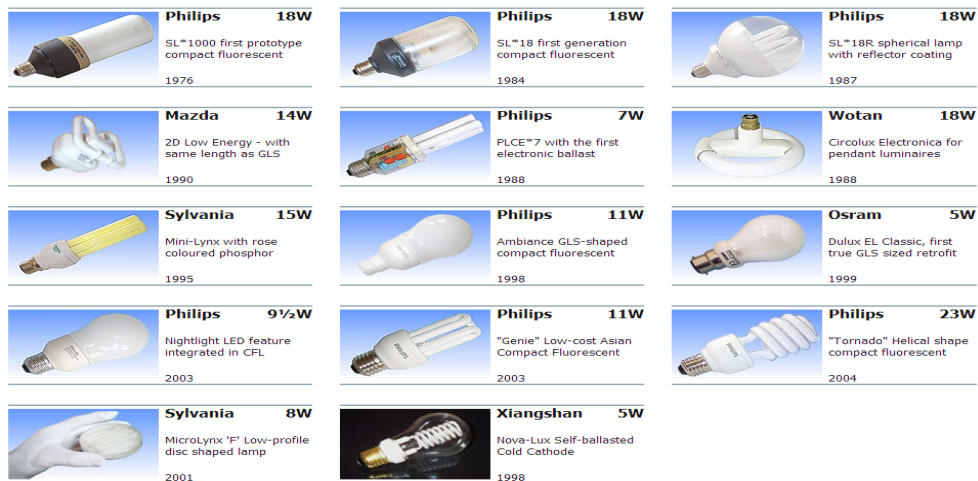


Κοινός λαμπτήρας πυρακτώσεως ( W )	Συμπαγής λαμπτήρας φθορισμού ( W )	Εξοικονόμηση ενέργειας ( KWh )
25	7	216
40	11	348
60	15	540
75	20	660
100	23	924

Πίνακας 1-5: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού για 12.000 ώρες [9]



Εικόνα 1-36: Εξοικονόμηση ενέργειας συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού για 12.000 ώρες [9]

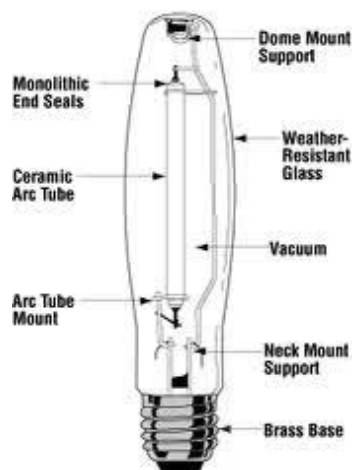


Εικόνα 1-37: Υλοποιήσεις συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού [8]

## 1.2.4 Λαμπτήρες Νατρίου Υψηλής και Χαμηλής Πίεσης

### 1.2.4.1 Λαμπτήρες Νατρίου Υψηλής Πίεσης

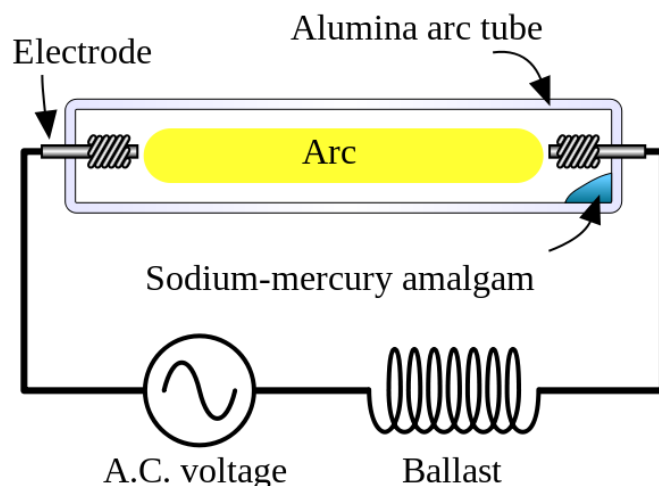
Οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης (High Pressure Sodium - HPS) βασίζουν τη λειτουργία τους στην παραγωγή φωτός με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο διαρρέει τους ατμούς νατρίου. Οι λαμπτήρες αυτοί είναι κατασκευασμένοι με δυο σωλήνες, ο ένας μέσα στον άλλον. Η κατασκευή του εσωτερικού σωλήνα πραγματοποιείται από πολυκρυσταλλική αλουμίνα, η οποία είναι ανθεκτική στο νάτριο σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει υψηλό σημείο τήξης. Η πολυκρυσταλλική αλουμίνα είναι διαφανής και παρέχει μεγάλη απόδοση εκπομπής φωτός (άνω του 90%). Η κατασκευή ενός λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης δίδεται στο σχήμα 1-38.



Εικόνα 1-38: Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης [19]

Η πολυκρυσταλλική αλουμίνα δεν είναι δυνατό να λιώσει δίχως να σπάσει και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο σφράγισμα το οποίο είναι δυνατό να είναι κατασκευασμένο είτε από γυαλί είτε από ατσάλι. Τα υλικά αυτά προσδίδουν στην αλουμίνα μεγάλη αντοχή στο νάτριο υψηλής θερμοκρασίας, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και κεραμικό σφράγισμα. Ως αέριο έναυσης περιέχεται στον σωλήνα ξένο, καθώς και ένα μίγμα νατρίου και υδραργύρου, το οποίο καθίσταται μερικώς ατμοποιημένο κατά την λειτουργία του λαμπτήρα. Ο υδράργυρος λειτουργεί ως αέριο απομόνωσης και αυξάνει την πίεση και την τάση λειτουργίας του λαμπτήρα.

Το εξωτερικό γυάλινο κάλυμμα είναι κενό και ο σκοπός του είναι η αποτροπή της αντίδρασης των μεταλλικών μερών του εσωτερικού σωλήνα, και η διατήρηση της θερμοκρασίας του, μέσω της απομόνωσης του από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 1-39: Διάγραμμα λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης [11]

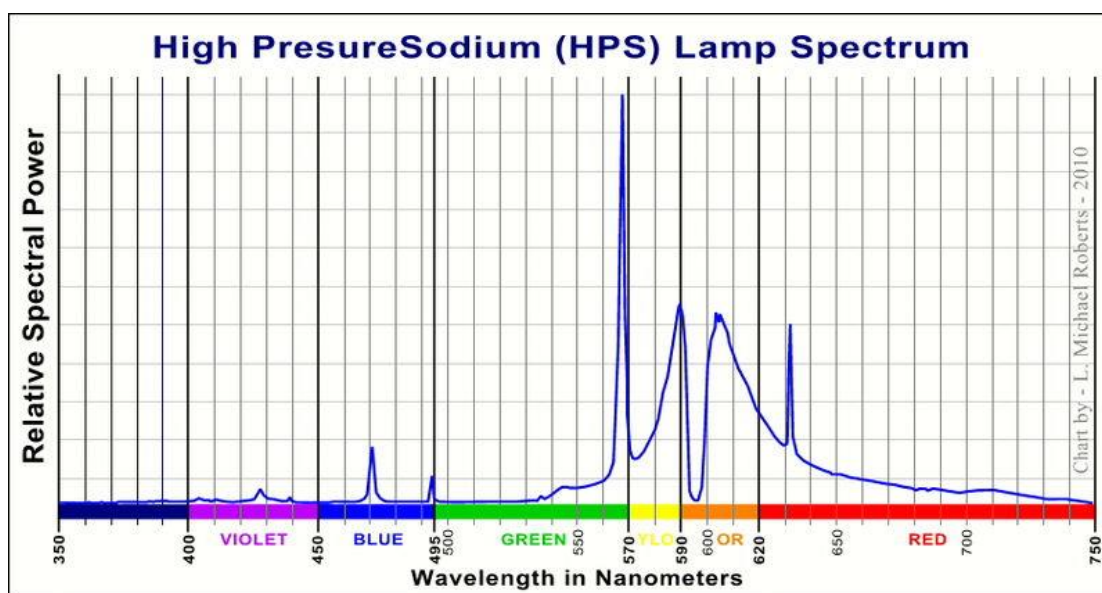
Λόγω της μικρής διαμέτρου των σωλήνων των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης, δεν είναι δυνατό να τοποθετηθεί ηλεκτρόδιο έναυσης εντός του σωλήνα με αποτέλεσμα ο λαμπτήρας να τροφοδοτείται με παλμό υψηλής συχνότητας. Επίσης υπάρχουν ειδικοί λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα ειδικό μίγμα αερίων έναυσης το οποίο αποτελεί συνδυασμό από αργό και νέο και απαιτεί χαμηλότερη τάση έναυσης σε σχέση με αυτή την οποία θα απαιτούσε κάθε αέριο χωριστά. [2] [8] [11] [19] [16] [15] [20]

Η απουσία ηλεκτρόδιου έναυσης από τον λαμπτήρα ατμών νατρίου υψηλής πίεσης απαιτεί τη χρήση ενός παλμού υψηλής τάσης και συχνότητας ο οποίος ιονίζει το ξένο, το οποίο είναι το αέριο έναυσης. Μετά την έναρξη λειτουργίας, ο λαμπτήρας θερμαίνεται έως ότου επιτύχει τη μέγιστη απόδοση του. Η διάρκεια της διαδικασίας αυτής είναι περίπου δέκα λεπτά, και το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός κατά τη διαδικασία αυτή μεταβάλλεται έως ότου να σταθεροποιηθεί.

Η τάση των λαμπτήρων ατμών νατρίου υψηλής πίεσης μεταβάλλεται με την ισχύ και για το λόγο αυτό οι παράμετροι λειτουργίας έχουν καθοριστεί για μέγιστη και ελάχιστη ισχύ. Για την επίτευξη της έναυσης του τόξου, απαιτείται ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα έναυσης το οποίο τροφοδοτεί ένα παλμό τάσης και ευθύνεται για την παραγωγή περίπου 4000V πλάτος τάσης για ένα λαμπτήρα 1000W και 2500V πλάτος τάσης για λαμπτήρες άλλης ισχύος, με συχνότητα τουλάχιστον μια φορά για κάθε κύκλο στα 60Hz έως ότου να λειτουργήσει ο λαμπτήρας.

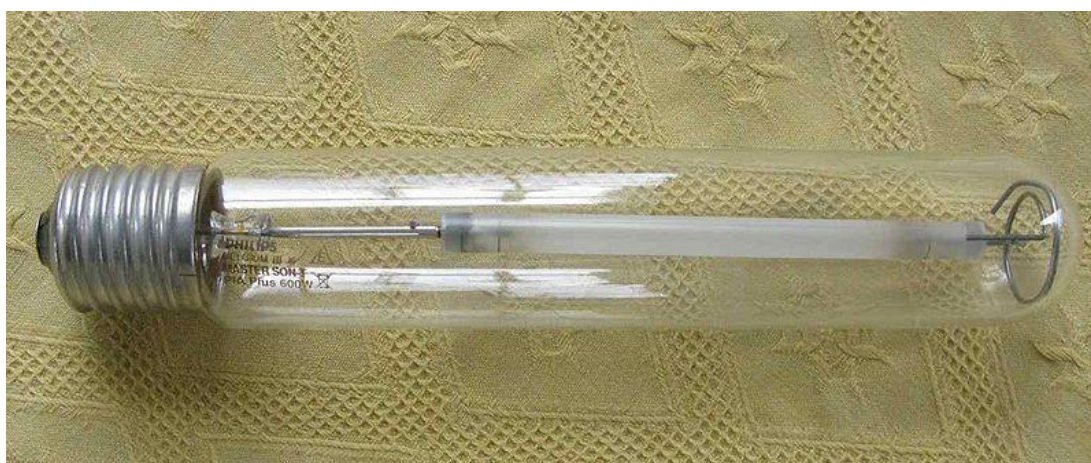
Η ακτινοβολία την οποία εκπέμπουν οι λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης τοποθετείται σε όλο το ορατό φάσμα, εν αντιθέσει με τους λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης οι οποίοι εκπέμπουν κυρίως στα 589 nm όπως θα αναλυθεί και

παρακάτω. Η αύξηση της πίεσης του νατρίου, προκαλεί αύξηση του ποσοστού της ακτινοβολίας σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Η αύξηση της πίεσης του νατρίου έχει ως αρνητική συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής και της απόδοσης.



Εικόνα 1-40: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης [11]

Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου υψηλής πίεσης διαθέτουν ηλεκτρόδια παρόμοια με τα ηλεκτρόδια τα οποία χρησιμοποιούνται στους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου. Το γεγονός αυτό, συνοδευόμενο και από τη μικρότερη διάμετρο του τόξου του λαμπτήρα έχει ως αποτέλεσμα πολύ καλή διατήρηση των lumen για τους λαμπτήρες ατμών νατρίου.



Εικόνα 1-41: Λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης Philips SON-T Master 600 W [11]

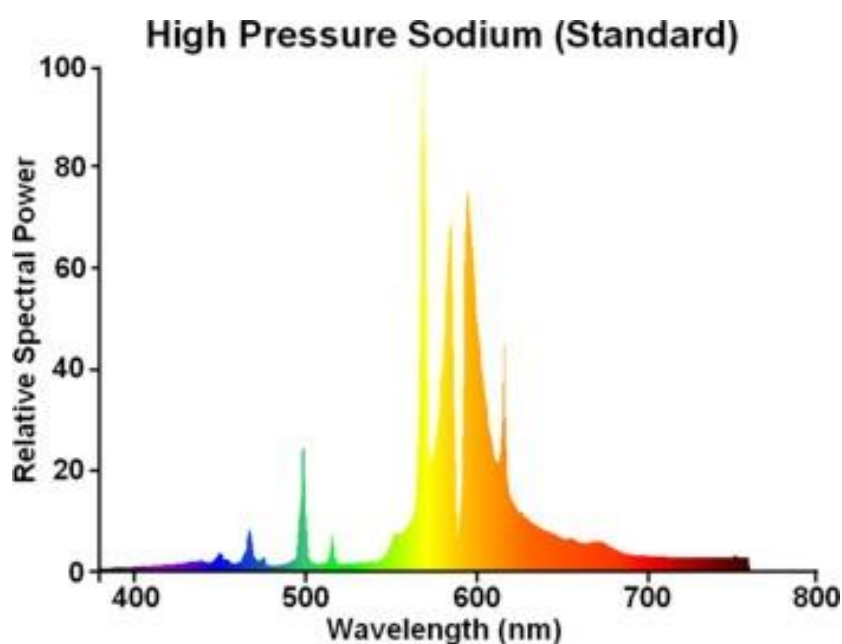
Η διάρκεια ζωής λαμπτήρων ατμών νατρίου υψηλής πίεσης αντιμετωπίζει το πρόβλημα της αργής αύξησης της τάσης του λαμπτήρα η οποία επιδρά αρνητικά στην διάρκεια ζωής τους. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από το μαύρισμα του γυαλιού εξαιτίας των εκπομπών του ηλεκτροδίου. Το μαύρισμα αυτό απορροφά ακτινοβολία,

η οποία θερμαίνει τα άκρα του γυάλινου περιβλήματος και έχει ως αποτέλεσμα την εξάτμιση επιπρόσθετης ποσότητας νατρίου. Κατά συνέπεια παρατηρείται αύξηση της πίεσης και εν συνεχεία της τάσης. Η αύξηση της τάσης οφείλεται επίσης και σε άλλες αιτίες όπως η διάχυση του νατρίου από τα στεγανοποιημένα άκρα του σωλήνα και η είσοδος σκόνης και ακαθαρσιών εντός του σωλήνα.

Η αδυναμία τροφοδότησης επαρκούς τάσης για την επανέναυση του τόξου κατά την διάρκεια κάθε μισού ηλεκτρικού κύκλου από το ballast (στραγγαλιστικό πηνίο) έχει ως αποτέλεσμα το σβήσιμο του λαμπτήρα. Η πτώση της θερμοκρασίας θα καταστήσει δυνατή την εκ νέου λειτουργία και την θέρμανση μέχρι το σημείο στο οποίο η τάση θα αυξηθεί τόσο που το στραγγαλιστικό πηνίο δεν θα είναι δυνατό να την υποστηρίξει. Ο χρόνος ζωής των λαμπτήρων ατμών νατρίου υψηλής πίεσης είναι περίπου 24.000 ώρες και ο χρόνος αυτός μεταβάλλεται ανάλογα με την υλοποίηση του εκάστοτε κατασκευαστή. [2] [8] [11] [16] [15] [20]

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης είναι το μοντέλο SHP-Standby with dual arc tubes for hot restrike της Sylvania.

Το φάσμα ακτινοβολίας του λαμπτήρα αυτού είναι το εξής:



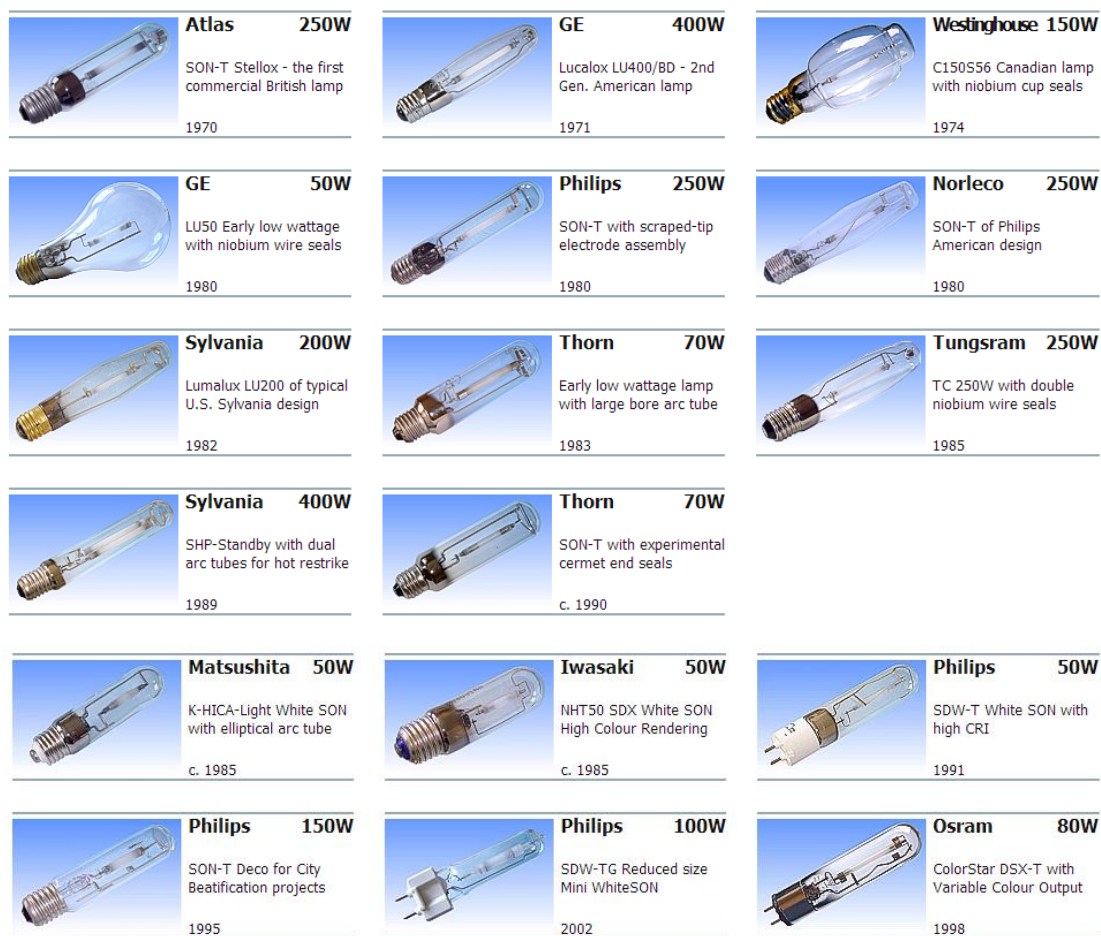
Εικόνα 1-42: Φάσμα ακτινοβολίας SHP-Standby with dual arc tubes for hot restrike

[8]

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του λαμπτήρα αυτού δίδονται στον παρακάτω πίνακα: [8]

<b>Manufacturer:</b>	<b>GTE Sylvania</b>	
<b>Lamp Power:</b>	392 Watts	
<b>Lamp Current:</b>	4.65 Amps	
<b>Lamp Voltage:</b>	100 Volts	
<b>Cap Type:</b>	E40s/45	Ni plated brass + vitrite
<b>Bulb Finish:</b>	Clear	Hard glass
<b>Bulb Type:</b>	T-46	T-14½ in eighths/inch
<b>Overall Length:</b>	280 mm	11 inches
<b>Light Centre Length:</b>	175 mm	6¾ inches
<b>Arc Length:</b>		
<b>Electrodes:</b>	Backwound Tungsten	Barium Calcium Tungstate
<b>Atmosphere:</b>	Na,Hg   Xe	Outer: Hard Vacuum
<b>Luminous Flux:</b>	48,000 lm (@ 100 hrs)	47,000 lm (@ 14,000hrs)
<b>Luminous Efficacy:</b>	120.0 lm/W (@ 100 hrs)	117.5 lm/W (@ 14,000hrs)
<b>Colour Temperature &amp; CRI:</b>	CCT: 2050K	CRI: Ra 25
<b>Chromaticity Co-ordinates:</b>	CCx: 0.520	CCy: 0.420
<b>Burning Position:</b>	Universal	
<b>Rated Lifetime:</b>	28,000 hours	to 70% survival
<b>Warm-up &amp; Re-strike Time:</b>	5 minutes	Instantaneous restrike
<b>Factory:</b>	Arc Tubes: Shipley, UK	Lamp: Tienen, Belgium
<b>Date of Manufacture:</b>	1988	
<b>Original &amp; Present Value:</b>	£60.13 (1989)	£100.22 (2005)

*Πίνακας 1-6: Χαρακτηριστικά λειτουργίας SHP-Standby with dual arc tubes for hot restrike [8]*



Εικόνα 1-43: Υλοποιήσεις λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης [8]

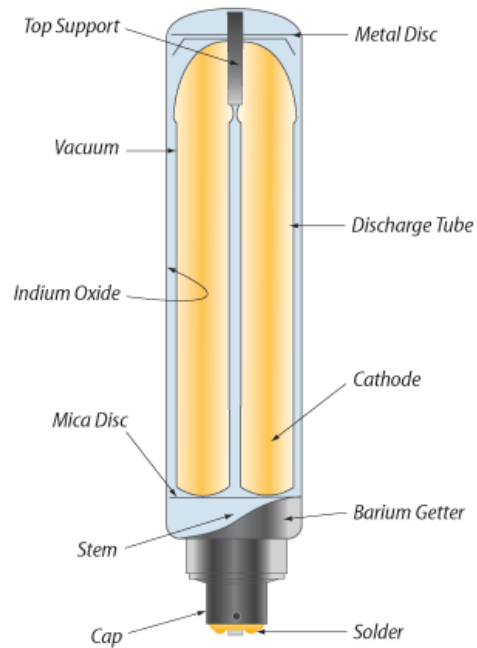
#### 1.2.4.2 Λαμπτήρες Νατρίου Χαμηλής Πίεσης

Τα εμπορικά διαθέσιμα είδη λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης είναι το επίμηκες και ο λαμπτήρας σε σχήμα U. Ο επιμήκης λαμπτήρας περιλαμβάνει σωλήνα εκκένωσης με δυο άκρα, με καλά σφραγισμένα ηλεκτρόδια σε κάθε άκρο. Ο σωλήνας εκκένωσης του είναι κατασκευασμένος από ειδικό γυαλί, το οποίο είναι ανθεκτικό στο νάτριο και είναι καλυμμένος από ένα εξωτερικό περίβλημα μέσα στο οποίο υπάρχει κενό. Ο τύπος U περιλαμβάνει τον σωλήνα εκκένωσης αναδιπλωμένο σε σχήμα φουρκέτας με τα άκρα του να είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο.

Τα εμπορικά διαθέσιμα είδη λαμπτήρα νατρίου χαμηλής πίεσης του τύπου U είναι δυνατό να βασίζονται σε δυο διαφορετικές μεθόδους διατήρησης ομοιόμορφης κατανομής του νατρίου στο σωλήνα εκκένωσης. Η ύπαρξη μεταλλικού νατρίου στους λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης σημαίνει ότι το μέταλλο τείνει να

στερεοποιηθεί στα ψυχρότερα σημεία του σωλήνα τα οποία βρίσκονται στην περιοχή αναδίπλωσης του.

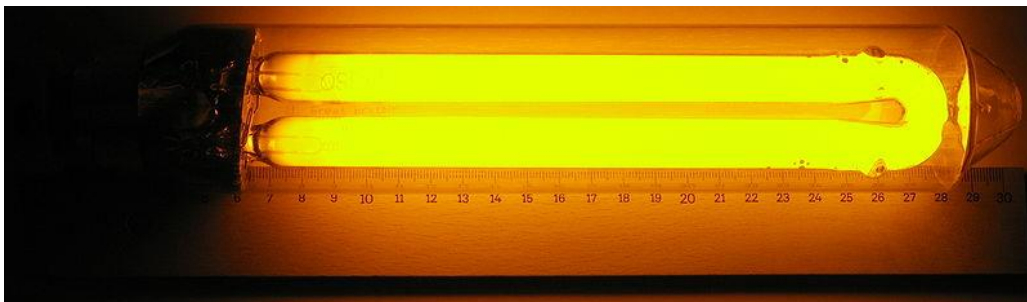
#### Low-Pressure Sodium



*Εικόνα 1-44: Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης [2]*

Ο έλεγχος του φαινομένου αυτού είναι απαραίτητος καθώς είναι δυνατό το συσσωρευμένο νάτριο στα ψυχρά σημεία να οδηγήσει σε σχηματισμό τμημάτων τόξου νέου και αργού λόγω του γεγονότος ότι δεν θα υπάρχει επαρκές ατμοποιημένο νάτριο. Υπάρχουν δυο τρόποι ελέγχου του φαινομένου:

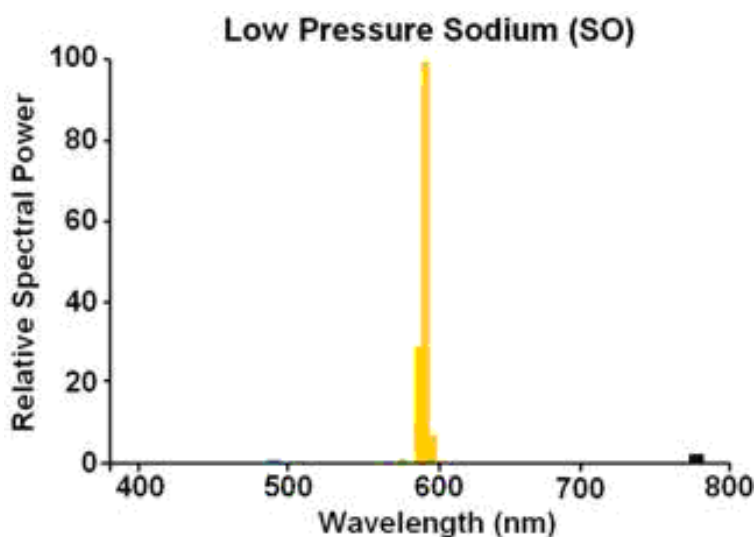
- Η κατασκευή λακκακίων στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα εκκένωσης με σκοπό τη δημιουργία εναλλακτικών ψυχρών σημείων τα οποία είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανομημένα.
- Η χρήση ενός θερμοανακλαστικού φιλμ κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού περιβλήματος.



*Εικόνα 1-45: Λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσης σε λειτουργία [11]*



Στους λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης η δημιουργία του τόξου οφείλεται στο αεριοποιημένο νάτριο. Το φως το οποίο παράγεται από το τόξο νατρίου χαμηλής πίεσης είναι σχεδόν μονοχρωματικό και αποτελείται από μια διπλή γραμμή κοντά στο κέντρο του ορατού φάσματος στα 589,0 και 589,6 nm. Το αέριο έναυσης είναι το νέο, με μικρά πρόσθετα αργού, ξένου ή ηλίου. Για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος σε φωτεινή ροή, η πίεση του νατρίου είναι απαραίτητο να είναι της τάξεως των 0,7Pa, η οποία αντιστοιχεί σε θερμοκρασία του τοιχώματος του σωλήνος εκκένωσης περίπου 260 °C. Πιθανή απόκλιση από την προαναφερθείσα πίεση είναι δυνατό να επηρεάσει την απόδοση. Για την διατήρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας για την συγκεκριμένη πίεση, ο σωλήνας εκκένωσης, συνήθως βρίσκεται εν κενό.

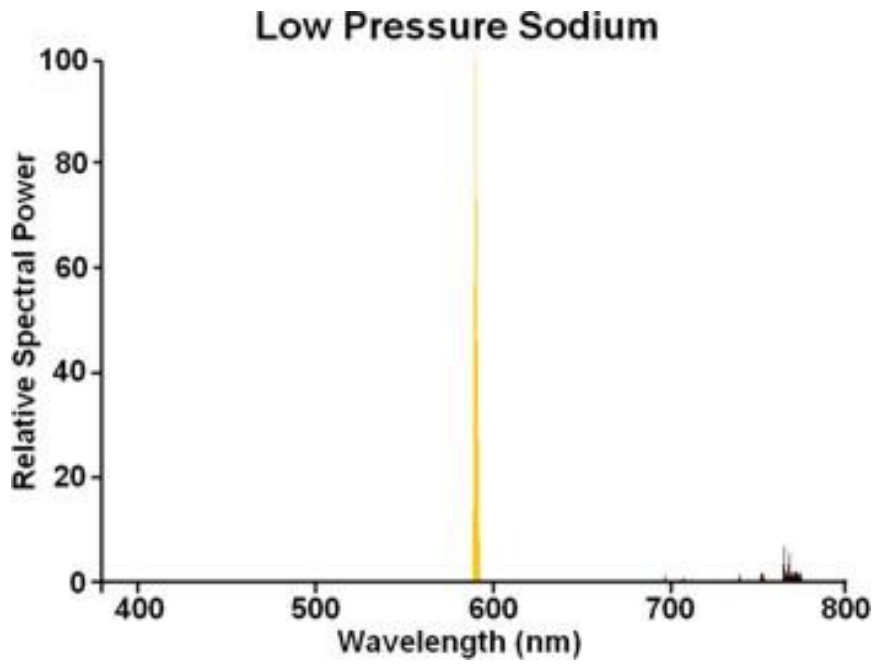


Εικόνα 1-46: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα νατρίου χαμηλής πίεσης [11]

Ο απαιτούμενος χρόνος ανάμεσα στην έναυση και στην μέγιστη απόδοση κυμαίνεται από 7 έως 15 λεπτά. Έπειτα από την έναρξη λειτουργίας του λαμπτήρα, το εκπεμπόμενο φως χαρακτηρίζεται από χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα λόγω της εκκένωσης του νέου, και βαθμιαία μεταβάλεται σε κίτρινο κατά την εξάτμιση του νατρίου. Η θερμή επανεκκίνηση κρίνεται ικανοποιητική και οι περισσότεροι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης είναι δυνατό να ανάψουν αμέσως μετά τη διακοπή και επανατροφοδότηση ηλεκτρικής ισχύος. [2] [8] [11] [19] [16] [15] [20]

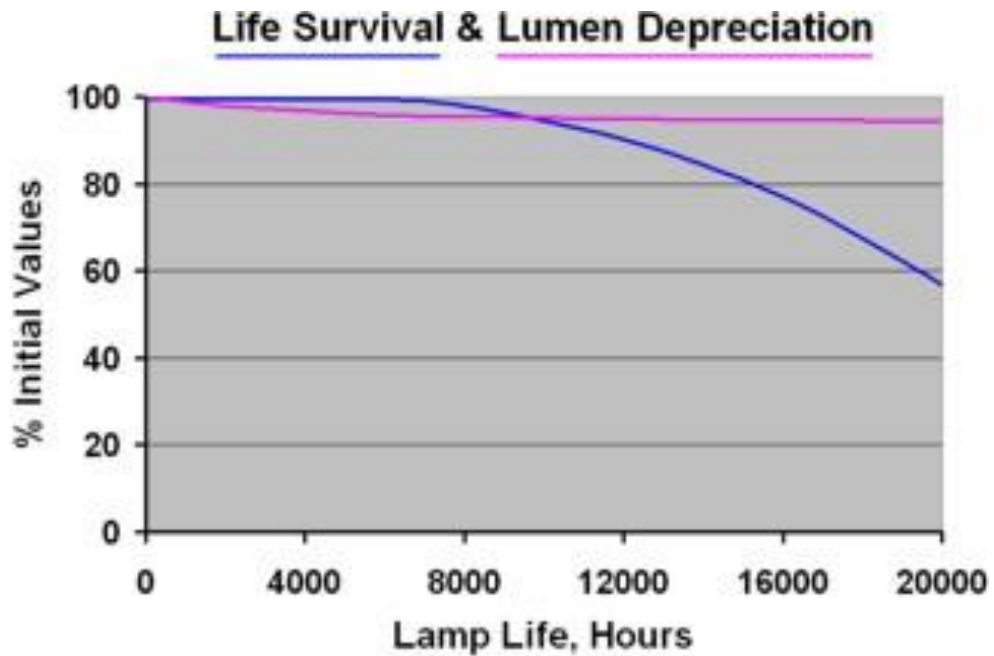
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων είναι το μοντέλο CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector της General Electric.

Το φάσμα ακτινοβολίας του λαμπτήρα αυτού είναι το εξής:



Εικόνα 1-47: Φάσμα ακτινοβολίας SOX-PSG [8]

Ενώ ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του λαμπτήρα αυτού δίδεται από το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1-48: Χρόνος ζωής SOX-PSG [8]

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του λαμπτήρα αυτού δίδονται στον παρακάτω πίνακα. [8]

<b>Manufacturer:</b>	<b>Philips Lighting Ltd.</b>	
<b>Lamp Power:</b>	38 Watts	
<b>Lamp Current:</b>	0.60 Amps	
<b>Lamp Voltage:</b>	70 Volts	
<b>Cap Type:</b>	BY22d	Blue Alkyde Insulator
<b>Bulb Finish:</b>	Indium Tin Oxide Film	Soda-lime glass
<b>Bulb Type:</b>	Inner: TU-14 x 32	Outer: T-50
<b>Overall Length:</b>	311 mm	12¼ inches
<b>Light Centre Length:</b>	183 mm	7¼ inches
<b>Arc Length:</b>		
<b>Electrodes:</b>	CCC-4 Black Tungsten	BCT emitter
<b>Atmosphere:</b>	Na   99% Ne, 1% Ar	Outer: Hard Vacuum
<b>Luminous Flux:</b>	4,800 lm	(@ 100 hrs)
<b>Luminous Efficacy:</b>	126.3 lm/W	(@ 100 hrs)
<b>Colour Temperature &amp; CRI:</b>	CCT: 1700K	CRI: Ra-44
<b>Chromaticity Co-ordinates:</b>	CCx: 0.574	CCy: 0.425
<b>Burning Position:</b>	Verical Base Up ± 95°	
<b>Rated Lifetime:</b>	18,000 hrs (70% survival)	12,000 hrs (92% survival)
<b>Warm-up &amp; Re-strike Time:</b>	11½ minutes	Instantaneous
<b>Factory:</b>	Hamilton	Scotland
<b>Date of Manufacture:</b>	September 2003	Date Code J3
<b>Original &amp; Present Value:</b>	£8.24 (2003)	£8.73 (2005)

*Πίνακας 1-7: Χαρακτηριστικά λειτουργίας SOX-PSG [8]*



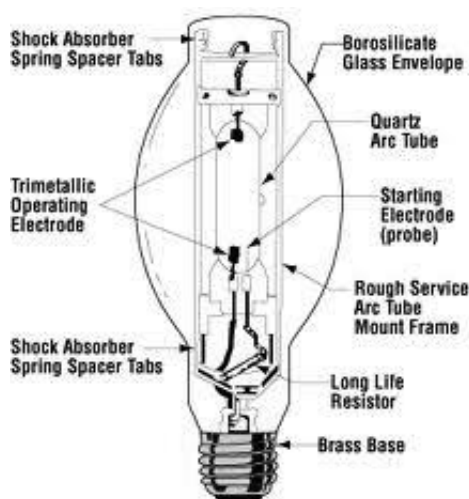
*Εικόνα 1-49: Υλοποιήσεις λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης [8]*

### 1.2.5 Λαμπτήρες Υδραργύρου Υψηλής Πίεσης

Στους λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης, η παραγωγή του φωτός επιτυγχάνεται από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των ατμών υδραργύρου. Λόγω του γεγονότος ότι ο υδράργυρος έχει χαμηλή πίεση εξάτμισης σε θερμοκρασία δωματίου, και ακόμη χαμηλότερη όταν έχει κρύο, γίνεται χρήση ενός μικρού μέρους αργού, το οποίο ιονίζεται ευκολότερα, για την διευκόλυνση της έναυσης. Το αρχικό τόξο σχηματίζεται από τον ιονισμό του αργού και η θερμότητα την οποία παράγει προκαλεί τη μερική εξάτμιση του υδραργύρου, με τη διαδικασία αυτή να επαναλαμβάνεται μέχρι επιτευχθεί η ατμοποίηση όλου του υδραργύρου.

Οι περισσότεροι λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης χρησιμοποιούν για την κατασκευή τους δυο περιβλήματα:

- το εσωτερικό περίβλημα το οποίο περιβάλλει το σχηματιζόμενο τόξο, και
- το εξωτερικό περίβλημα το οποίο:
  - Προστατεύει το σωλήνα εκκένωσης από εξωτερικές επιδράσεις και αλλαγές της θερμοκρασίας.
  - Περιέχει αδρανές αέριο το οποίο αποτρέπει την οξείδωση των εσωτερικών τμημάτων και επιπροσθέτως αυξάνει την τάση αποκοπής.
  - Λειτουργεί σαν φίλτρο για την απομόνωση της ακτινοβολίας συγκεκριμένων μηκών κύματος (UV-B, UV-C)



Εικόνα 1-50: Λαμπτήρας υδραργύρου υψηλής πίεσης [19]

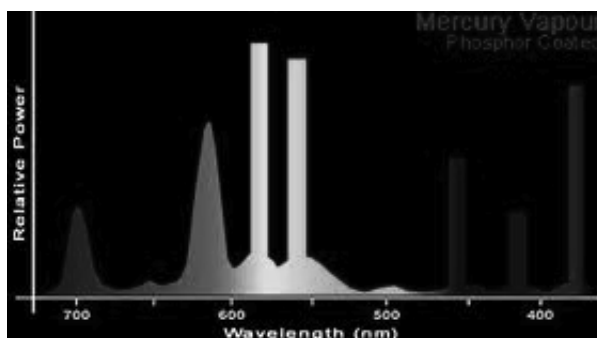
Η πίεση λειτουργίας του λαμπτήρα υδραργύρου είναι υψηλή για τη χαρακτηριστική φασματική διανομή ισχύος του, καθώς, συνήθως, υψηλότερη πίεση λειτουργίας οδηγεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος το μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης

ακτινοβολίας. Στην ορατή περιοχή το φάσμα του υδραργύρου αποτελείται από πέντε βασικές γραμμές οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα ένα κυανοπράσινο φως( 404,7, 435,8, 546,1, 577 και 579 nm με αποδόσεις από 30 έως 65 lm/W δίχως να συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες των ballast (στραγγαλιστικών πηνίων).



*Εικόνα 1-51: Λαμπτήρας υδραργύρου υψηλής πίεσης 175 W [11]*

Ένα σημαντικό ποσοστό της εκπεμπόμενης ενέργειας από το τόξο υδραργύρου βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος. Με τη χρήση φθορίζουσών στοιχείων στην εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού περιβλήματος, ένα τμήμα της υπεριώδους ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ορατό φως. Οι πλέον ευρέως διαδεδομένοι λαμπτήρες αυτού του τύπου είναι επικαλυμμένοι με φώσφορο ο οποίος εκπέμπει ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (πορτοκαλί - κόκκινο). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται βελτίωση της απόδοσης και του προσδιορισμού των χρωμάτων. Ο φώσφορος είναι δυνατό να αναμειχθεί και με άλλα στοιχεία με σκοπό να παραχθούν πιο ψυχρά ή πιο θερμά χρώματα.



*Εικόνα 1-52: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα υδραργύρου υψηλής πίεσης [8]*

Η μορφή των εμπορικά διαθέσιμων λαμπτήρων υδραργύρου υψηλής πίεσης είναι δυνατό να είναι τύπου κώδωνα ή τύπου επιμήκους σωλήνα. Βασικό μειονέκτημα τους είναι η σταδιακή υποβάθμιση της φωτεινής έντασης σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας. Σε πλήθος περιπτώσεων οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης λειτουργούν για πολύ καιρό μετά τον εκτιμώμενο χρόνο λειτουργίας, αλλά η απόδοση φωτεινής ροής (Lm/W) φθίνει, δηλαδή για την ίδια παροχή ισχύος αποδίδουν πολύ πιο θαμπό φως.

Άλλο ένα μειονέκτημα το οποίο παρουσιάζουν οι λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης είναι το γεγονός ότι αποδίδουν φωτισμό κυανοπράσινης απόχρωσης. Οι λαμπτήρες υδραργύρου υψηλής πίεσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον φωτισμό δρόμων, βιομηχανικών χώρων, σταδίων, πλατειών και γενικότερα εξωτερικών χώρων. Ο συγκεκριμένος τύπος λαμπτήρων προτιμάται σε περιπτώσεις ιδιαίτερα χαμηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος. [2] [8] [11] [19] [16] [15] [20]

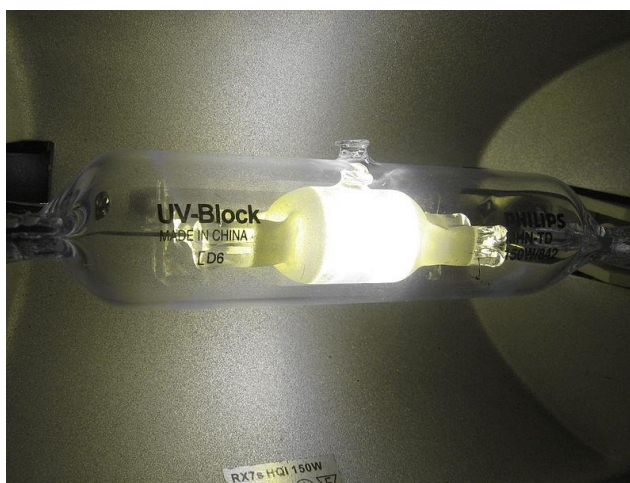
	<b>Mazda 200W</b> MBT/V with shrink seals and pearl outer bulb c. 1945		<b>Osram 165W</b> HWA 302 German lamp in usual pearl bulb 1958		<b>Philips 250W</b> ML500 First model mercury blended c. 1947
	<b>Bumix 860W</b> "Jupiter" variable colour mushroom-shape lamp c. 1950		<b>Philips 160W</b> MBTL with Magnesium fluorogermanate coating 1960		<b>Atlas 250W</b> MBTF with Yttrium Vanadate coated bulb 1970
	<b>Osram 500W</b> HWL with isothermal bulb shape 1974?		<b>GE 160W</b> E-Z Lux HSB160/PS30/M low voltage design c. 1980		<b>DuroTest 750W</b> Self-Ballasted Lamp of high efficiency design c. 1960
	<b>DuroTest 450W</b> Fluomeric with special high efficiency design 1970/78		<b>National 100W</b> BH100 with preheated arc tube electrodes 2001		<b>Thorn 160W</b> MBT Sunlight Clear mercury blended lamp 1987
	<b>Philips 160W</b> ML with new design for automatic production 2003		<b>XingJi 500W</b> HMB Halogen-Ballasted Mercury Vapour 2003		<b>Philips 160W</b> MLR mercury blended reflector style 1984

Εικόνα 1-53: Υλοποιήσεις λαμπτήρων υδραργύρου υψηλής πίεσης [8]

### 1.2.6 Λαμπτήρες Μεταλλικών Αλογονιδίων

Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων παρουσιάζουν ομοιότητες ως προς την κατασκευή τους με τους λαμπτήρες υδραργύρου και η βασική διαφοροποίησή τους οφείλεται στο γεγονός ότι ο σωλήνας εκκένωσης περιέχει διάφορα μεταλλικά αλογονίδια επιπρόσθετα με τον υδράργυρο και το αργό. Όταν οι ατμοί των αλογονιδίων του μετάλλου πλησιάσουν τον πυρήνα της εκκένωσης, ο οποίος έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία, πραγματοποιείται διάσπασή τους σε αλογόνα και μέταλλα. Τα μέταλλα αποδίδουν ακτινοβολία στο δικό τους φάσμα, ενώ τα άτομα αλογόνου μεταβαίνουν προς τα τοιχώματα του σωλήνα τα οποία είναι πιο ψυχρά, επανασυνδέονται και επαναλαμβάνεται ο κύκλος.

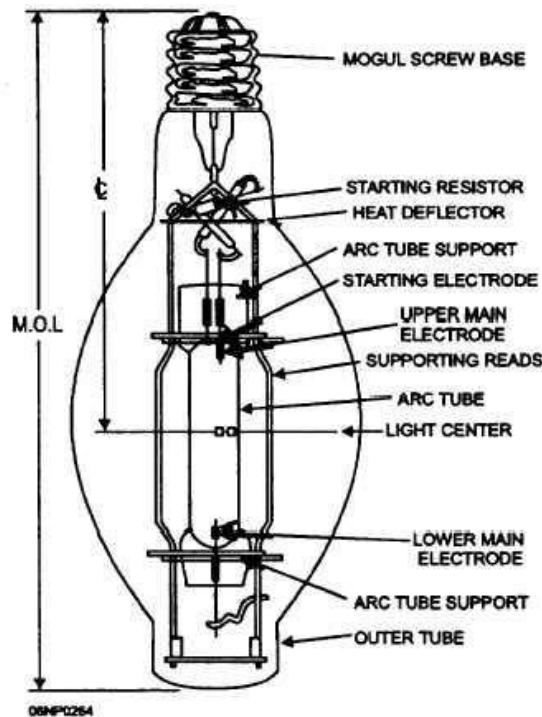
Οι εμπορικά διαθέσιμοι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων εμφανίζουν αποδόσεις από 75 έως 125 lm/W, χωρίς να περιλαμβάνονται στα ανωτέρω νούμερα οι απώλειες των ballast. Αξίζει να σημειωθεί ότι σχεδόν όλα τα είδη των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων με λευκό φως παράγουν απόδοση χρώματος εξίσου καλή ή και ανώτερη από αυτή την οποία παράγουν οι λαμπτήρες υδραργύρου με επικάλυψη φωσφόρου.



*Εικόνα 1-54: Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων κατά τη διαδικασία της προθέρμανσης [11]*

Τα ακτινοβολούντα μέταλλα τα οποία χρησιμοποιούνται έχουν επιλεκτικά φασματικά χαρακτηριστικά εκπομπής. Μερικά από αυτά παράγουν ένα μήκος κύματος και άλλα ακτινοβολούν ένα πλήθος διακριτών μηκών κύματος. Για να επιτευχθεί ένα πλήρες και ισορροπημένο φάσμα γίνεται χρήση δυο βασικών συνδυασμών αλογόνων :

- Σκανδίου και νατρίου
- Δυσπροσίου, ολμίου και θαλίου



Εικόνα 1-55: Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων [2]

Με την τεχνική των μεταλλικών αλογονιδίων είναι δυνατό να παραχθούν συγκεκριμένα χρώματα. Νάτριο για πορτοκαλί, θάλιο για πράσινο, ίνδιο για μπλε και σίδηρος για υπεριώδες. Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων διατίθενται επίσης και με επικάλυψη φωσφόρου στο εξωτερικό περίβλημα, με σκοπό την επιπρόσθετη ρύθμιση του χρώματος καθώς επίσης και τη μείωση της θερμοκρασίας χρώματος του λαμπτήρα.

Η μέθοδος έναυσης της πελιοσηφίας των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων πάνω από 150W είναι παρόμοια με αυτή των λαμπτήρων υδραργύρου, όμως η παρουσία των αλογονιδίων έχει ως συνέπεια η απαιτούμενη τάση έναυσης για αρκετούς τύπους λαμπτήρων είναι υψηλότερη σε σχέση με την απαιτούμενη τάση έναυσης στους λαμπτήρες υδραργύρου.

Κατά την εκκίνηση και κατά τη θέρμανση του λαμπτήρα παρατηρούνται μεταβολές στο χρωματισμό του. Οι μεταβολές αυτές προκαλούνται από την εξάτμιση των αλογόνων έως ότου να αποκατασταθεί το χρώμα ισορροπίας. Ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για χρωματική και ηλεκτρική ισορροπία κυμαίνεται από 2 έως 10 λεπτά.

Το ηλεκτρικό τόξο στους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων, όπως σε όλους τους λαμπτήρες εκκένωσης αερίων, παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα ότι όσο αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο διαπερνά τον λαμπτήρα η τάση στα άκρα του μειώνεται, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η χρήση ballast για την μείωση του ρεύματος του

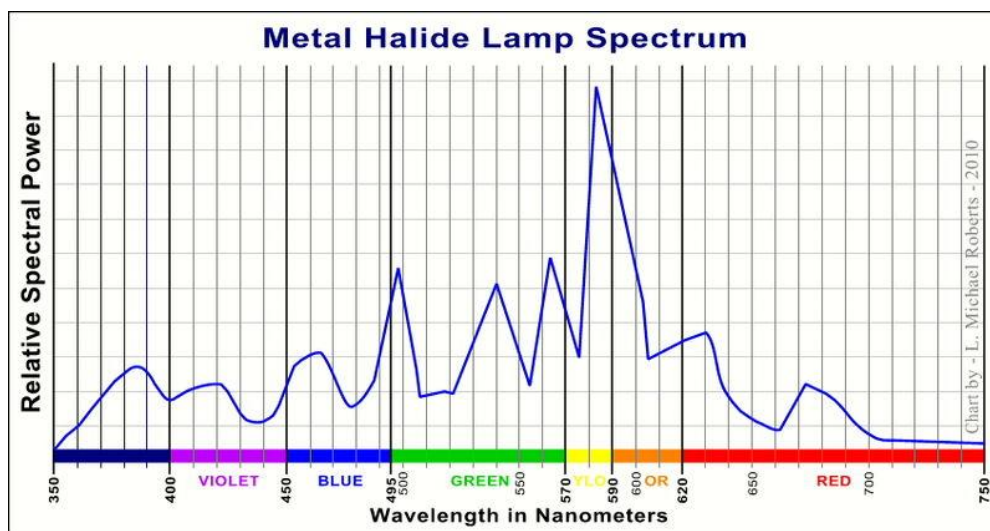


τόξου, καθώς σε διαφορετική περίπτωση το ηλεκτρικό ρεύμα θα αύξανε και θα προκαλούσε την καταστροφή του λαμπτήρα. Τα ballast τα οποία χρησιμοποιούνται για τους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων είναι πιθανό να είναι είτε ballast τα οποία βασίζονται σε επαγωγέα “πυρήνα και πηνίου” είτε ηλεκτρονικά ballast.



Εικόνα 1-56: Ηλεκτρονικό ballast για λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων 35W [11]

Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας από τους λαμπτήρες υδραργύρου, με συνέπεια ο χρόνος ψύξης και μείωσης της πίεσης του ατμού είναι μεγαλύτερος. Ο χρόνος επανέναυσης για τον λόγο αυτό είναι περίπου 15 λεπτά. Η μέση διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων είναι από 7.500 μέχρι και 20.000 ώρες. [2] [8] [11] [19] [16] [15] [20]



Εικόνα 1-57: Φάσμα ακτινοβολίας λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων [11]

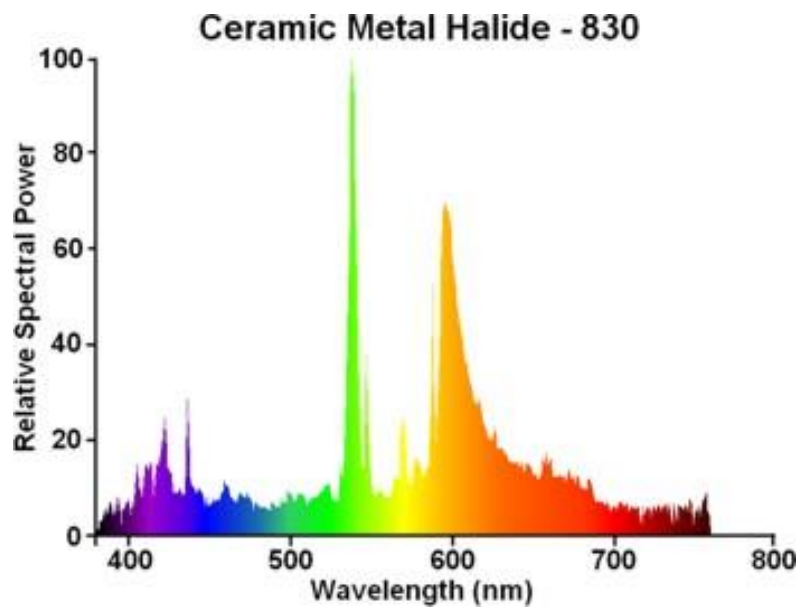
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων είναι το μοντέλο CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector της General Electric. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του λαμπτήρα αυτού δίδονται στον παρακάτω πίνακα. [8]

<b>Manufacturer:</b>	<b>GE Lighting</b>	
<b>Lamp Power:</b>	20 Watts	
<b>Lamp Current:</b>	0.215 Amps	
<b>Lamp Voltage:</b>	90 Volts	
<b>Cap Type:</b>	GX10	Steatite Ceramic
<b>Bulb Finish:</b>	Aluminised Reflector	Clear Lens
<b>Bulb Type:</b>	MRC-51 mm	MRC-16 eighths/inch
<b>Overall Length:</b>	54.5mm	11 1/4 inches
<b>Light Centre Length:</b>	N/A	
<b>Arc Length:</b>	3.35mm	1/8 inch
<b>Electrodes:</b>	Single coil tungsten	
<b>Atmosphere:</b>	Ar-Kr85   Hg,(Dy,Ho,Tm,Tl,Na)lx	Outer: Hard Vacuum
<b>Beam Distribution:</b>	12° to 50% Peak	9000 cd
<b>Luminous Flux:</b>	1,000 lm @ 100 hrs	
<b>Luminous Efficacy:</b>	50.0 lm/W @ 100 hours	
<b>Colour Temperature &amp; CRI:</b>	CCT: 3000K	CRI: Ra 82
<b>Chromaticity Co-ordinates:</b>	CCx: 0.435	CCy: 0.400
<b>Burning Position:</b>	Universal	
<b>Rated Lifetime:</b>	9000 hours	to 50% survival
<b>Warm-up &amp; Re-strike Time:</b>	4 minutes	10 minutes
<b>Factory:</b>	Leicester (UK) & Budapest (Hungary)	
<b>Date of Manufacture:</b>	February 2006	Date Code 0206

*Πίνακας 1-8: Χαρακτηριστικά λειτουργίας CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector*

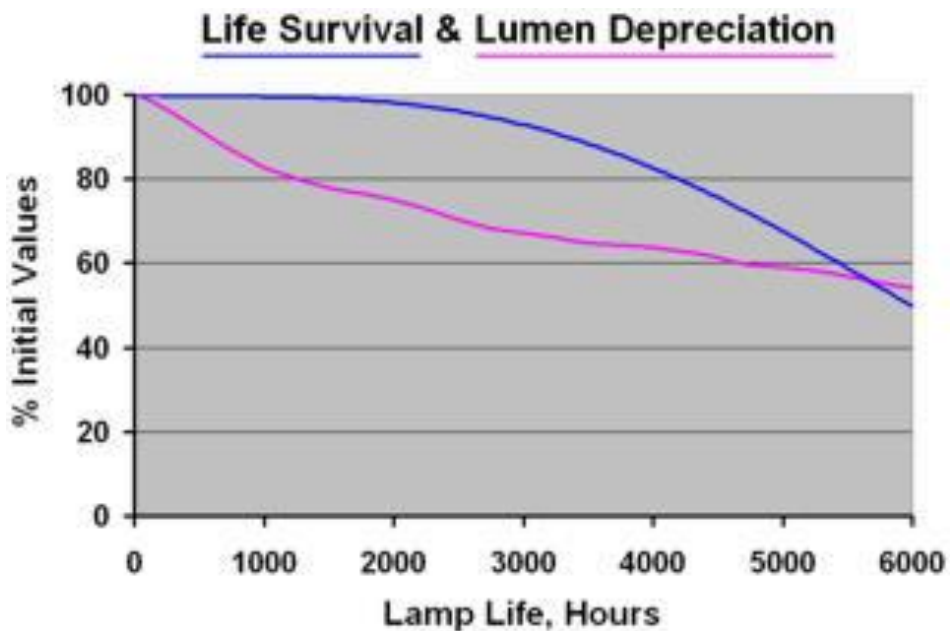
[8]

Το φάσμα ακτινοβολίας του λαμπτήρα αυτού είναι το εξής:





















Εικόνα 1-58: Φάσμα ακτινοβολίας CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector [8]

Ενώ ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του λαμπτήρα αυτού δίδεται από το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1-59: Χρόνος ζωής CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector [8]

	<b>Thorn 150W</b> TSH Tin Sodium Halide with Cermet seals 1981		<b>Thorn 150W</b> TSH Tin Sodium Halide with Corstar arc tube 1981		<b>Thorn 70W</b> CMH 70W for use on standard ballast ~1983
	<b>Philips 35W</b> CDM-T Single Ended with 5-part arc tube 1994		<b>Philips 150W</b> CDM-TD Double Ended with 5-Part arc tube 1997		<b>GE 20W</b> CMH-TC Compact with 3-Part arc tube 2001
	<b>Philips 70W</b> CDM-E Ellipsoidal Fluorescent for U.S.A. 1994		<b>Philips 35W</b> Mastercolour CDM-R PAR30 Reflector 1997		<b>Philips 35W</b> Mastercolour CDM-R111 Aluminium Reflector 2003
	<b>Iwasaki 150W</b> Ceralux MT150-CEW with Cermet end seals 2002		<b>G.S. 230W</b> Lamp of Japan Storage Battery Company 2001		<b>Philips 400W</b> HPS Retro-White High Wattage CDM 2001
	<b>Osram 250W</b> HCF-T Poweball 2-Part elliptical arc tube 2002		<b>GE 250W</b> CMH-TT 250W / 830 Single Piece Arc Tube 2003		<b>Wujin Lijia 150W</b> First Chinese Ceramic Metal Halide 2002
	<b>Toto 70W</b> CMI-T with Transparent YAG ceramic arc tube 1999		<b>Philips 25W</b> CDMR-i Self Ballasted Reflector Format 2005		<b>GE 20W</b> CMH ConstantColour MR16 Spot Reflector 2005

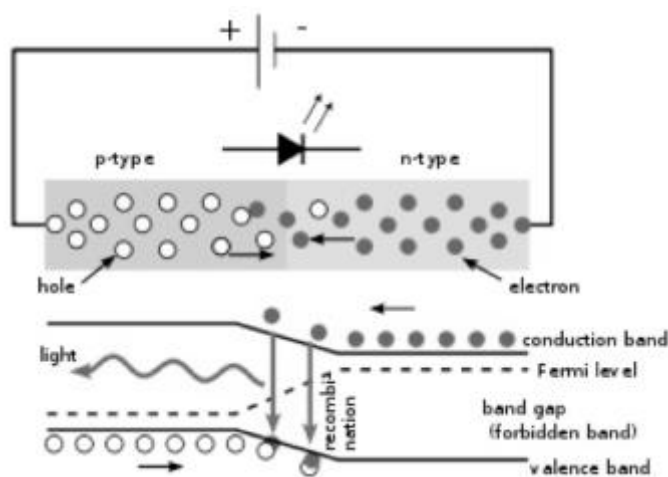
Εικόνα 1-60: Υλοποιήσεις λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων [8]

## 1.2.7 Συστήματα Φωτισμού LED

### 1.2.7.1 Λειτουργία LED

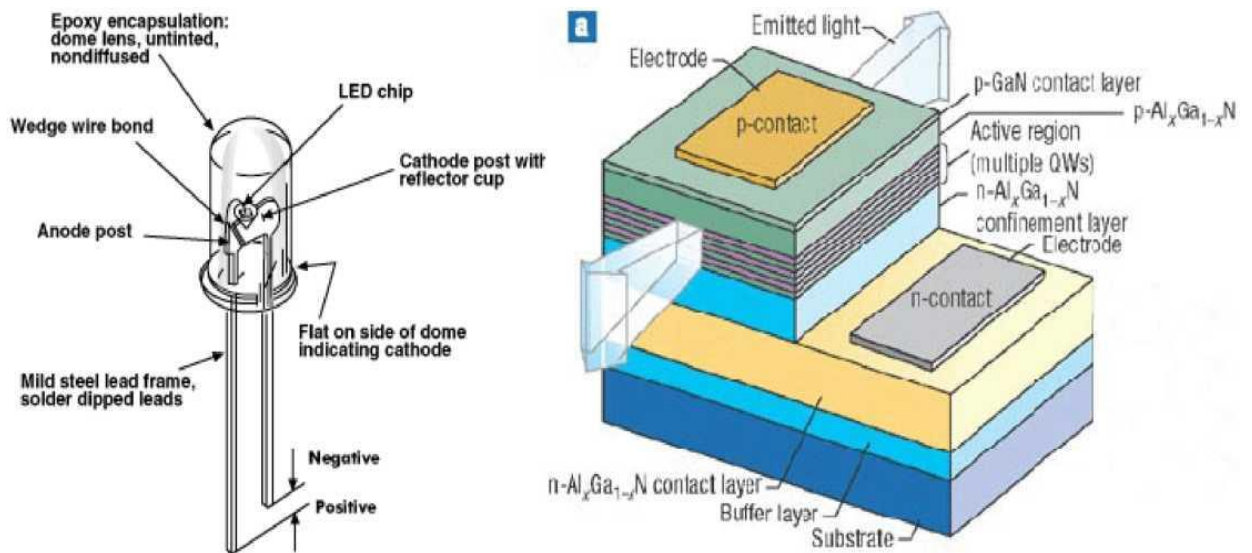
Δίοδος Εκπομπής Φωτός (LED - Light Emitting Diode), αποκαλείται ένας ημιαγωγός ο οποίος εκπέμπει φως στενού φάσματος όταν του παρασχεθεί μία ηλεκτρική τάση. Η αρχή λειτουργίας των LED βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence), κατά τη διάρκεια του οποίου ένα υλικό εκπέμπει φως ως συνέπεια της διαρροής του από ηλεκτρικό ρεύμα. Η δίοδος εκπομπής φωτός είναι μια συσκευή ημιαγωγών η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή. Η δίοδος εκπομπής φωτός LED είναι ουσιαστικά μια επαφή p-n η οποία εκπέμπει φως, όταν είναι ορθά πολωμένη, κατάσταση την οποία επιτυγχάνουμε με την εφαρμογή συνεχούς τάσης με το “+” στο μέρος p της επαφής. Ως επαφή p-n ορίζεται η ένωση/παράθεση δύο τμημάτων ημιαγωγού όπου το ένα εμφανίζει περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων (ημιαγωγός τύπου -n) και το άλλο περίσσεια οπών ή

ισοδύναμα έλλειμμα ηλεκτρονίων (ημιαγωγός τύπου - p). Κατά συνέπεια η LED μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε φως. Οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα ηλεκτρόνια. Η έλλειψη ηλεκτρονίου, ως αποτέλεσμα διέγερσης, από μία θέση όπου πριν υπήρχε χαρακτηρίζεται ως οπή. Κατά την επανασύδεση ενός ηλεκτρονίου με οπή, δηλαδή κατά την αποδιέγερση ηλεκτρονίου, εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια περίπου ίση προς το ενεργειακό χάσμα. Η ενέργεια αυτή και κατά συνέπεια η συχνότητα ή το μήκος κύματος του φωτονίου, άρα το χρώμα του φωτός, είναι δυνατό να μεταβάλλεται μέσω επιλογής υλικών με διαφορετικά ενεργειακά χάσματα. Οι δίοδοι φωτοεκπομπής (LED) είναι με τέτοιο τρόπο κατασκευασμένες ούτως ώστε να διώχνουν προς τα έξω ένα μεγάλο αριθμό φωτονίων. Επιπλέον τοποθετούνται εντός ενός πλαστικού περιβλήματος το οποίο έχει την ιδιότητα να στέλνει το φως προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. [11] [21] [22]



Εικόνα 1-61: Αρχή λειτουργίας LED [19]

Το LED αποτελείται από ένα τσιπ ημιαγωγού υλικού εμποτισμένο, ή ενισχυμένο με προσμείξεις για τη δημιουργία μίας ένωσης p-n, όπως και σε μια κανονική δίοδο. Όπως και σε άλλες διόδους, το ρεύμα μεταβαίνει με ευκολία από την πλευρά p (άνοδος), στην πλευρά n (κάθοδος), αλλά όχι προς την αντίθετη κατεύθυνση. Κατά τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, όταν ένα ηλεκτρόνιο συναντά μια οπή, αυτό εντάσσεται σε ένα χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο και προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας με τη μορφή ενός φωτονίου. Το μήκος κύματος του φωτός το οποίο εκπέμπεται, και επομένως το χρώμα, εξαρτάται από το ενεργειακό διάκενο των υλικών τα οποία αποτελούν την ένωση p-n. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για τα LED έχουν διάκενο ενέργειας το οποίο αντιστοιχεί σε σχεδόν υπέρυθρες, ορατές ή κοντά στην υπεριώδη ακτινοβολίες. [11] [21] [22] [2]



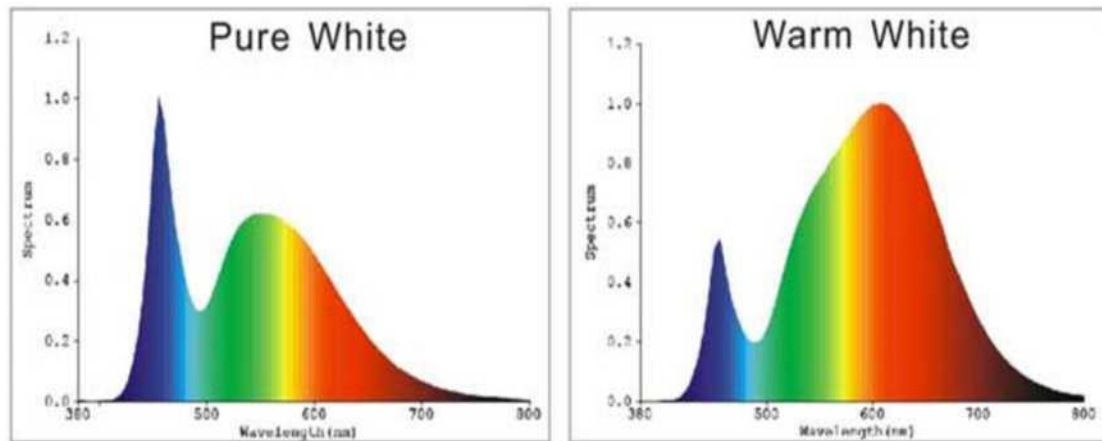
Εικόνα 1-62: Διαφορετικές απεικονίσεις της κατασκευαστικής δομής μίας LED [2]

Το κεντρικό κομμάτι ενός τυπικού LED αποτελεί η δίοδος η οποία τοποθετείται εντός ενός ανακλαστήρα και στερεώνεται εκεί με τη χρήση μαλακού χάλυβα, ο οποίος συνδέεται με ένα ζεύγος ηλεκτρικά καλώδια. Η δίοδος έχει μέγεθος περίπου 0,25 mm και χρειάζεται ρεύμα περίπου ίσο με 10mA για τη λειτουργία της σε ισχύ ίση με 0,1Watt. Κατά τη διαροή της επαφής p-n των δύο διαφορετικών υλικών από ηλεκτρικό ρεύμα παράγεται φως. Το σχήμα και το πλάτος της φωτεινής δέσμης η οποία εκπέμπεται καθορίζεται από διάφορους παράγοντες: το σχήμα του ανακλαστήρα, το μέγεθος του τσιπ και το σχήμα του φακού. [21]



Εικόνα 1-63: Διαφορετικά χρώματα και μεγέθη LED [21]

Το τελικό οπτικό αποτέλεσμα των λαμπτήρων LED έχει εξάρτηση από το υλικό των ημιαγωγών, τα χημικά πρόσθετα και το περίβλημα του φωτιστικού σώματος. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως ημιαγωγοί είναι συνήθως ενώσεις φωσφόρου, αργιλίου, γαλλίου και ινδίου ή ενώσεις αργιλίου, γαλλίου και αρσενίου. Εκτός από τα ορατά μήκη κύματος, τα LED είναι δυνατό να εκπέμψουν υπέρυθρο φως με μήκος κύματος από 830 nm έως 940 nm, καθώς και υπεριώδες. [2]



Εικόνα 1-64: Φασματική διαφορά εκπομπής του ψυχρού λευκού με το ζεστό λευκό [2]

Το φάσμα ακτινοβολίας το οποίο παράγεται από την ψηφίδα του LED είναι πολύ μικρού φάσματος, σχεδόν μονοχρωματικό. Η διεύρυνση του φάσματος είναι δυνατό να επιτευχθεί με την χρήση φωσφόρων, οι οποίοι διεγείρονται από την ακτινοβολία του LED. Εκτός από κόκκινα πράσινα και πορτοκαλί LED, διατίθενται και τα λευκά τα οποία είναι δυο ειδών:

- Με χρήση φωσφόρου, ο οποίος απορροφά το μπλε και το επανεκπέμπει ως λευκό.
- Με χρήση ενός συνδυασμού από ψηφίδες οι οποίες εκπέμπουν διαφορετικό χρώμα ( κόκκινο, πράσινο, μπλε ). Τα μεμονωμένα χρώματα αναμιγνύονται σε ένα ενιαίο λευκό χρώμα

Το πρώτο είδος είναι προτιμότερο από τους κατασκευαστές, καθώς οι φώσφοροι είναι δυνατό να ακτινοβολήσουν διάφορα είδη λευκού φωτός. Επομένως υφίσταται ποικιλία στις διαθέσιμες θερμοκρασίες χρώματος, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο και οφείλει να επιλέγεται σε άμεση συνάρτηση με την εφαρμογή. [2] [11]

#### 1.2.7.2 Ιστορική Αναδρομή τεχνολογίας LED

Η ανακάλυψη της τεχνολογίας των LED χρονολογείται το 1907 όταν, με την ανακάλυψη του φαινομένου της ηλεκτροφωταύγειας από τον Βρετανό H.J. Round, τέθηκαν τα θεμέλια για την κατασκευή του πρώτου LED. Το 1961 οι Robert Biard και Gary Pittman της Texas Instruments διαπίστωσαν ότι οι ημιαγωγοί αρσενικούχου γαλλίου εκπέμπουν υπέρυθη ακτινοβολία όταν διαρρέονται από ρεύμα. Ένα χρόνο αργότερα, ο Nick Holonyak Jr της General Electric κατασκεύασε το πρώτο LED ορατής ακτινοβολίας, χρώματος κόκκινου. Εν συνεχεία ακολούθησαν τα πρώτα LED κίτρινου και πορτοκαλί χρώματος, ενώ παράλληλα τέθηκαν οι βάσεις για τη μαζική παραγωγή LED από την εταιρία Mosanto.

Αρχικά, τα LED χρησιμοποιήθηκαν ως λυχνίες κόκκινου χρώματος και η χρήση τους περιοριζόταν ως δείκτες, δεδομένου ότι η φωτεινή ισχύς την οποία παρήγαγαν ήταν ελάχιστη για τον φωτισμό ενός χώρου, και αντικατέστησαν τους λαμπτήρες πυρακτώσεως και νέον οι οποίοι χρησιμοποιούνταν ως δείκτες στο παρελθόν, καθώς σε σύγκριση με αυτούς εμφάνιζαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, λειτουργούσαν υπό χαμηλότερη τάση, καταλάωναν λιγότερη ενέργεια και δεν ήταν απαραίτητη η συχνή αντικατάσταση τους. Έως τη δεκαετία του 1970 χρησιμοποιούνταν ευρέως για αυτήν την χρήση.

Τη δεκαετία του 1980 η ανάπτυξη της τεχνολογίας των LED είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση του εκπεμπόμενου φωτός με ταυτόχρονη διατήρηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας. Η διαρκής αυτή εξέλιξη οδήγησε στην κατασκευή των πρώτων LED υψηλής φωτεινότητας μπλέ και πράσινου χρώματος από τη Nichia Corporation στις αρχές της δεκαετίας του 1990.

Η εκπομπή λευκού φωτός από λαμπτήρα led καθίστατο δυνατή μόνο με την μίξη ενός κόκκινου, πράσινου και μπλε led έως το 1993, οπότε ο Shuji Nakamura παρήγαγε λευκό φως από ένα μπλε led (με νιτρίδιο του γαλλίου), με την επικάλυψή του με φώσφορο. Η διαδικασία αυτή ήταν λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με την ποσότητα φωτός που παράγονταν.

Έως το 2008 η τεχνολογία του λευκού φωτός είχε προχωρήσει σε τέτοιο βαθμό ώστε η εταιρεία Sentry Equipment Corporation ήταν σε θέση να φωταγωγήσει ολόκληρο το εργοστάσιό της, εσωτερικά και εξωτερικά, αποκλειστικά με led. Αν και το αρχικό κόστος ήταν σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερο σε σχέση με τους συμβατικούς λαμπτήρες, υπήρχε οικονομική απόσβεση σε μόλις δύο χρόνια από την εξοικονόμηση ενέργειας και την μη αντικατάσταση των καμένων λαμπτήρων. Το 2009, ερευνητές του πανεπιστημίου του Cambridge δημοσίευσαν μια νέα μέθοδο κατασκευής LED η οποία μείωσε το κόστος παραγωγής κατά 90% με αποτέλεσμα την έναρξη της «επανάστασης» στο φωτισμό με LED. Πλέον η νέα τεχνολογία τραβάει την προσοχή του κοινού και τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα φωτισμού LED αποκτούν συνεχώς αυξανόμενο μερίδιο αγοράς. [11] [22] [8] [21]

### *1.2.7.3 Χαρακτηριστικά των LED*

Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) είναι πολύ πιο αποδοτικοί ενεργειακά σε σχέση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως. Για την παραγωγή φωτός από ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως, το ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να διαπεράσει το νήμα του και



να το θερμάνει σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, γεγονός το οποίο τους καθιστά ιδιαίτερα αναποτελεσματικούς αποδοτικά, καθώς άνω του 98% την ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον ως θερμότητα. Ένας λαμπτήρας 100W παράγει φωτεινή ροή περίπου 1700 lumen, δηλαδή περίπου 17lm/W. Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) προκαλούν την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας σε μονοχρωματικό φως με την παραγωγή «κρύου» φωτισμού να έχει ως αποτέλεσμα την μη ύπαρξη απώλειας θερμικής ενέργειας προς το περιβάλλον. Τα led τα οποία είναι εμπορικά διαθέσιμα προσφέρουν αποδόσεις άνω των 100lm/W σε ιδεατές συνθήκες σύμφωνα με τους κατασκευαστές, οπότε είναι προφανές ότι εξοικονομούν μεγάλα ποσά ενέργειας σε σχέση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες. Μέχρι σήμερα επαληθεύεται «ο νόμος του Haitz», σύμφωνα με τον οποίο η απόδοση των LEDs διπλασιάζεται κάθε 3 χρόνια. [15] [11] [21] [19]

Το φως το οποίο παράγουν τα led είναι ανώτερο από τους παραδοσιακούς λαμπτήρες, καθώς το σταθερό λευκό φως των LED παρέχει μεγαλύτερη φωτεινότητα και απόδοση των χρωμάτων, ιδιαίτερα τις νυχτερινές ώρες, λόγω του γεγονότος ότι μοιάζει περισσότερο με φυσικό φωτισμό. Σε αντίθεση με τους κοινούς λαμπτήρες, το φως των led δεν παρουσιάζει αυξομείωση σε εναλλαγές της τάσης. Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι παρουσιάζουν καλύτερη κατανομή του φωτός αποτελούν ιδανικές λύσεις για εσωτερικά έργα φωτισμού.

Τα led συνήθως δεν καίγονται, αλλά τείνουν να μειώνουν σταδιακά το φως το οποίο παράγουν. Ως χρόνος ζωής ορίζεται το διάστημα μέχρι να φτάσουν στο 70% της αρχικής τους φωτεινής ροής. Η διάρκεια ζωής ενός λαμπτήρα led κυμαίνεται από 50.000 έως 60.000 ώρες με βάση τα στοιχεία των κατασκευαστών, επομένως ένα σύστημα φωτισμού LED το οποίο έχει 10 ώρες χρήσης την ημέρα έχει λειτουργικό χρόνο περίπου 13 χρόνια. Σε σύγκριση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, οι οποίοι λειτουργούν για περίπου 2000 ώρες, τα led παρουσιάζουν 90% μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, και 50% από τους λαμπτήρες φθορισμού οι οποίοι παρουσιάζουν λειτουργικό χρόνο ζωής 10.000 με 20.000 ώρες. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με την θερμοκρασία υπό την οποία λειτουργεί το LED. Η διαχείριση της εκλυόμενης θερμότητας είναι θέμα ύψιστης σημασίας και δυσκολίας. Τα led έχουν μία σταδιακή και μόνιμη μείωση της παραγωγής φωτός κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας τους η οποία προκαλείται από μείωση της οπτικής διαδρομής εντός της δέσμης led. Ωστόσο, αυτό συμβαίνει με πολύ αργό ρυθμό και δεν καθίσταται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των LED αποτελεί το γεγονός ότι είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε κραδασμούς, περιπτώσεις ζημιών, δονήσεις και κρούσεις. Εκτός αυτού, δεν κινδυνεύουν με θραύση, καθώς δεν περιέχουν γυαλί και αντέχουν σε θερμικές μεταβολές από  $-40^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $185^{\circ}\text{C}$ .

Επίσης, τα LED είναι ιδιαίτερα φιλικά προς το περιβάλλον, καθώς δεν περιέχουν γυαλί, ίνες υδραργύρου, μόλυβδο ή τοξικά αέρια αλογόνα, ενώ προκαλούν έμμεσα και μειωμένες εκπομπές  $\text{CO}_2$  προς το περιβάλλον.

Επίσης, τα LED είναι ιδανικά για εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται διαρκείς ενάυσεις και διακοπές, καθώς σε αυτή την περίπτωση αφενός δεν επηρεάζεται η λειτουργία τους και η διάρκεια ζωής τους και αφετέρου ο χρόνος επανέναυσης τους είναι της τάξεως των 60 nsec έναντι 10 msec ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των στοιχείων LED είναι το γεγονός ότι είναι ελαφρά και μικρά σε μέγεθος παρέχοντας ευελιξία σχεδιασμού εάν τοποθετηθούν πολλά στη σειρά. Τα led είναι δυνατό να κατασκευαστούν ώστε να παράγουν όλα τα δυνατά χρώματα του φάσματος δίχως τη χρήση φίλτρων και δεν επιδέχονται παρεμβολές από ραδιοφωνικές ή τηλεοπτικές συχνότητες καθώς επίσης και δεν υπάρχει μείωση της φωτεινότητας ή κιτρίνισμα το οποίο να σχετίζεται με απορρόφηση σκόνης ή ρύπανση, καθώς λειτουργούν σε χαμηλή τάση και θερμοκρασία. [22] [15] [11] [21]

Στα μειονεκτήματα των LED συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος τους, καθώς είναι πιο ακριβά από τους συμβατικούς λαμπτήρες φωτισμού. Επίσης, σε αντίθεση με τις άλλες τεχνολογίες φωτισμού, η δέσμη φωτός των LED τείνει να είναι περισσότερο κατευθυντική, δηλαδή η δέσμη φωτός εστιάζει περισσότερο σε ένα συγκεκριμένο σημείο παρά διαχέεται ομοιόμορφα στο χώρο. Το γεγονός αυτό αποτελεί μειονέκτημα για τις περισσότερες εφαρμογές γενικού φωτισμού όπου απαιτείται ομοιόμορφη κατανομή των lux στο χώρο, ωστόσο μπορεί να αποτελέσει πλεονέκτημα για εφαρμογές φωτιστικής διακόσμησης ή για περιπτώσεις τοπικού φωτισμού (χειρουργεία, εργοστάσια, γραφεία, φωτισμό δρόμου, κλπ)

Τα LED λόγω της περισσότερο κατευθυντικής δέσμης φωτός την οποία παράγουν και τα μοναδικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού τους, είναι δυνατό να αξιοποιηθούν για ποικίλες εφαρμογές. Φωτιστικά συστήματα LED είναι δυνατό να εγκατασταθούν κάτω από σκάλες, σε διαδρόμους, κήπους, γκαράζ, ακόμα και για φωτισμό δωματίου. Μια ακόμη εφαρμογή τους είναι ο φωτισμός κάτω από το νερό, όπως πισίνες και συντριβάνια, λόγω της αδιάβροχης τεχνολογίας τους. Ειδικές ομάδες LED είναι

δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τις ανακοινώσεις σε πινακίδες κυκλοφορίας, στους κοινόχρηστους χώρους, στις πλατείες ή σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικά έργα.



*Εικόνα 1-65: Φωτισμός γέφυρας με φωτιστικά Led [21]*

Επίσης υπάρχουν αμέτρητες εφαρμογές για τοπικό φωτισμό σε συνέδρια, εκδηλώσεις, μουσικές και θεατρικές σκηνές και σε άλλους χώρους διασκέδασης. Τα LED επίσης βρίσκουν εφαρμογή στο φωτισμό δρόμων ή χώρων σταθμεύσεως (parking). Τα LED αποτελούν εξαιρετική λύση για απευθείας σύνδεση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά, καθώς είναι δυνατό να τροφοδοτηθούν με συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης. [22] [15] [11] [21]

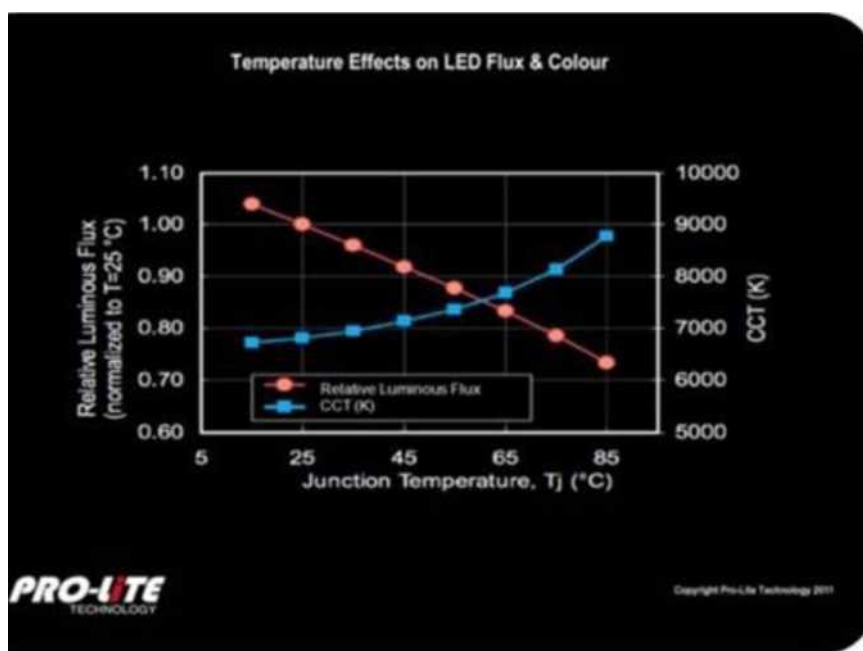
#### *1.2.7.4 Συνέπειες της θερμότητας στην λειτουργία των LED*

Η έκλυση θερμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση των LED και η επίλυση του προβλήματος αυτού αποτελεί βασικό σημείο ενδιαφέροντος στην περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας.

Το LED ως συσκευή αποτελείται από διάφορα επιμέρους εξαρτήματα: την ψηφίδα η οποία εκλύει σχεδόν μονοχρωματική μπλε ακτινοβολία, τον φώσφορο ο οποίος απορροφά την μπλε και επανακτινοβολεί λευκή με κάποιες απώλειες, τον προστατευτικός φακό της ψηφίδας, καθώς και τη βάση στην οποία όλα τα παραπάνω τοποθετούνται. Όλα τα επιμέρους αυτά εξαρτήματα, έχουν συμβολή με διαφορετικό τρόπο στην γήρανση του LED ως συνόλου λόγω θερμότητας.

Υπάρχουν πολλά υλικά τα οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της ψηφίδας. Πληροφορίες για την θερμική απόδοση των υλικών αυτών σπάνια γνωστοποιούνται από τους κατασκευαστές LED, καθώς τα στοιχεία τα οποία δημοσιοποιούν αφορούν το LED ως σύνολο και όχι κάθε εξάρτημα ξεχωριστά. Υπάρχει μια απόλυτη θερμοκρασία πέραν της οποίας η ψηφίδα παύει να λειτουργεί, αλλά εκτός αυτού, όταν η ψηφίδα βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη κάποιων ορίων, το φάσμα εκπομπής της μεταβάλλεται πέραν του μονοχρωματικού μπλε. Ακόμη και μια μικρή αλλαγή στο φάσμα ακτινοβολίας της ψηφίδας επηρεάζει την ικανότητα του φωσφόρου να απορροφήσει την ακτινοβολία, με συνέπεια την πτώση της απόδοσης του LED.

Οι φώσφοροι είναι τα συστατικά τα οποία επηρεάζονται περισσότερο από την αύξηση της θερμοκρασίας τους, καθώς μειώνεται η απόδοσή τους όσον αφορά την απορρόφηση συγκεκριμένων μηκών κύματος εφέροντας μείωση της συνολικής απόδοσης. Ιδιαίτερα οι φώσφοροι οι οποίοι εκλύουν το κόκκινο χρώμα εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στην αύξηση της θερμοκρασίας, και η επίλυση του προβλήματος αυτού αποτελεί πεδίο επιστημονικής έρευνας.

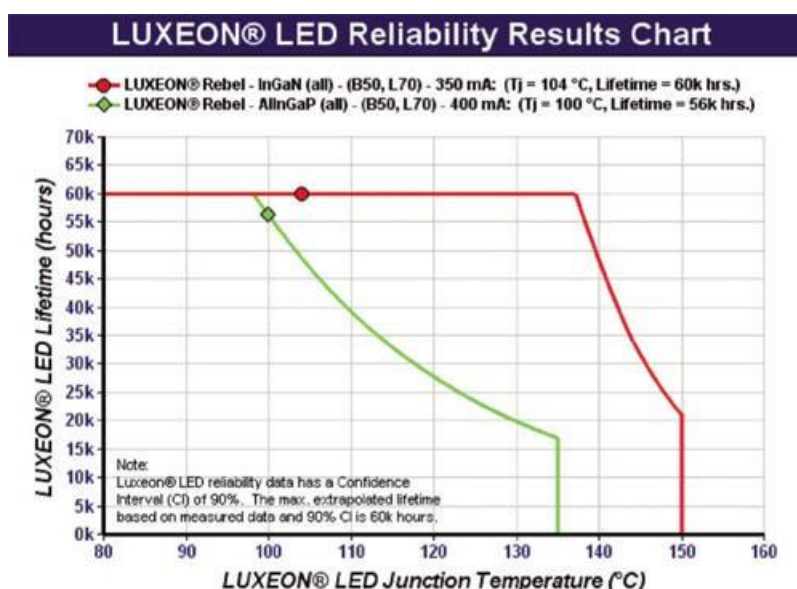


Εικόνα 1-66: Μεταβολή φωτεινής ροής / Θερμοκρασίας χρώματος με θερμοκρασία διεπιφάνειας [2]

Ο προστατευτικός φακός της ψηφίδας του LED οφείλει να είναι ανθεκτικός και συνάμα οπτικά καθαρός. Η τελευταία παράμετρος είναι ένα ζήτημα το οποίο προκύπτει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η έκθεση του φακού σε υψηλές

θερμοκρασίες του προσδίδει ένα κιτρινωπό χρώμα, μεταβάλλοντας το φάσμα εκπομπής της ψηφίδας και ως αποτέλεσμα και την απόδοση του LED. Επίσης, η βάση οφείλει να είναι σχεδιασμένη με σκοπό να αντέχει υψηλές θερμοκρασίες και για μεγάλη χρονική διάρκεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις αποκτά κιτρινωπό χρώμα και επηρεάζει με τον δικό του τρόπο την απόδοση του LED. Με ανακοίνωση της η εταιρεία Cree το 2010 δήλωσε πως, «ο κύριος λόγος ποιοτικής υποβάθμισης και γήρανσης του LED είναι η ίδια του η βάση». [2] [11] [15] [8]

Η μεγαλύτερη επίδραση της θερμοκρασίας όσον αφορά την επίδοση των LED είναι η πτώση τάση πόλωσης τους. Το ποσοστό της πτώσης δεν είναι συγκεκριμένο και μεταβάλεται από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Τα περισσότερα τεχνικά φυλλάδια αναφέρουν πως η πτώση της τάσης πόλωσης κυμαίνεται από  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$  έως  $-4\text{mV}/^\circ\text{C}$  δίχως όμως να δημοσιοποιείται κάποια χαρακτηριστική καμπύλη μεταξύ της θερμοκρασίας και της τάσης πόλωσης.



Εικόνα 1-67: Η αντοχή στην θερμοκρασία της διεπαφής για δυο διαφορετικά LED [2]

Στην περίπτωση που το LED λειτουργεί υπό σταθερό ρεύμα, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, η τάση πόλωσης μειώνεται. Επομένως, η πτώση τάσης προκαλεί πτώση της ηλεκτρικής ισχύος την οποία απορροφά η συσκευή, και αυτή εν συνεχεία μείωση της φωτεινής ροής της συσκευής.

Ένας τρόπος για να διατηρηθεί η φωτεινή ροή ανέπαφη από την πτώση της τάσης πόλωσης, είναι η λειτουργία των φωτοδιόδων υπό σταθερή ισχύ. Με την μέθοδο αυτή θα πρέπει να αυξάνεται το ρεύμα, ώστε το γινόμενο  $P = V \cdot I$  να παραμένει σταθερό.

[2] [11] [15] [8]

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο κομμάτι της οπτικής είναι πολύπλευρη και αφορά όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του LED. Οι πλέον άμεσες και σημαντικές επιδράσεις αφορούν την φωτεινότητα και την απόδοση σε lm/W. Ο συνήθης τρόπος λειτουργίας των LED είναι υπό σταθερό ρεύμα. Κατά συνέπεια, η πτώση της τάσης πόλωσης υπό σταθερό ρεύμα προκαλεί πτώση της ισχύος του LED και επομένως και της φωτεινής ροής. Στα περισσότερα τεχνικά φυλλάδια παρέχεται η καμπύλη η οποία συσχετίζει την φωτεινότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επομένως η μείωση της απόδοσης της συσκευής προκαλείται από την μείωση της ισχύος αλλά και από την πτώση της απόδοσης των οπτικών του μέσων, δηλαδή του προστατευτικού φακού και κυρίως των φωσφόρων.

Η χρήση των LED στα φωτιστικά δρόμου και όχι μόνο, έχει δημιουργήσει αυξημένες ανάγκες για παραγωγή φωτιστικών με μεγαλύτερη ισχύ, σε σύγκριση με τις έως τώρα χρήσεις των LED. Τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα LED είναι το σύστημα συστοιχίας LED (LED array system), στο οποίο πολλά LED βρίσκονται συνδεδεμένα, και το σύστημα COB (chips on board) όπου πολλά LED είναι πακτωμένα μεταξύ τους προκαλώντας την εντύπωση ενός μεγαλύτερου LED. Και στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις η ανάγκη για έλεγχο της εκλυόμενης θερμότητας είναι επιτακτική.

Τα LED ή φωτοεκπέμπουσες δίοδοι παράγουν φως και θερμότητα σε συνάρτηση με την ισχύ η οποία τους παρέχεται. Η επιφάνεια ενός συστήματος LED είναι ιδιαίτερα μικρή και καθίσταται σχεδόν αδύνατο η παραγόμενη θερμότητα να διαφύγει δίχως εξωτερική επίδραση στο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό καθίσταται απαραίτητη η χρήση εξωτερικού συστήματος ψύξης (heat sink) με σκοπό τη διατήρηση του LED σε φυσιολογικά επίπεδα θερμοκρασίας. Η απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας από το τσιπ των LED γίνεται μέσω της απαγωγής της θερμότητας.

Χαρακτηριστικό είναι η θερμοκρασία διεπιφάνειας (junction),  $T_j$  (°C). Η θερμοκρασία  $T_j$  είναι απαραίτητο να ελέγχεται και να μην υπερβαίνει τις τιμές τις οποίες δίνει ο κατασκευαστής των LED. Η θερμοκρασία στην διεπιφάνεια του LED έχει άμεση σύνδεση με τον χρόνο ζωής του LED και η πιθανή υψηλή τιμή της προκαλεί μείωση του εκτιμώμενου χρόνου ζωής του συστήματος και μείωσης της απόδοσης των LED. Στόχος όλων των κατασκευαστών φωτιστικών με βάση τα LED αποτελεί η υιοθέτηση ενός αποτελεσματικού συστήματος ψύξης ούτως ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση στο έπακρο των τεράστιων δυνατοτήτων της τεχνολογίας SSL (solid state technology). [2] [11] [15] [8]

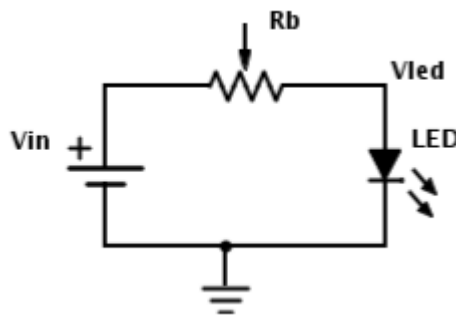
### 1.2.7.5 Οδήγηση και τοπολογίες σύνδεσης LED

Η ορθή οδήγηση ενός LED, ή ενός κυκλώματος με περισσότερα LED, έγκειται στον έλεγχο των λειτουργικών χαρακτηριστικών (τάση και ρεύμα) του κυκλώματος, με σκοπό τη μείωση της ευαισθησία του κυκλώματος σε ανεπιθύμητες μεταβολές αυτών, και την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου φωτεινότητας, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των απωλειών.

Τα ανωτέρω επιτυγχάνονται με τη χρήση εξειδικευμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και τεχνικών οδήγησης LED. [19]

#### Αντίσταση Περιορισμού Ρεύματος

Η πόλωση των LED στην επιθυμητή τάση αποτελεί την απλούστερη μέθοδο οδήγησης LED, όπως αυτή προσδιορίζεται μέσω του επιθυμητού επιπέδου φωτεινότητας και επομένως ρεύματος, με τη χρήση της αντίστασης  $R_{ballast}$  η οποία είναι συνδεδεμένη εν σειρά.



Εικόνα 1-68: Οδήγηση LED με αντίσταση σειράς [19]

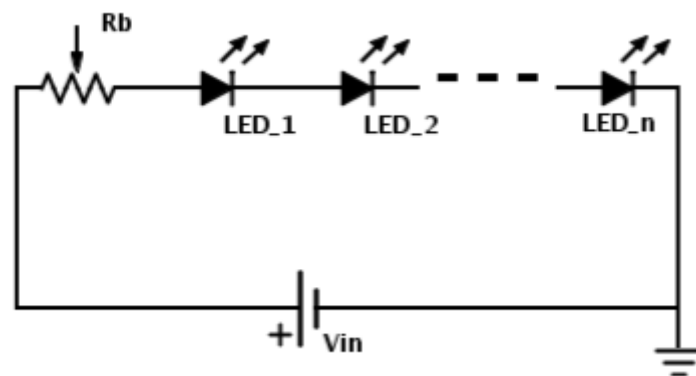
Στην περίπτωση αυτή, για την επίτευξη του επιθυμητού ζεύγους τάσης-ρεύματος ( $V_{LED}-I_{LED}$ ), παραγματοποιείται η επιλογή της αντίστασης σειράς με βάση τον τύπο:

$$R_b = \frac{V_R}{I_{LED}} = \frac{V_{in} - V_{LED}}{I_{LED}}$$

Με τον τρόπο αυτό, κατά την εισαγωγή μιας επιπλέον πτώσης τάσης κατά μήκος της  $R_b$ , αντισταθμίζεται η τάση εισόδου και προκαλείται η επιθυμητή πτώση τάσης κατά μήκος του LED. Με την ρύθμιση της τιμής της αντίστασης είναι δυνατή, θεωρητικά, η επίτευξη του κατά περίπτωση επιθυμητού αποτελέσματος. Η υλοποίηση αυτή κρίνεται εξαιρετικά απλή με αμελητέο από άποψη υλικών κόστος. Όπως είναι εμφανές το συγκεκριμένο κύκλωμα προκαλεί την εισαγωγή πρόσθετων απωλειών με τη μορφή θερμότητας πάνω στην αντίσταση. Η ισχύς η οποία καταναλώνεται στην αντίσταση είναι:

$$P_R = \frac{V_R^2}{R_b} = \frac{(V_{in} - V_{LED})^2}{R_b}$$

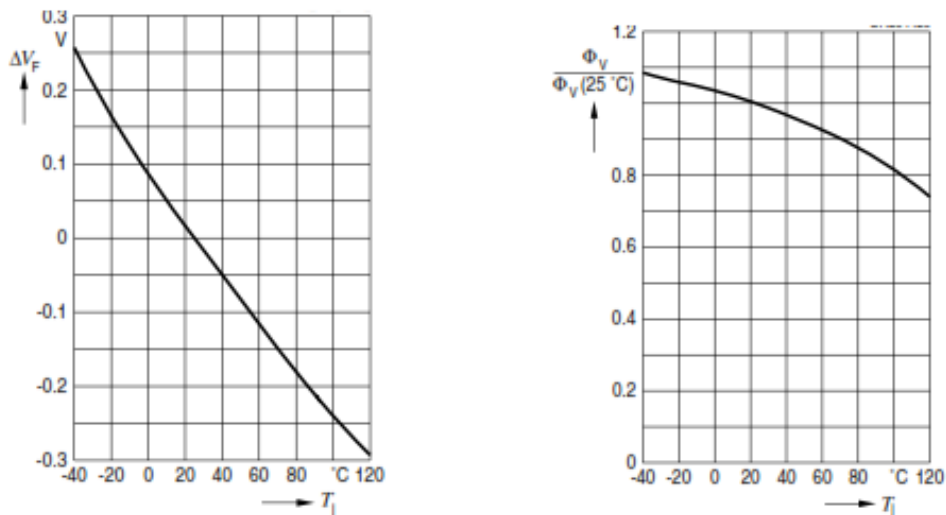
Κατά συνέπεια, όσο περισσότερο απέχει η  $V_{LED}$ , η οποία αποτελεί τον επιθυμητό στόχο, από την τάση τροφοδοσίας, τόσο οι απώλειες του κυκλώματος αυξάνονται. Επομένως, για την εκμετάλλευση της συγκεκριμένης διάταξης με το βέλτιστο δυνατό τρόπο, θα πρέπει να τροφοδοτηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα LED εν σειρά, μέχρις ότου η διαφορά,  $V_{in} - nV_{LED}$ , να ελαχιστοποιηθεί και κατά συνέπεια να ελαχιστοποιηθεί και η απαιτούμενη τιμή της αντίστασης σειράς. [19]



*Εικόνα 1-69: Οδήγηση πολλαπλών LED με αντίσταση σειράς για μείωση των απωλειών [19]*

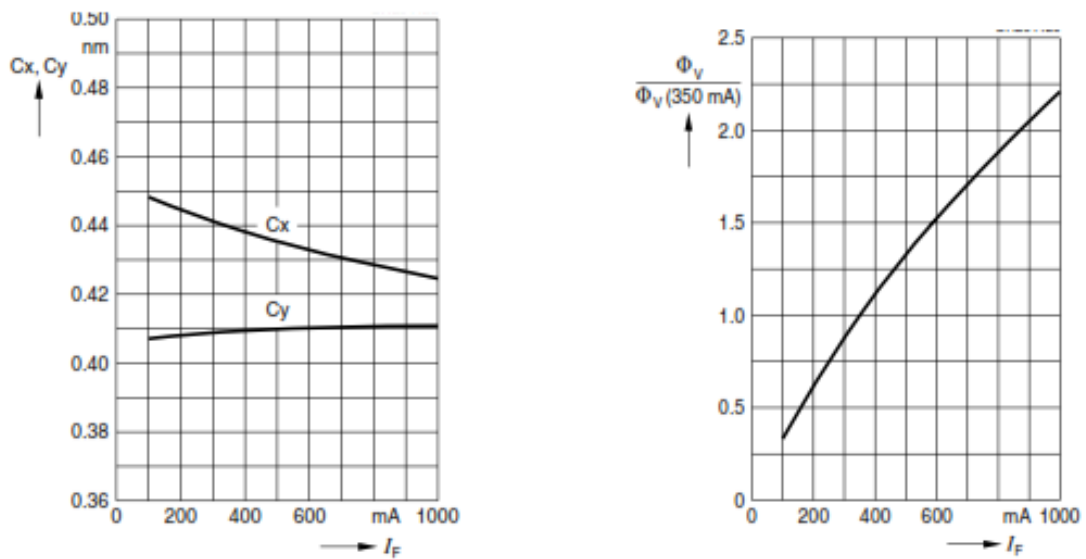
Ένα επιπλέον μειονέκτημα της οδήγησης LED με αντίσταση περιορισμού ρεύματος, αποτελεί η αδυναμία του κυκλώματος να επιβάλει αντιστάθμιση των μεταβολών του ρεύματος οδήγησης του LED, οι οποίες είναι δυνατό να οφείλονται σε μεταβολές της θερμοκρασίας ή σε διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας καθώς και σε κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις της ονομαστικής τάσης ορθής πόλωσης, οι οποίες είναι δυνατό να παρουσιάζονται μεταξύ δυο LED. Συγκεκριμένα, οι διακυμάνσεις της τάσης εξόδου μιας μπαταρίας ή ενός τροφοδοτικού, οι οποίες είναι δυνατό να φτάνουν έως το  $\pm 10\%$ , είναι δυνατό να προκαλέσουν δυσανάλογα μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης κατά μήκος των LED και κατά συνέπεια του ρεύματος οδήγησης τους. Αντίστοιχα προβλήματα προκαλούνται από την αύξηση της θερμοκρασίας της ημιαγωγικής επαφής p-n του LED, η οποία συνεπάγεται αλλαγή της πτώσης τάσης στα άκρα του), και επομένως αλλαγή του ρεύματος και της φωτεινότητας.





Εικόνα 1-70: Εξάρτηση τάσης και φωτεινότητας των LED από τη θερμοκρασία [19]

Οι μεταβολές αυτές των χαρακτηριστικών λειτουργίας των LED προκαλούν τη διακύμανση της έντασης αλλά και του χρώματος του εκπεμπόμενου φωτός και κατά συνέπεια συνηγορούν σε μειωμένη αξιοπιστία της εφαρμογής φωτισμού. [19]

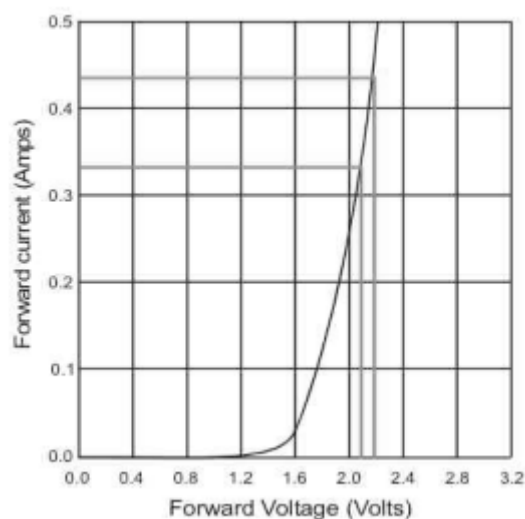


Εικόνα 1-71: Εξάρτηση του χρώματος και της φωτεινότητας των LEDs από το ρεύμα οδήγησης [19]

Είναι εμφανές, ότι τα LED εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στις αλλαγές του ρεύματος οδήγησής τους. Σημειώνεται ότι οι πιθανές αυτές διακυμάνσεις του ρεύματος, είναι δυνατό να το οδηγήσουν σε τιμές υψηλότερες της μέγιστης επιτρεπτής, όπως αυτή ορίζεται από τον κατασκευαστή. Τα αποτελέσματα του φαινομένου αυτού αποδεδεικνύονται καταστρεπτικά. Για το λόγο αυτό, καθίσταται ως κύριο μέλημα στην οδήγηση LED η διατήρηση σταθερού ρεύματος. [19]

### Πηγή Σταθερού Ρεύματος

Κατά τη μελέτη της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης ενός LED, παρατηρείται ότι, κατά την οδήγηση του, το λειτουργικό χαρακτηριστικό το οποίο θα πρέπει να ελέγχεται, είναι το ρεύμα. Η απότομη κλίση της καμπύλης I-V έχει ως αποτέλεσμα την αντιστοίχιση ιδιαίτερα μικρών μεταβολών της τάσης πόλωσης του LED σε ιδιαίτερα μεγάλες μεταβολές του ρεύματος.



*Εικόνα 1-72: Μικρές μεταβολές της τάσης προκαλούν μεγάλες μεταβολές στο ρεύμα του LED [19]*

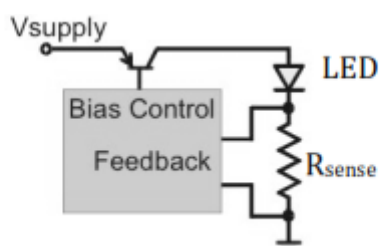
Το γεγονός αυτό, έχει ως αποτέλεσμα η οδήγηση με έλεγχο τάσης να αποδεικνύεται εξαιρετικά δύσκολη και αναξιόπιστη. Σε κάθε περίπτωση, με βάση τα προαναφερθέντα, η διατήρηση σταθερού ρεύματος οδήγησης, δίνει τη δυνατότητα στην εξεταζόμενη εφαρμογή φωτισμού να διαθέτει την απαραίτητη αξιοπιστία. [19]

Αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί με την τροφοδότηση των LED από πηγή σταθερού ρεύματος. Επομένως η δεύτερη εναλλακτική, η οποία είναι και η πλέον συνηθισμένη λύση στο πρόβλημα της οδήγησης LED, είναι η χρησιμοποίηση κυκλωμάτων, τα οποία επιτηρούν διαρκώς το ρεύμα οδήγησης και έχουν τη δυνατότητα να το ρυθμίζουν καταλλήλως, με σκοπό να το διατηρούν σταθερό, ανεξαρτήτως των διαφόρων μεταβολών οι οποίες θα μπορούσαν να το επηρεάσουν, όπως επί παραδείγματι η διακύμανση της τάσης τροφοδοσίας και η μεταβολή της θερμοκρασίας. Τα εν λόγω κυκλώματα είναι δυνατό να διχωριστούν σε δύο κατηγορίες:

1. Γραμμικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος (Linear Current Supply)
2. Διακοπτικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος (Switching Current Supply)

### Γραμμικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος

Η λειτουργία των γραμμικών τροφοδοτικών έχει ως βάση τη χρήση ενός τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET), το οποίο λειτουργεί στην ενεργό περιοχή και έχει τη λειτουργία μεταβλητής αντίστασης ελεγχόμενης από τάση. Το FET συνδέεται εν σειρά με το φορτίο και η πύλη του οδηγείται από έναν μικροελεγκτή ή κάποιο λογικό κύκλωμα. Με την ανωτέρω διαδικασία δημιουργείται ένας διαιρέτης τάσης, ελεγχόμενου λόγου διαίρεσης, ο οποίος έχει ως είσοδο την τάση τροφοδοσίας. Μια σταθερή τάση αναφοράς συγκρίνεται με την τάση κατά μήκος του φορτίου, το αντίστοιχο σφάλμα ενισχύεται και οδηγείται, μέσω ενός κυκλώματος ανάδρασης, στο λογικό κύκλωμα οδήγησης της πύλης του FET. Η τάση στην πύλη του FET ρυθμίζεται καταλλήλως, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής τάσης στα άκρα του φορτίου. Με τον ίδιο τρόπο καθίσταται δυνατή και η παροχή σταθερού ρεύματος στο φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση επιτηρείται η τάση στα άκρα μιας πολύ μικρής αντίστασης  $R_{sense}$ , η οποία συνδέεται εν σειρά με το φορτίο και πραγματοποιείται η κατάλληλη ρύθμιση της τάσης η οποία εφαρμόζεται στην πύλη του FET, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επίτευξη της επιθυμητής τιμής ρεύματος.



*Εικόνα 1-73: Γραμμικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος [19]*

Η συνεχής επιτήρηση και ο έλεγχος της τάσης στα άκρα της  $R_{sense}$ , επιφέρουν τη διατήρηση του ρεύματος το οποίο τη διαρρέει, και κατά συνέπεια διαρρέει και το φορτίο το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το προς οδήγηση LED, σε μια σταθερή προκαθορισμένη τιμή. Με τον τρόπο αυτό, το ρεύμα οδήγησης του LED, καθίσταται ανεξάρτητο από τις διάφορες ανεπιθύμητες μεταβολές και πραγματοποιείται η επιθυμητή αξιοπιστία της εφαρμογής φωτισμού. [19]

Με βάση τα ανωτέρω, η οδήγηση LED με γραμμικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος, έχει ως βάση τον έλεγχο ενός διαιρέτη τάσης. Επομένως η χρήση του FET ως αντίσταση και η τεχνητά προκαλούμενη πτώση τάσης κατά μήκος του, επιφέρουν την απώλεια ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Παρομοίως με την περίπτωση της οδήγησης με αντίσταση περιορισμού ρεύματος, όσο περισσότερο απέχει η τάση τροφοδοσίας από την επιθυμητή τάση πώλωσης του LED, τόσο περισσότερες

απώλειες εμφανίζονται. Κατά συνέπεια, κρίνεται απαραίτητο, ο αριθμός των οδηγούμενων LED,  $n$ , να είναι ο μέγιστος δυνατός, προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της διαφοράς  $V_{in}-nV_{LED}$  και κατά συνέπεια να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Σε κάθε περίπτωση, η οδήγηση LED με γραμμικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί, αποκλειστικά και μόνο στην περίπτωση όπου η τάση τροφοδοσίας είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των επιμέρους τάσεων πώλωσης των οδηγούμενων LED,  $nV_{LED}$ . [19]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης γραμμικών τροφοδοτικών ρεύματος στην οδήγηση LED είναι η απλότητα της σχεδίασης και το μικρό κόστος υλικών και κατασκευής. Τα απαραίτητα κυκλώματα για την υλοποίηση αυτή, παρέχονται σε ολοκληρωμένη μορφή (IC), με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του «αποτυπώματος» (footprint) της κατασκευής, ενώ τα εξωτερικά στοιχεία τα οποία απαιτούνται είναι ελάχιστα. Παράλληλα, η απουσία διακοπτικών στοιχείων από το κύκλωμα, καθιστά τη διάταξη ακίνδυνη, από άποψη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC). Το ομειονέκτημα της της χρήσης γραμμικών τροφοδοτικών ρεύματος στην οδήγηση LED είναι οι απώλειες οι οποίες προκαλούνται στο FET και η ανάγκη απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας. Οι απώλειες αυτές παρουσιάζονται σημαντικά μειωμένες συγκριτικά με τις αντίστοιχες της αντίστασης περιορισμού ρεύματος, θα πρέπει ωστόσο, να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν κατά το σχεδιασμό της διάταξης και να προβλέπεται η χρήση ψηκτρών για την απαγωγή της θερμότητας. [19]

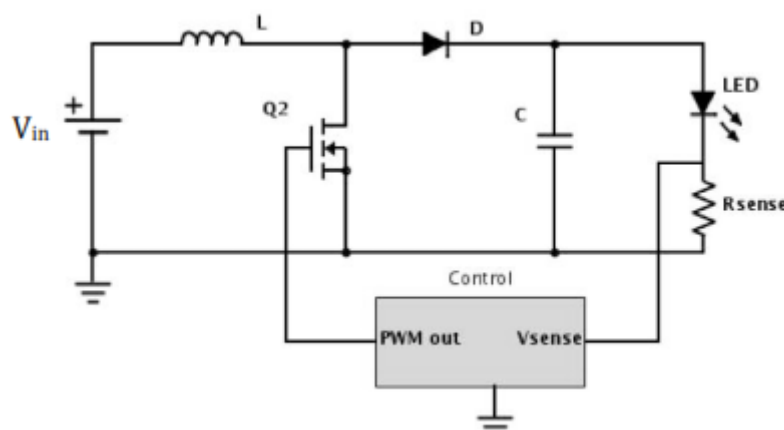
#### Διακοπτικά Τροφοδοτικά Σταθερού Ρεύματος

Η λειτουργία των διακοπτικών τροφοδοτικών έχει ως βάση τη χρήση μετατροπέων συνεχούς τάσης (DC-DC), για τη μετατροπή ενός επιπέδου συνεχούς τάσης, σε ένα άλλο, υψηλότερο ή χαμηλότερο, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τοπολογία. Οι DC-DC μετατροπείς κάνουν χρήση διακοπτικών στοιχείων υψηλών συχνοτήτων, όπως τα MOSFET και τα IGBT, αναλόγως με την ισχύ της εφαρμογής, τα οποία οδηγούνται από σήματα διαμορφωμένου εύρους παλμού (PWM). Οι διατάξεις αυτές είναι σε θέση να ανυψώνουν ή να υποβιβάζουν την τάση την οποία λαμβάνουν στην είσοδο τους, αναλόγως με το Duty Cycle του σήματος οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων. Η τροφοδότηση ενός φορτίου με σταθερό ρεύμα, πραγματοποιείται με την επίτευξη της διαρκούς επιτήρησης της πτώσης τάσης στα άκρα μιας πολύ μικρής αντίστασης  $R_{sense}$ , η οποία συνδέεται σε σειρά με αυτό. Εν συνεχεία η μετρούμενη τάση συγκρίνεται με την επιθυμητή τάση αναφοράς και το αντίστοιχο σφάλμα

ενισχύεται και οδηγείται μέσω κατάλληλου κυκλώματος ανάδρασης στο λογικό κύκλωμα οδήγησης της πύλης του διακοπτικού στοιχείου. Η κατάλληλη ρύθμιση του Duty Cycle του PWM σήματος, από το λογικό κύκλωμα, δίνει τη δυνατότητα μετατροπής του επιπέδου της τάσης εξόδου καταλλήλως, με σκοπό την εξασφάλιση της διατήρησης του ρεύματος, το οποίο διαρρέει την  $R_{sense}$  και κατά συνέπεια το φορτίο, σε μια σταθερή και προκαθορισμένη τιμή. Οι πλέον συνήθεις τοπολογίες DC-DC μετατροπέων για την οδήγηση LED, είναι οι εξής: [19]

- Μετατροπέας Ανύψωσης (Boost)
- Μετατροπέας Υποβιβασμού (Buck)
- Μετατροπέας Ανύψωσης/Υποβιβασμού (Buck-Boost)

Οι μετατροπείς τύπου Boost, εφαρμόζονται αποκλειστικά σε περιπτώσεις στις οποίες η τάση εξόδου είναι απαραίτητο να είναι υψηλότερη από την τάση τροφοδοσίας.



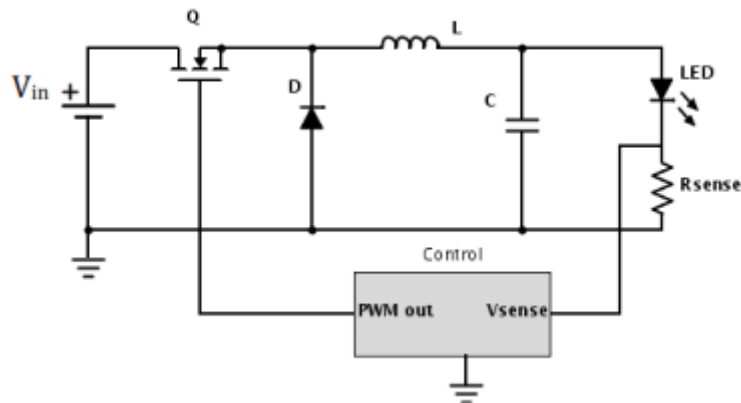
Εικόνα 1-74: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου boost [19]

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών φωτισμού, καθίσταται αναγκαία η σύνδεση πολλών LED εν σειρά, λόγω ορισμένων πλεονεκτημάτων τα οποία παρουσιάζει η συγκεκριμένη τοπολογία. Κατά συνέπεια, το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των LED,  $nV_{LED}$ , ξεπερνάει την τάση τροφοδοσίας. Η διάταξη του μετατροπέα ανύψωσης καθίσταται ιδανική στην περίπτωση αυτή. [19]

Οι μετατροπείς τύπου Buck, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η τάση εξόδου κρίνεται αναγκαίο να είναι χαμηλότερη από την τάση τροφοδοσίας και αποτελούν τον ιδανικό αντικαταστάτη των γραμμικών τροφοδοτικών ρεύματος. [19]

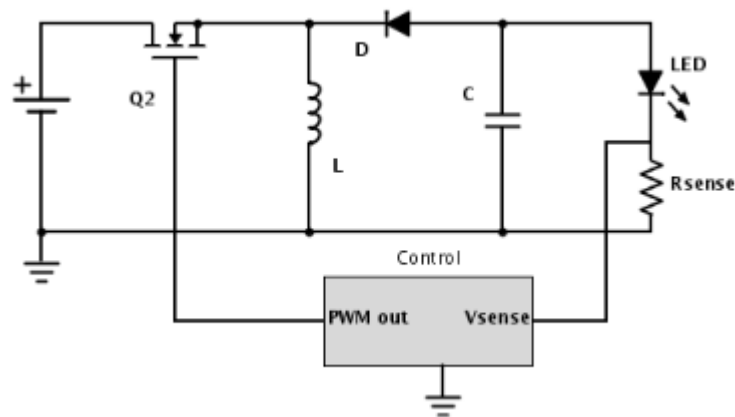
Όπως προαναφέρθηκε, σε εφαρμογές, στις οποίες ο αριθμός,  $n$ , των LED είναι αρκετά μικρός, με αποτέλεσμα η διαφορά,  $V_{in}-nV_{LED}$ , να είναι μεγάλη, τα γραμμικά τροφοδοτικά εμφανίζουν υψηλές απώλειες. Στην περίπτωση αυτή, οι μετατροπείς υποβιβασμού, καθίστανται η ιδανική εναλλακτική λύση, με την προϋπόθεση να

υπάρχει αιτιολογείται το αυξημένο τους κόστος λόγω του ποσοστού απωλειών του γραμμικού τροφοδοτικού. [19]



Εικόνα 1-75: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου Buck [19]

Οι μετατροπείς τύπου Buck-Boost αφορούν αφενός τις περιπτώσεις όπου η τάση τροφοδοσίας είναι δυνατό να παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, ξεπερνώντας την τάση του φορτίου ή πέφτοντας χαμηλότερα από αυτήν, αφετέρου τις περιπτώσεις όπου η τάση του φορτίου είναι δυνατό να πάρει τιμές μεγαλύτερες ή μικρότερες από την τάση τροφοδοσίας.



Εικόνα 1-76: Διακοπτικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος τύπου Buck-boost [19]

Η χρήση μετατροπέα Buck-Boost κρίνεται απαραίτητη σε εφαρμογές όπου τα LED οφείλουν να έχουν τη δυνατότητα τροφοδοσίας από ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών πηγών, για λόγους συμβατότητας και ευελιξίας. Η χρήση μετατροπέα Buck-Boost κρίνεται επίσης απαραίτητη σε εφαρμογές όπου τα LED τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη πηγή τάσης μέσω ανορθωτή, στην οποία η ανορθωμένη τάση κυμαίνεται μεταξύ του 0 και της μέγιστης τιμής. Τέλος μια διάταξη οδήγησης LED με βάση την τοπολογία Buck-Boost, δίνει τη δυνατότητα τροφοδότησης πολλών

διαφορετικών φορτίων, είτε αυτά αποτελούνται από μικρό είτε από μεγαλύτερο αριθμό LED. [15]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των διακοπτικών τροφοδοτικών, έγκειται στην ιδιαίτερα υψηλή απόδοσή τους. Η χρήση των διακοπτικών στοιχείων ως διακοπών και η μη λειτουργία τους στην ενεργό περιοχή συμβάλει σε σημαντική μείωση των απωλειών και έχει ως αποτέλεσμα αποδόσεις μεγαλύτερες του 90%. Άμεση συνέπεια είναι και η σημαντικά μειωμένη ανάγκη για απαγωγή θερμότητας, με αποτέλεσμα να μην καθίσταται αναγκαία η επιβάρυνση της κατασκευής με τη χρήση ψηκτρών. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζουν τα διακοπτικά τροφοδοτικά, θα πρέπει σημειωθεί το υψηλό κόστος υλικών και η αυξημένη πολυπλοκότητα κατασκευής καθώς και η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών λόγω των χρησιμοποιούμενων διακοπτικών συχνοτήτων. Η χρήση των εν λόγω διατάξεων κρίνεται συμφέρουσα, σε σύγκριση με τη χρήση γραμμικών τροφοδοτικών, σε εφαρμογές αυξημένης ισχύος, ενώ το αυξημένο κόστος αντισταθμίζεται από τις πολύ υψηλές αποδόσεις και τη μη χρήση ψυκτικών διατάξεων. Οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν διαθέσιμες έτοιμες διατάξεις, στις οποίες το διακοπτικό στοιχείο και το κύκλωμα ελέγχου παρέχονται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, ενώ είναι απαραίτητη η εξωτερική σύνδεση του επαγωγέα και ορισμένων στοιχείων του κυκλώματος ανάδρασης και των φίλτρων εισόδου-εξόδου. Οι διατάξεις αυτές, τις περισσότερες φορές, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση και των τριών τοπολογιών οι οποίες παρουσιάστηκαν. [19]

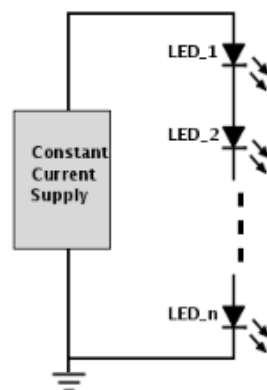
Με την αύξηση της απαίτησης για φωτεινή ισχύ, μιας εφαρμογής φωτισμού, παρουσιάζεται και αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων LED, τα οποία οφείλουν να συνθέτουν τη φωτεινή πηγή. Κατά τη χρησιμοποίηση περισσότερων του ενός LED, σε μια εφαρμογή, προκαλείται ο εύλογος προβληματισμός, σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο είναι βέλτιστο τα LED να συνδέονται μεταξύ τους, καθώς και με το κύκλωμα οδήγησης. Η ορθή επιλογή της διάταξης των LED, έχει ως αποτέλεσμα την εξασφάλιση της ορθής οδήγησης και την αποτελεσματική λειτουργία της εφαρμογής ενώ παράλληλα προσδίδει την απαραίτητη αξιοπιστία. Οι τρεις δυνατές τοπολογίες οι οποίες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν από τον κατασκευαστή της εφαρμογής είναι οι εξής: [19]

- Σύνδεση εν σειρά (Series)
- Σύνδεση σε παράλληλες σειρές (Parallel Strings)
- Σύνδεση «πίνακα» (Matrix)

Οι κύριοι άξονες για την αξιολόγηση των τοπολογιών σύνδεσης των LED, είναι, τα απαιτούμενα επίπεδα τάσης και ρεύματος, η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης διαμέσου των LED και η συμπεριφορά της εξεταζόμενης διάταξης σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED. Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης των LED, καθορίζει το επίπεδο της τάσης με την οποία θα είναι απαραίτητο να οδηγηθεί το κύκλωμα, με σκοπό την επίτευξη του απαιτούμενου ρεύματος οδήγησης και κατά συνέπεια της απαραίτητης φωτεινότητας. Είναι εμφανές ότι ο τρόπος σύνδεσης των LED επιφέρει άμεσες συνέπειες στη σχεδίαση του κυκλώματος οδήγησης, τις προδιαγραφές των υλικών τα οποία το αποτελούν, και την τοπολογία του. Επίσης, η ομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης, η οποία εξασφαλίζει την ομοιόμορφη καταπόνηση των LED και την ομοιομορφία στην φωτεινότητα, καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικής για την αξιοπιστία του συστήματος. Τα LED, εμφανίζουν δύο πιθανές καταστάσεις αποτυχίας, την αποτυχία λόγω μείωσης του εκπεμπόμενου φωτός και την ολική διακοπή λειτουργίας. Η αποτυχία λόγω μείωσης του εκπεμπόμενου φωτός, αποτελεί τη φυσιολογική εξέλιξη της εξάντλησης της διάρκειας ζωής του LED και έχει ως συνέπεια τη μείωση της φωτεινής ισχύος κατά 50%. Η ολική διακοπή λειτουργίας ενός LED, παρατηρείται λόγω της ανοιχτοκύκλωσης των επαφών του, η οποία, κατά κύριο λόγο, αποτελεί συνέπεια της υπερθέρμανσης, και των μηχανικών καταπονήσεων τις οποίες αυτή προκαλεί, και η οποία οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης των LED. Η επιλογής της τοπολογίας σύνδεσης των LED, καθορίζει τη συμπεριφορά της εφαρμογής, σε περίπτωση αποτυχίας ενός LED, η οποία διαφορετική και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν. [19]

#### Σύνδεση εν σειρά

Η εν σειρά σύνδεση των LED, σε μια εφαρμογή φωτισμού, αποτελεί την απλούστερη, δημοφιλέστερη, οικονομικότερη και πλέον αξιόπιστη λύση.



*Εικόνα 1-77: Τοπολογία σειράς. [19]*



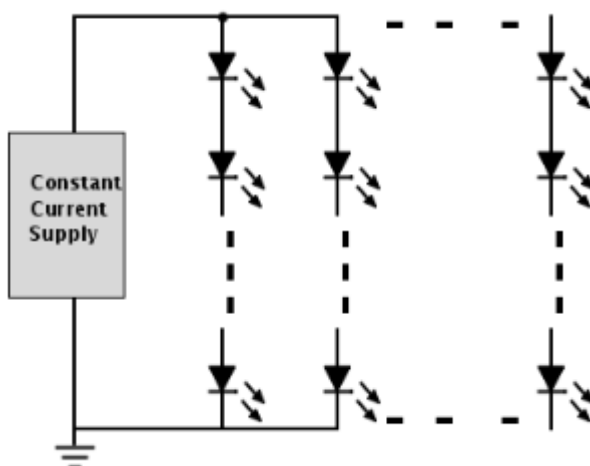
Το σημαντικότερο πλεονεκτήματα της εν λόγω τοπολογίας, έγκεται στο γεγονός ότι εξασφαλίζεται κοινό ρεύμα οδήγησης για όλα τα LED. Η ομοιομορφία της κατανομής του ρεύματος οδήγησης, επφέρει ομοιόμορφη φωτεινότητα και ομοιόμορφη καταπόνηση, από άποψη ρεύματος και αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, ενώ παράλληλα επιφέρει ελαχιστοποίηση της επίδρασης της πιθανής διακύμανσης του ρεύματος εξόδου, την οποία είναι δυνατό να εμφανίζει το τροφοδοτικό, λόγω κακού σχεδιασμού. Η υλοποίηση της συνδεσμολογίας αυτής κρίνεται εξαιρετικά απλή και έχει ως απαίτηση τη χρήση επιπλέον εξαρτημάτων. Η συγκεκριμένη τοπολογία, ωστόσο, παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Η σύνδεση μεγάλου αριθμού LED εν σειρά, φέρει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αθροίσματος των επιμέρους τάσεων ορθής πόλωσης και κατά συνέπεια την απαίτηση για υψηλή τάση τροφοδοσίας. Επομένως, σε εφαρμογές υψηλής φωτεινής ισχύος, το επίπεδο της απαιτούμενης τάσης, είναι δυνατό ιδιαίτερα εύκολα να ξεπεράσει τις αντίστοιχες προδιαγραφές των εμπορικά διαθέσιμων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, από τα οποία θα πραγματοποιηθεί η κατασκευή των κυκλωμάτων οδήγησης. Η λύση του προβλήματος αυτού είναι δυνατό να επιτευχθεί με σχεδιασμό custom κυκλωμάτων οδήγησης, ο οποίος αυξάνει δυσανάλογα το κόστος της εφαρμογής. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της εν σειρά τοπολογίας, έγκεται στο γεγονός ότι σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED, πραγματοποιείται ανοιχτοκύκλωση ολόκληρης της σειράς με συνέπεια τη συνολική διακοπή λειτουργίας της εφαρμογής. Το γεγονός αυτό προκαλεί μείωση της αξιοπιστίας της εφαρμογής φωτισμού, με δεδομένο ότι η επιθυμητή αξιοπιστία είναι δυνατό να προσδιοριστεί αναλόγως την εφαρμογή με βάση την κρίση του σχεδιαστή. Συνήθως, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των LED της εφαρμογής, τόσο πιο ελκυστική καθίσταται η ιδέα υλοποίησης κάποιας εναλλακτικής συνδεσμολογίας. [19]

#### Σύνδεση σε παράλληλες σειρές

Έναν εναλλακτικό τρόπο σύνδεσης των LED αποτελεί ο σχηματισμός επιμέρους σειρών και, εν συνεχεία, η παράλληλη σύνδεση των σειρών αυτών μεταξύ τους.

Η συγκεκριμένη τοπολογία, αποτελεί λύση στα δύο βασικότερα προβλήματα, τα οποία εισάγονται με τη σύνδεση μεγάλου αριθμού LED εν σειρά. Η διάσπαση της διάταξης των LED σε επιμέρους παράλληλες σειρές, ίδιου αριθμού στοιχείων, επιτυγχάνει την εξασφάλιση της διατήρησης της απαιτούμενης τάσης τροφοδοσίας σε χαμηλά επίπεδα, ακόμα και στην περίπτωση όπου ο αριθμός των LED είναι αρκετά μεγάλος. Συγκεκριμένα σε αυτή την περίπτωση, η τάση τροφοδοσίας, θα καθίσταται

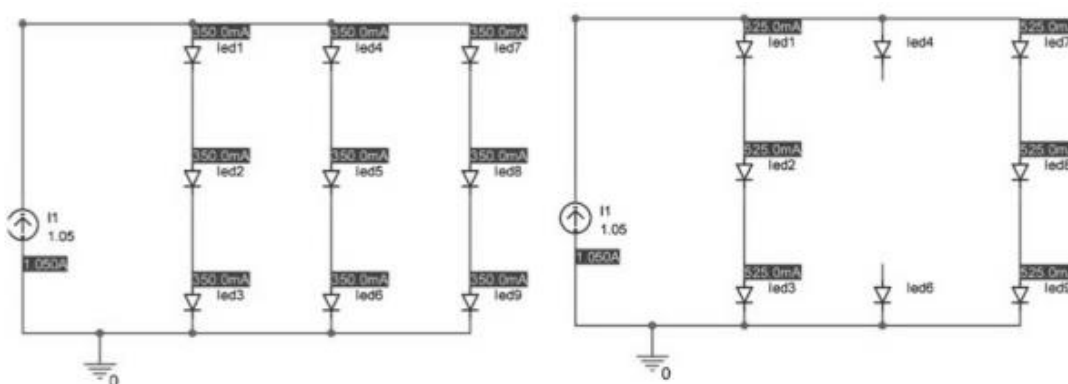
σε θεωρητικό πλαίσιο, η φορές μικρότερη από την αντίστοιχη τάση η οποία θα απαιτείται στην εν σειρά συνδεσμολογία, όπου  $n$ , ο αριθμός των παράλληλων σειρών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση του κινδύνου η εφαρμογή να εμφανιστεί εκτός των προδιαγραφών τάσης των διαφόρων εμπορικών στοιχείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση του αριθμού των παράλληλων σειρών συνεπάγεται την αύξηση του συνολικού ρεύματος οδήγησης, το οποίο απαιτείται για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου φωτεινότητας. Συγκεκριμένα το ρεύμα οδήγησης, στην περίπτωση αυτή, θα είναι  $n$  φορές μεγαλύτερο, από το αντίστοιχο ρεύμα στην εν σειρά συνδεσμολογία, όπου  $n$  είναι ο αριθμός των παράλληλων σειρών. Συνεπώς, μεγάλος αριθμός παράλληλων strings από LED, είναι δυνατό εύκολα να οδηγήσει την εφαρμογή, εκτός των προδιαγραφών ρεύματος των εμπορικά διαθέσιμων ηλεκτρονικών στοιχείων και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, από τα οποία θα πρέπει να συντεθεί το κύκλωμα οδήγησης.



Εικόνα 1-78: Τοπολογία παράλληλων σειρών [19]

Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα της εν λόγω τοπολογίας αποτελεί η μείωση της πιθανότητας ολικής διακοπής λειτουργίας της εφαρμογής και κατά συνέπεια η αύξηση της διάρκειας ζωής της. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED, η αντίστοιχη σειρά θα ανοιχτοκυκλωθεί και πραγματοποιηθεί παύση της λειτουργίας της. Με βάση το γεγονός ότι θα προσφέρεται εναλλακτική διαδρομή στο ρεύμα οδήγησης, το ρεύμα αυτό θα διαιρείται εκ νέου και θα μοιράζεται ομοιόμορφα σε θεωρητικό πλαίσιο στους εναπομείναντες παράλληλους κλάδους του κυκλώματος. Με βάση επίσης το γεγονός ότι το ρεύμα οδήγησης θα διατηρείται σταθερό, από το κύκλωμα τροφοδοσίας, ανεξαρτήτως του φορτίου, κάθε παράλληλος κλάδος, θα διαρρέεται πλέον, από μεγαλύτερη ποσότητα ρεύματος με αποτέλεσμα τα LED, να

παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση φωτεινής ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, πραγματοποιείται αντιστάθμιση της απώλεια της φωτεινής ισχύος, λόγω ανοιχτοκύκλωσης ενός κλάδου, και η συνολική φωτεινή ισχύς διατηρείται σε επίπεδα παρόμοια με τα αρχικά. Το γεγονός αυτό, προσδίδει αξιοπιστία στην εφαρμογή, προκαλεί αύξηση της διάρκειας ζωής της και μείωση του κόστους συντήρησης. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η καταπόνηση των εναπομείναντων LED με υψηλότερα ρεύματα, οδηγεί στη μείωση του προσδόκιμου ζωής τους και στην αύξηση της πιθανότητας αποτυχίας και δεύτερου παράλληλου κλάδου, η οποία, αναλόγως με το σχεδιασμό ο οποίος έχει πραγματοποιηθεί, είναι δυνατό γρήγορα να οδηγήσει στην υπέρβαση του μέγιστου επιτρεπτού ρεύματος οδήγησης των LED.



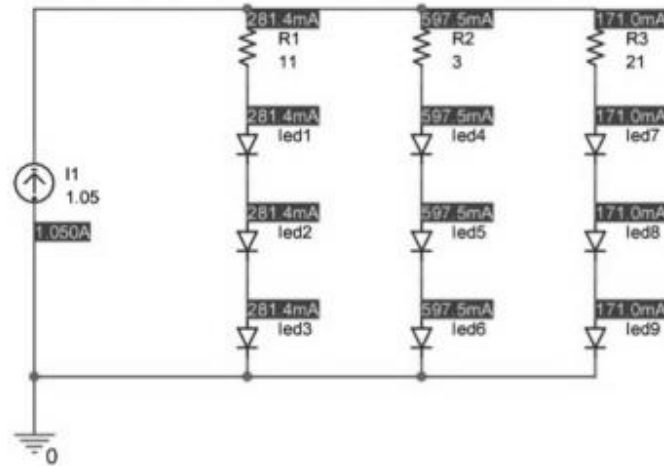
*Εικόνα 1-79: Προσομοίωση διακοπής λειτουργίας ενός LED στην τοπολογία παράλληλων σειρών. [19]*

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της εξεταζόμενης τοπολογίας έγκειται στην ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης στους παράλληλους κλάδους. Κατά την έως τώρα ανάλυση της σύνδεσης των LED σε παράλληλες σειρές, έχει θεωρηθεί η ιδανική και θεωρητικώς προβλεπόμενη περίπτωση, κατά την οποία τα LED είναι, όλα πανομοιότυπα μεταξύ τους. Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή, οι σχηματιζόμενοι παράλληλοι κλάδοι, παρουσιάζονται και αυτοί όμοιοι μεταξύ τους και κατά συνέπεια, το συνολικό ρεύμα οδήγησης διαιρείται και διαμοιράζεται σε αυτούς με τρόπο ομοιόμορφο, με συνέπεια όλοι οι κλάδοι και επομένως όλα τα LED να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα ακριβώς. Η πραγματικότητα ωστόσο, απέχει αρκετά από την ιδανική αυτή κατάσταση, καθώς η ύπαρξη κατασκευαστικών ανοχών στη διαδικασία παραγωγής καθώς και οι ανοχές οι οποίες παρουσιάζουν τα χρησιμοποιούμενα υλικά στις ιδιότητες τους, φέρουν ως αποτέλεσμα, κάθε LED το οποίο παράγεται, να είναι ουσιαστικά μοναδικό και να παρουσιάζει ένα μοναδικό συνδυασμό χαρακτηριστικών, ο οποίος το διαχωρίζει μεταξύ των υπόλοιπων LED της ίδιας οικογένειας προϊόντων.

Είναι αδύνατη, επομένως, η κατασκευή 100% πανομοιότυπων LED ακόμα και στην περίπτωση κατά την οποία αυτά προέρχονται από την ίδια παρτίδα. Οι διάφορες διαφοροποιήσεις οι οποίες παρουσιάζονται μεταξύ των LED, αντανακλώνται κυρίως στις I-V χαρακτηριστικές καμπύλες τους. Κατά συνέπεια τα LED τα οποία χρησιμοποιούνται σε μια εφαρμογή θα διαθέτουν μεν, κοντινές τιμές δυναμικής αντίστασης, αλλά όχι ακριβώς ίδιες. Επομένως, η πόλωση δύο LED στην ίδια τάση, δε συνεπάγεται ότι αυτά θα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.

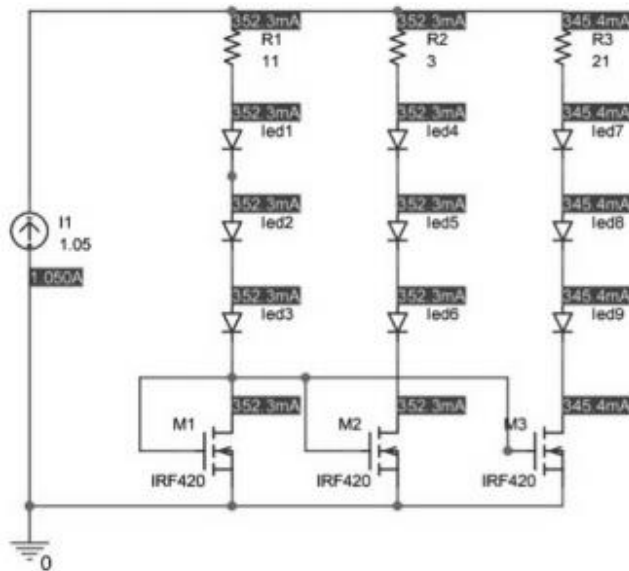
Το φαινόμενο αυτό οξύνεται, κατά τη σύνδεση πολλών LED εν σειρά, και εν συνεχεία ο κλάδος ο οποίος προκύπτει συνδέεται παράλληλα με έναν αντίστοιχο κλάδο, και έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος οδήγησης μεταξύ των παράλληλων κλάδων. Το γεγονός αυτό επιφέρει ανομοιομορφία στη φωτεινότητα, στο χρώμα και στην καταπόνηση των LED, συμβάλλοντας στη δραματική μείωση της αξιοπιστίας της εφαρμογής, ενώ παράλληλα, με βάση το γεγονός ότι η απόδοση των LED μειώνεται αυξανόμενου του ρεύματος, παρατηρείται μείωση της φωτεινής απόδοσης του κλάδου ο οποίος διαρρέεται από τη μεγαλύτερη ποσότητα ρεύματος και κατά συνέπεια μειώνεται και η συνολική φωτεινή απόδοση της εφαρμογής. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, οι κατασκευαστές υποβάλλουν τα παραγόμενα LED σε συγκεκριμένες δοκιμές και μετρήσεις, εν συνεχεία τα κατηγοριοποιούν (binning) σε μια διαδικασία ταιριάσματος των χαρακτηριστικών τους και τα διαθέτουν στην αγορά ανά κατηγορίες (bin). Παρά την εφαρμογή της διαδικασίας αυτής η χρήση LED της ίδιας κατηγορίας, ενώ αμβλύνει σημαντικά το πρόβλημα, δεν επιφέρει την εξασφάλιση ικανοποιητικής αξιοπιστίας στην περίπτωση της σύνδεσης σε παράλληλους κλάδους. Η χρήση επιμέρους κυκλωμάτων οδήγησης, σταθερού ρεύματος, για τον εκάστοτε κλάδο ξεχωριστά, θα ήταν δυνατό να αντιμετωπίσει πλήρως την ανομοιομορφία στην κατανομή του ρεύματος, δεν αποτελεί ωστόσο, οικονομικά βιώσιμη λύση, καθώς το κόστος των υλικών και η πολυπλοκότητα κατασκευής αυξάνονται δραματικά. Έναν άλλο τρόπο εξισορρόπησης των ρευμάτων στους παράλληλους κλάδους, αποτελεί η σύνδεση εν σειρά αντιστάσεων. Ωστόσο, η εισαγωγή απωλειών και η έλλειψη ικανοποιητικής ακρίβειας στην εξισορρόπηση των ρευμάτων, δεν προκρίνουν τη συγκεκριμένη λύση ως αξιόλογη. Τις πλέον αξιόπιστες και συμφέρουσες λύσεις, στο πρόβλημα της εξισορρόπησης των ρευμάτων των παράλληλων κλάδων, αποτελούν οι υλοποιήσεις με τρανζίστορ σε τοπολογίες «καθρέπτη ρεύματος», καθώς και με εξειδικευμένα ολοκληρωμένα γραμμικά κυκλώματα, ελεγχόμενων πηγών ρεύματος. Η υιοθέτηση

μιας τέτοιας λύσης είναι δυνατό να επιφέρει ομοιομορφία της τάξης του 95-98%. Η λειτουργία μιας διάταξης καθρέπτη ρεύματος προσομοιώνεται στη συνέχεια. [19]



*Εικόνα 1-80: Προσομίωση ανομοιόμορφης κατανομής ρεύματος στην τοπολογία παράλληλων σειρών. [19]*

Οι ανομοιότητες οι οποίες παρουσιάζονται ανάμεσα στα LED προσομοιώνονται με την εν σειρά σύνδεση αντιστάσεων, τυχαία επιλεγμένης τιμής, στον εκάστοτε κλάδο. Η ανομοιομορφία της κατανομής του ρεύματος οδήγησης είναι δυνατό να διορθωθεί με τη χρήση κυκλώματος τύπου καθρέπτη ρεύματος.

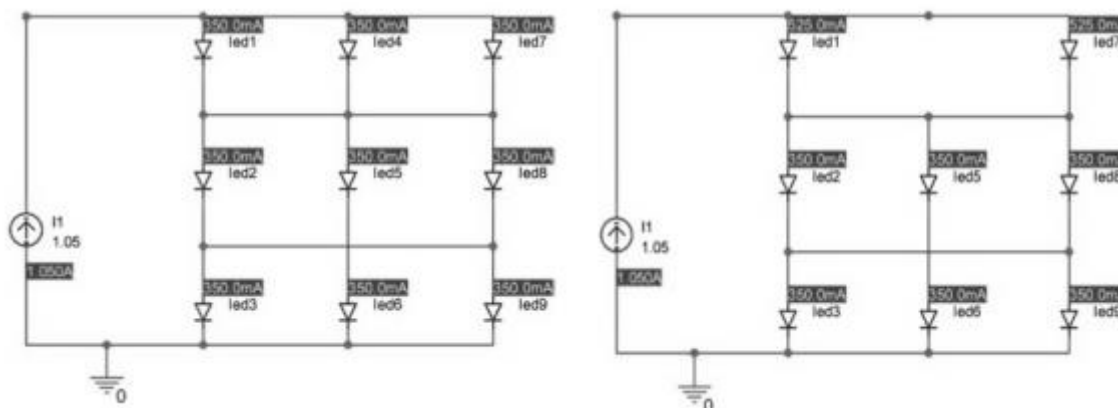


*Εικόνα 1-81: Εξισορρόπηση των ρευμάτων παράλληλων κλάδων με καθρέπτη ρεύματος [19]*

Ο καθρέπτης ρεύματος υλοποιείται με τρία MOSFET γενικού σκοπού και πραγματοποιεί την επίτευξη της εξισορρόπησης των ρευμάτων των παράλληλων κλάδων κατά 98%. [19]

### Σύνδεση σε «πίνακα»

Η τρίτη εναλλακτική τοπολογία σύνδεσης των LED αφορά το σχεδιασμό ομάδων, οι οποίες αποτελούνται από παράλληλους κλάδους του ενός LED ο καθένας, και εν συνεχεία, την εν σειρά σύνδεση των ομάδων αυτών.



*Εικόνα 1-82: Προσομοίωση διακοπής λειτουργίας ενός LED στην τοπολογία πίνακα*

[19]

Από την αντίστοιχη προσομοίωση, παρατηρείται ότι στην περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός LED, η λειτουργία των υπολοίπων συνεχίζεται, με τα LED τα οποία βρίσκονται στην ομάδα στην οποία παρουσιάστηκε η βλάβη να επιβαρύνονται με ρεύμα αυξημένο κατά 50%, ενώ τα υπόλοιπα συνεχίζουν τη λειτουργία τους υπό τις ίδιες συνθήκες. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονης ανομοιομορφίας στη φωτεινότητα η οποία θα είναι ορατή στο χρήστη της εφαρμογής. Η κακή επιλογή του ρεύματος οδήγησης είναι δυνατό γρήγορα να οδηγήσει τα LED της προβληματικής ομάδας, εκτός των ορίων τα οποία θέτει ο κατασκευαστής με αποτέλεσμα την άμεση καταστροφή τους. Επιπροσθέτως, η έντονη καταπόνηση των εν λόγω LED και η ανομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας του κυκλώματος θα συμβάλει στη γρήγορη και ανομοιόμορφη φθορά τους και την αύξηση της πιθανότητας δαικοπής της λειτουργίας τους και κατά συνέπεια της λειτουργία όλου του κυκλώματος. Είναι επίσης εμφανές, ότι σε κάθε ομάδα θα εμφανίζεται και το φαινόμενο της ανισοκατανομής των ρευμάτων στους παράλληλους κλάδους. Το φαινόμενο αυτό θα είναι εμφανώς αμβλυμένο σε σύγκριση με την τοπολογία των παράλληλων strings, χωρίς όμως να αποφεύγει την δημιουργία. Τέλος, ο εντοπισμός τυχόν βλάβης στο εν λόγω κύκλωμα κρίνεται αρκετά πολύπλοκος, καθώς για την πραγματοποίησή του επιβάλεται η επιτήρηση του εκάστοτε κλάδου ξεχωριστά. [19]

### 1.2.8 Λαμπτήρες Άνευ Ηλεκτροδίων

Το κοινό στοιχείο της πλειοψηφίας των πηγών φωτισμού που χρησιμοποιούνται είναι η ύπαρξη μεταλλικών ηλεκτροδίων το οποία είναι τοποθετημένα και σφραγισμένα εντός της λυχνίας με σκοπό να μεταφέρουν τον ηλεκτρικό ρεύμα στο θάλαμο του λαμπτήρα. Οι πλέον συνηθισμένοι λόγοι βλάβης των λαμπτήρων αυτών είναι:

- Εξάντληση του υλικού του νήματος με την πάροδο του χρόνου καθώς με τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος αποσπώνται άτομα από το νήμα.
- Θραύση του νήματος λόγω δονήσεων, φαινόμενο το οποίο επιβαρύνεται από την θερμότητα η οποία καθιστά το νήμα περισσότερο εύθραυστο.
- Εισροή ατμοσφαιρικού αέρα στη λυχνία η διέλευση του οποίου συνήθως προέρχεται από το σημείο στο οποίο τα ηλεκτρόδια εισέρχονται στη λυχνία.

Τα προαναφερθέντα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με την χρήση λαμπτήρων άνευ ηλεκτροδίων (electrodeless lamp) οι οποίοι είναι λαμπτήρες εκκενώσεως αερίου στο οποίο η απαιτούμενη ενέργεια μεταφέρεται από τα εξωτερικά των τοιχωμάτων της λυχνίας με τη χρήση ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου. Οι λαμπτήρες αυτοί παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

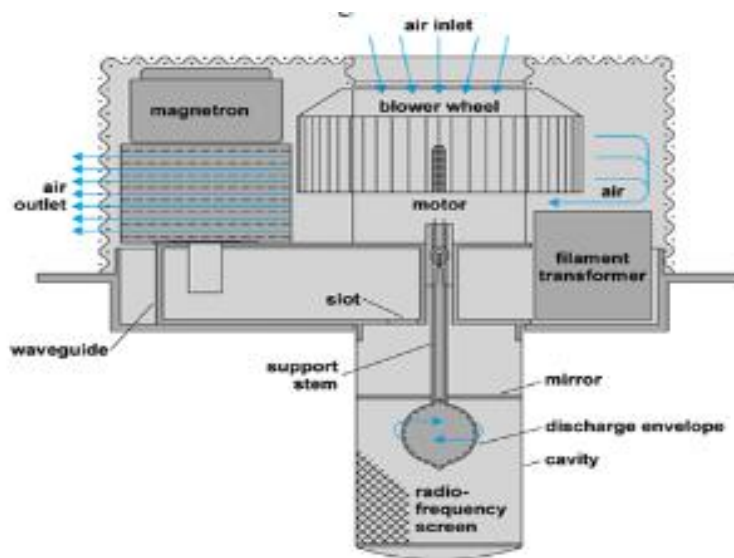
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής λόγω της απουσίας των ηλεκτροδίων τα οποία συχνά αποτυγχάνουν αλλά και του αποτελεσματικότερου αεροστεγούς σφραγίσματος της λυχνίας ή του σωλήνα.
- Υψηλή ενεργειακή απόδοση η οποία είναι δυνατό να φθάσει έως 80+ lumen ανά watt.
- Δυνατότητα dimming σε κάποιους τύπους λαμπτήρων άνευ ηλεκτροδίων, δηλαδή ελέγχου έντασης φωτισμού σε εύρος 30-100%.
- Απουσία φαινομένου flickering.
- Δυνατότητα ακαριαίας εκκίνησης και επανεκκίνησης και εξαιρετική απόδοση σε εφαρμογές που απαιτούν επαναλαμβανόμενη εκκίνηση και τερματισμό λειτουργίας του λαμπτήρα.

Για την υλοποίηση των λαμπτήρων άνευ ηλεκτροδίων έχουν χρησιμοποιηθεί δύο συστήματα, οι λαμπτήρες πλάσματος, οι οποίοι χρησιμοποιούν ηλεκτροστατική επαγωγή με τη χρήση μικροκυμάτων για την μεταφορά ενέργειας στη λυχνία η οποία περιέχει θείο ή μεταλλικά αλογόνα, και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής οι οποίοι είναι βασισμένοι στην επαγωγή ενέργειας σε λαμπτήρες φθορισμού. [23] [22] [24] [11] [25] [26]

### 1.2.8.1 Λαμπτήρες Πλάσματος

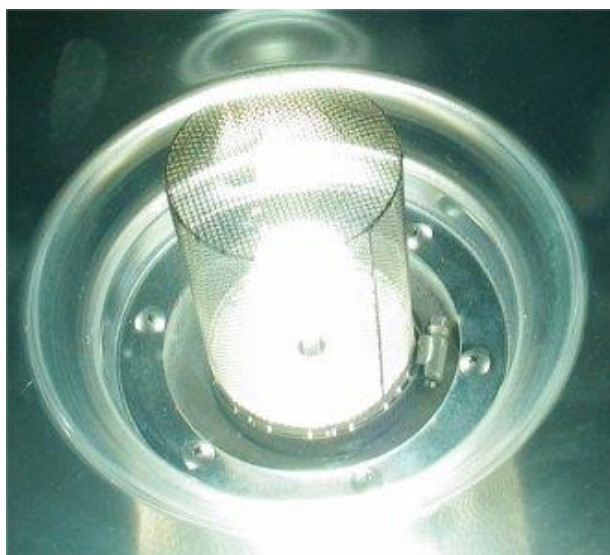
Οι λαμπτήρες πλάσματος παράγουν φως με τη διέγερση πλάσματος το οποίο είναι τοποθετημένο εντός της λυχνίας επάγοντας ενέργεια μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RF). Οι λαμπτήρες αυτοί συνήθως κάνουν χρήση ένα ευγενές αέριο ή ένα μίγμα αυτών των αερίων και πρόσθετων στοιχείων όπως τα μεταλλικά αλογονίδια, το νάτριο, ο υδράργυρος ή το θείο. Ένας κυματοδηγός χρησιμοποιείται για να περιορίσει και να στρέψει τον ηλεκτρικό πεδίο στο πλάσμα. Κατά τη λειτουργία του λαμπτήρα το αέριο ionίζεται και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που επιταχύνονται από τον ηλεκτρικό πεδίο συγκρούονται με τα άτομα του αερίου και μετάλλων. Οι συγκρούσεις αυτές διεγείρουν ηλεκτρόνια των ατόμων του αερίου και των μεταλλικών στοιχείων, τα οποία μεταβαίνουν σε υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση. Όταν τα ηλεκτρόνια αυτά επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση εκπέμπουν ένα φωτόνιο με αποτέλεσμα τη δημιουργία ορατού φωτός ή υπεριώδους ακτινοβολίας, ανάλογα με τα υλικά τα οποία περιλαμβάνονται στο πλάσμα.

Ο πρώτος λαμπτήρας πλάσματος ήταν ένας λαμπτήρας υπεριώδους ακτινοβολίας του οποίου η λυχνία περιείχε αργό και υδράργυρο σε αέρια κατάσταση και αναπτύχθηκε από την Fusion UV. Ο λαμπτήρας αυτός οδήγησε στην ανάπτυξη του λαμπτήρα θείου, η λυχνία του οποίου αργό και θείο, τα οποία βομβαρδίζονται από μικροκύματα συχνότητας 2.45 GHz μέσω ενός κοίλου κυματοδηγού. Ο λαμπτήρας αυτός λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και χρειάζεται ανεμιστήρα για την ψύξη του. [27] [23] [11] [22] [26]



Εικόνα 1-83: Διάταξη λαμπτήρα πλάσματος [28]

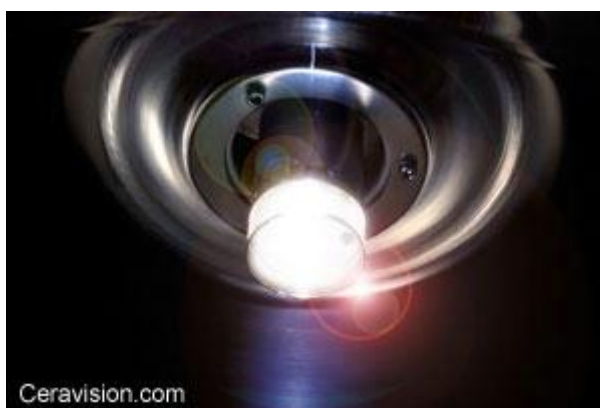




*Εικόνα 1-84: Λαμπτήρας πλάσματος [22]*

Στο παρελθόν, η αξιοπιστία της τεχνολογίας ήταν περιορισμένη λόγω του μαγνητρονίου που χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή των μικροκυμάτων. Η χρήση στερεάς κατάστασης κυκλωμάτων για την παραγωγή ραδιοσυχνοτήτων (RF) λύνει το πρόβλημα αξιοπιστίας αλλά τα κυκλώματα αυτά τη δεδομένη χρονική στιγμή έχουν υψηλό κόστος, 50 φορές υψηλότερο από το κόστος με τη χρήση μαγνητρονίου καθιστώντας την τεχνολογία αυτή ασύμφορη για εμπορική χρήση. Οι λαμπτήρες πλάσματος αυτήν την περίοδο διατίθενται εμπορικά από τις εταιρείες Ceravision και Luxim. [11] [23]

Η Ceravision διαθέτει στην αγορά τον λαμπτήρα Alvara, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον φωτισμό δρόμων και ο οποίος αποτελεί τον πρώτο λαμπτήρα πλάσματος υψηλής απόδοσης (High Efficiency Plasma – HEP). Ο λαμπτήρας αυτός αποδίδει 90 Lumens ανά Watt και χρησιμοποιεί συντονιστή ραδιοσυχνοτήτων από χαλαζία και μαγνητρόνιο. Η ενέργεια των μικροκυμάτων συντονίζεται και ιονίζει το αέριο εντός της λυχνίας, το οποίο παράγει έντονο λευκό φως. [11] [23] [22]

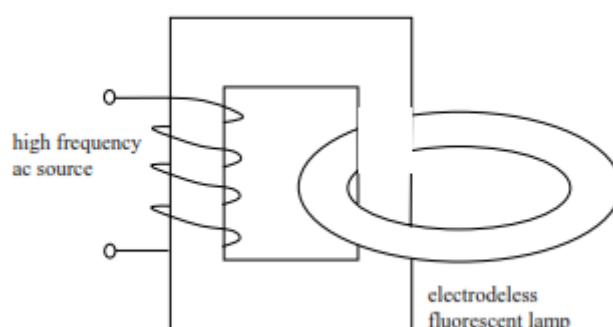


*Εικόνα 1-85: Λαμπτήρας HEP [22]*

### 1.2.8.2 Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής

#### 1.2.8.2.1 Λειτουργία Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Η λειτουργία των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής είναι παρόμοια με τη λειτουργία των συμβατικών λαμπτήρων φθορισμού με διαφοροποίηση στον τρόπο μεταβίβασης της ενέργειας στο αέριο υδραργύρου. Για τη λειτουργία του λαμπτήρα υδράργυρος σε αέρια κατάσταση, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο δοχείο εκκένωσης, διεγείρεται ηλεκτρικά και παράγει υπεριώδες φως, το οποίο με τη σειρά του προσκρούει στα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου τα οποία περιέχουν στοιχεία φθορισμού. Κατά την πρόσκρουση αυτή τα στοιχεία φθορισμού διεγείρονται και παράγουν ορατό φως. Για την διέγερση των ατόμων του υδραργύρου, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα στο οποίο θα αναφερόμαστε με τον όρο ballast διοχετεύει ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής συχνότητας σε καλώδια τα οποία σχηματίζουν σπείρες γύρω από έναν σιδηρίτη. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα πηνίο και παράγεται ισχυρό μαγνητικό πεδίο το οποίο διαπερνά το γυαλί του σωλήνα ή της λυχνίας και διεγείρει τα άτομα υδραργύρου.

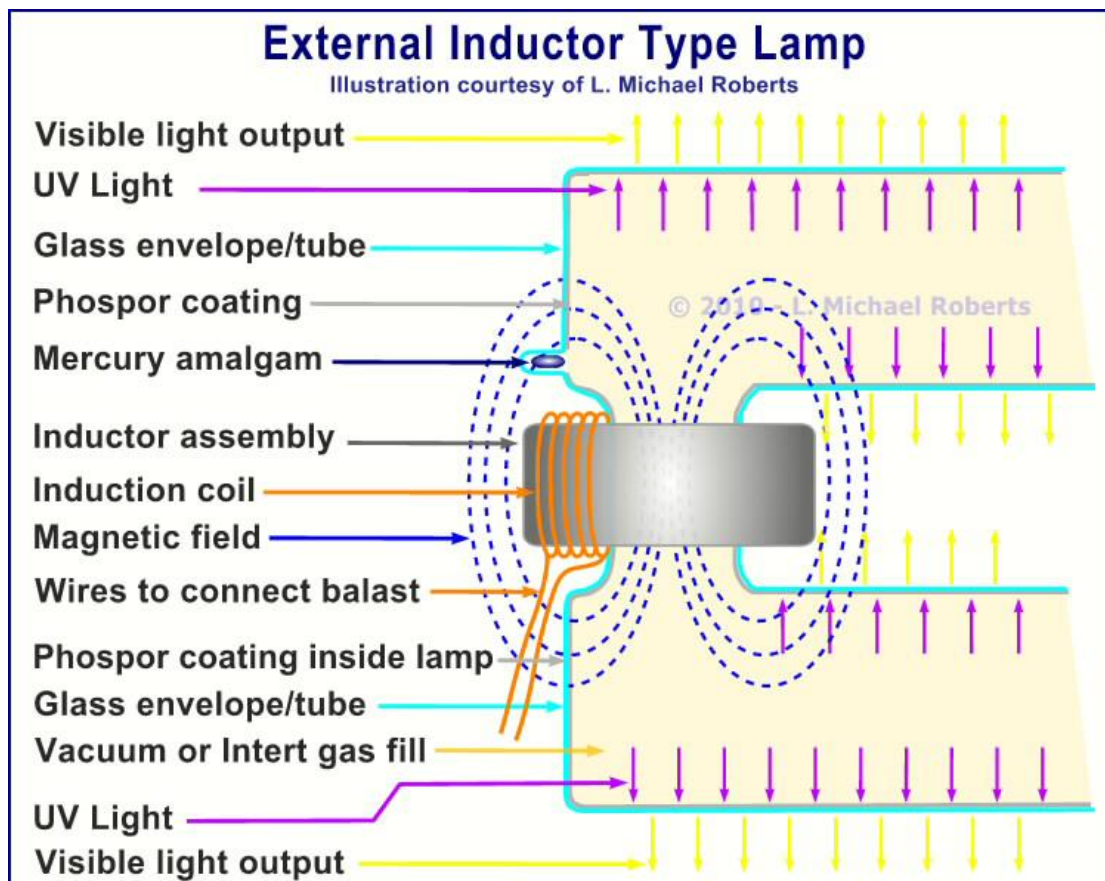


Εικόνα 1-86: Βασική αρχή λειτουργίας λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής [29]

Το σύστημα αυτό έχει παρόμοια λειτουργία με έναν μετασχηματιστή όπου το πηνίο το οποίο σχηματίζεται μπορεί να θεωρηθεί το πρωτεύον και τα άτομα υδραργύρου σχηματίζουν το δευτερεύον έτσι ώστε να δημιουργηθεί εκκένωση και να διεγερθούν τα άτομα υδραργύρου. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, οι λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής (internal inductor lamps) και οι λαμπτήρες εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής (external inductor lamps). Ο πλέον διαδεδομένος τύπος είναι οι λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής, οι οποίοι ήταν και οι πρώτοι που κατασκευάστηκαν, αλλά οι λαμπτήρες εξωτερικής

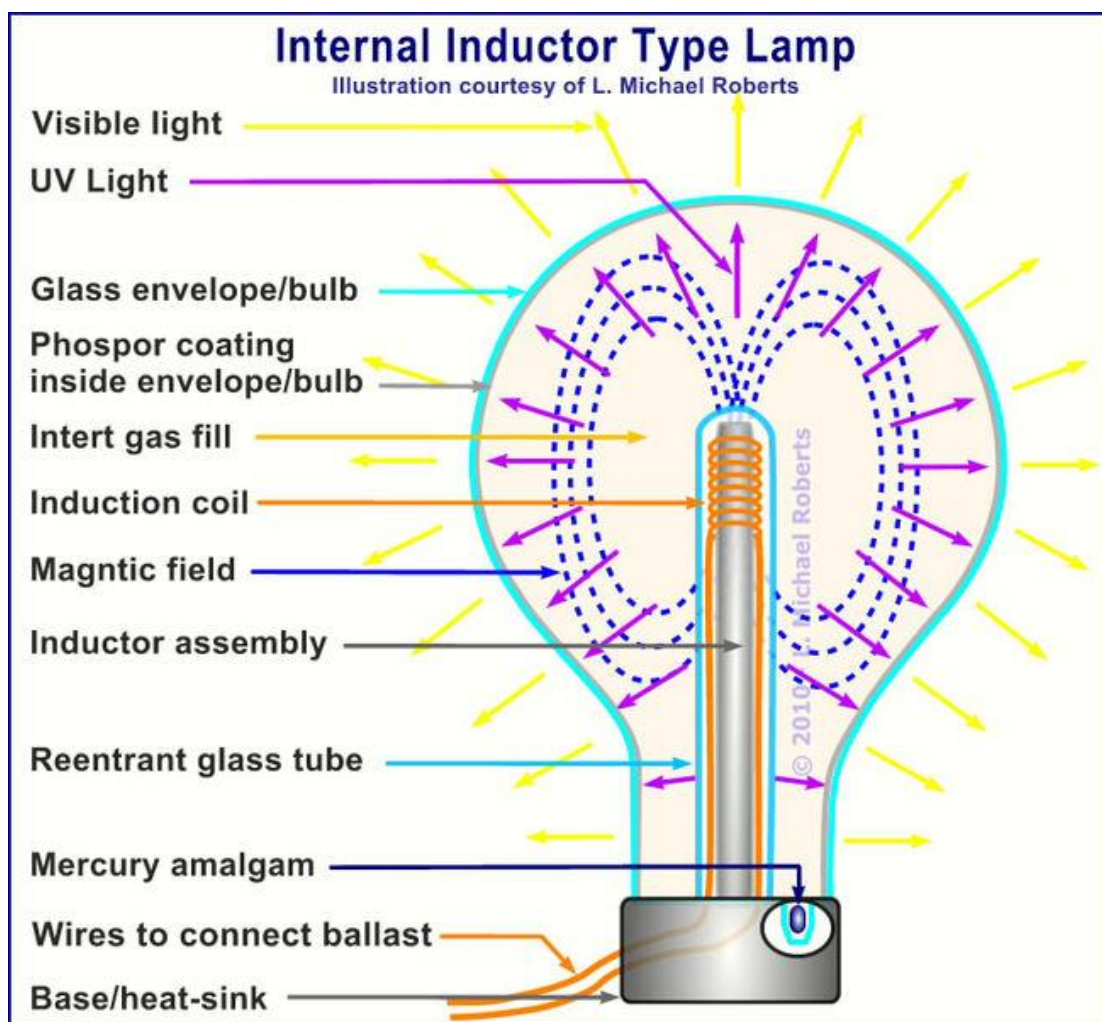
μαγνητικής επαγωγής έχουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών και διατίθενται σε διάφορα σχήματα με αποτέλεσμα η χρήση τους να αυξάνεται διαρκώς.

Οι λαμπτήρες εξωτερικής μαγνητικής επαγωγής είναι ουσιαστικά λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρομαγνήτες τυλιγμένους γύρω από κάποιο σημείο του σωλήνα. Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα, ένας σιδερίτης είναι προσαρμοσμένος περιμετρικά σε ένα σημείο του γυάλινου σωλήνα και γύρω από τον σιδερίτη είναι τυλιγμένο σπειροειδώς καλώδιο. Το καλώδιο αυτό διοχετεύεται με ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής συχνότητας από το ballast με αποτέλεσμα το πηνίο να δημιουργήσει ισχυρό μαγνητικό πεδίο το οποίο διαπερνά το γυαλί και διεγείρει τα άτομα υδραργύρου στο εσωτερικό. Τα διεγερμένα άτομα υδραργύρου εκπέμπουν υπεριώδες φως το οποίο μετατρέπεται σε ορατό φως κατά την πρόσκρουσή του στα στοιχεία φθορισμού τα οποία είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό τοίχιο του γυάλινου σωλήνα. Ο γυάλινος σωλήνας παράλληλα εμποδίζει τη μετάδοση της υπεριώδους ακτινοβολίας καθώς η ακτινοβολία στο φάσμα 253.7-185 nm δεν διαπερνά το γυαλί.



Εικόνα 1-87: Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα [24]

Οι λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής εξωτερικά έχουν την ίδια μορφή με τους συμβατικούς λαμπτήρες πυρακτώσεως. Η γυάλινη λυχνία, η οποία είναι αεροστεγώς σφραγισμένη, διαθέτει μια εσωτερική κοιλότητα στην οποία τοποθετείται μια ράβδος σιδηρίτη γύρω από τον οποίο είναι τυλιγμένο σπειροειδώς καλώδιο. Το καλώδιο αυτό τροφοδοτείται με υψηλής συχνότητας, συνήθως 13.6 MHz, 2.65 MHz ή 250 KHz, ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παρέχεται από το ballast και παράγεται μαγνητικό πεδίο το οποίο διεγείρει τα άτομα υδραργύρου τα οποία είναι τοποθετημένα στο εσωτερικό της λυχνίας. Ένα ειδικό κύκλωμα συντονιστή στο ballast παράγει μια αρχική υψηλή τάση στο πηνίο για να δημιουργηθεί η εκκένωση αερίου και έπειτα η τάση επανέρχεται σε επίπεδα κανονικής λειτουργίας. Οι λαμπτήρες εσωτερικής μαγνητικής επαγωγής έχουν το πλεονέκτημα του μικρότερου μεγέθους και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους.



Εικόνα 1-88: Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα [24]

#### 1.2.8.2.2 *Ιστορική Αναδρομή και εμπορική διάθεση*

Οι εκκενώσεις οι οποίες δεν απαιτούν την ύπαρξη εσωτερικών ηλεκτροδίων ανακαλύφθηκαν από τον Johann Wilhelm Hittorf το 1884 και μελετήθηκαν περαιτέρω από τον J.J. Thompson την επόμενη δεκαετία. Εν συνεχεία ο Nikola Tesla το 1891 στη Νέα Υόρκη παρουσίασε τον πρώτο λαμπτήρα άνευ ηλεκτροδίων. Για την επίδειξη του λαμπτήρα αυτού χρησιμοποιήθηκε ένα υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργούνταν από ένα “Tesla coil”. Ο Tesla συνέχισε να εξελίσσει τον λαμπτήρα του και μάλιστα προσπάθησε να κατοχυρώσει τα δικαιώματα ευρεσιτεχνίας για τον λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής με σκοπό τη μελλοντική εμπορική χρήση του.

Το 1904 ο Peter Cooper Hewitt ανέπτυξε έναν λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής ο οποίος χρησιμοποιούσε υδράργυρο σε αέρια κατάσταση και ανέπτυξε λαμπτήρες εξωτερικής επαγωγής, οι οποίοι είχαν σφαιρικό σχήμα και πηνία τα οποία περιέβαλαν τη σφαίρα, αλλά και εσωτερικής επαγωγής. Ο πρώτος αξιόπιστος λαμπτήρας άνευ ηλεκτροδίων δημιουργήθηκε το 1967 από τον John Anderson ο οποίος εργαζόταν στην General Electric.

Η ευρεία εμπορική αξιοποίηση των λαμπτήρων άνευ ηλεκτροδίων, και ειδικότερα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, ξεκίνησε με την εισαγωγή των λαμπτήρων QL από τη Phillips το 1990, των οποίων η συχνότητα λειτουργίας ήταν 2.65 MHz, και των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής Everlight της Matsushita το 1992. Ένα χρόνο αργότερα έγινε διαθέσιμος στις ΗΠΑ ο λαμπτήρας E-Lamp από την εταιρεία Intersource Technologies, οποίος είχε συχνότητα λειτουργίας 13.6 MHz. Το 1994 η General Electric διέθεσε στην αγορά τον λαμπτήρα Genura, ο οποίος αποτελούσε υλοποίηση της πατέντας του John Anderson, είχε ενσωματωμένο ballast και συχνότητα λειτουργίας 2.65 MHz. Το 1996 εισήλθε στην αγορά και η Osram με τον λαμπτήρα Endura ο οποίος έχει συχνότητα λειτουργίας 250 KHz. Ο πρώτος λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής με δυνατότητες dimming και δυνατότητας ελέγχου μέσω διαδικτύου (χρήση Internet Protocol – IP) παρουσιάστηκε το 2005 από την Amko Solara στην Ταϊβάν. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το 2006 εισήλθε στην αγορά και η εταιρεία Luxim η οποία κατέχει σημαντικό μερίδιο με την παροχή πληθώρας φωτιστικών συστημάτων μαγνητικής επαγωγής τόσο για εσωτερικούς όσο και για εξωτερικούς χώρους.

Όπως είναι εμφανές χρειαστήκαν περίπου 100 χρόνια από την ανακάλυψη του λαμπτήρα άνευ ηλεκτροδίων για να καταστεί δυνατή από τη βιομηχανία φωτισμού η εμπορική διάθεση του στο ευρύ κοινό. Τα κύρια προβλήματα τα οποία επέβαλαν την καθυστέρηση αυτή ήταν η παροχή μικρού κόστους και αξιόπιστων ηλεκτρονικών για την κατασκευή των κυκλωμάτων ballast που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία των λαμπτήρων, τα οποία και έγιναν διαθέσιμα με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την πρόοδο του τομέα των ηλεκτρονικών, η αποφυγή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που παρατηρούνταν κατά τη λειτουργία των λαμπτήρων άνευ ηλεκτροδίων και η μείωση των απωλειών φωσφόρου που παρατηρούνταν, η οποία κατέστη δυνατή με τη χρήση υλικών φθορισμού σπανίων γαιών.

Ιδιαίτερο αναφοράς είναι το γεγονός ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής έχουν βρει εφαρμογή και σε εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων με υπεριώδη ακτινοβολία. Η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται ευρέως σε εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων και επεξεργασίας νερού, λόγω της ιδιότητας τους να σκοτώνουν τους μικροοργανισμούς οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί. Στη χρήση της τεχνολογίας αυτής, διαχρονικό πρόβλημα ήταν η διάβρωση των λαμπτήρων οι οποίοι χρησιμοποιούνταν στο σημείο εισόδου των ηλεκτροδίων στον λαμπτήρα, λόγω του ιδιαίτερα υγρού περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργούν οι λαμπτήρες αυτοί. Το φαινόμενο αυτό είχε ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ζωής των λαμπτήρων. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής αποτέλεσε σημαντική λύση στο πρόβλημα αυτό, καθώς η απουσία ηλεκτροδίων εξάλειψε τα φαινόμενα αυτά. Ως αποτέλεσμα η χρήση λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας, κυρίως αποβλήτων, με υπεριώδη ακτινοβολία αυξάνει τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων και μειώνει σημαντικά το κόστος φωτισμού, το οποίο στις εγκαταστάσεις αυτές είχε κύρια συνιστώσα την αντικατάσταση των λαμπτήρων. [27] [23] [30] [11] [25] [26] [31]

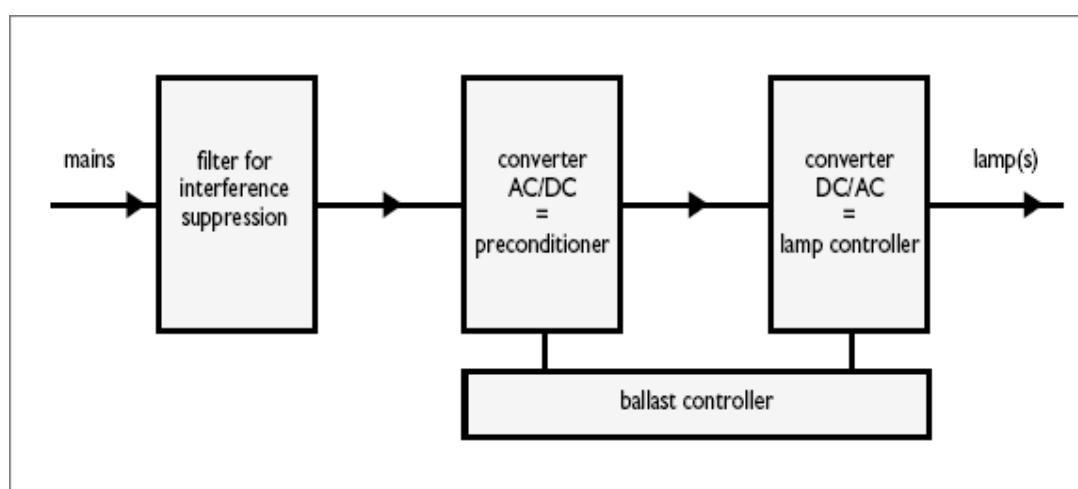
#### *1.2.8.2.3 Ballast Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής*

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, όπως προαναφέρθηκε, απαιτούν ένα ηλεκτρονικό ballast για την ορθή λειτουργία τους. Το ηλεκτρονικό ballast μετατρέπει αρχικά το εισερχόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Στη συνέχεια το ηλεκτρονικό κύκλωμα μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε ρεύμα υψηλής συχνότητας. Η συχνότητα αυτή ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του λαμπτήρα. Η υψηλή συχνότητα

αυτή, εν συνεχεία, διοχετεύεται στο πηνίο επαγωγής το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα του επαγωγέα και δημιουργεί ισχυρό μαγνητικό πεδίο.

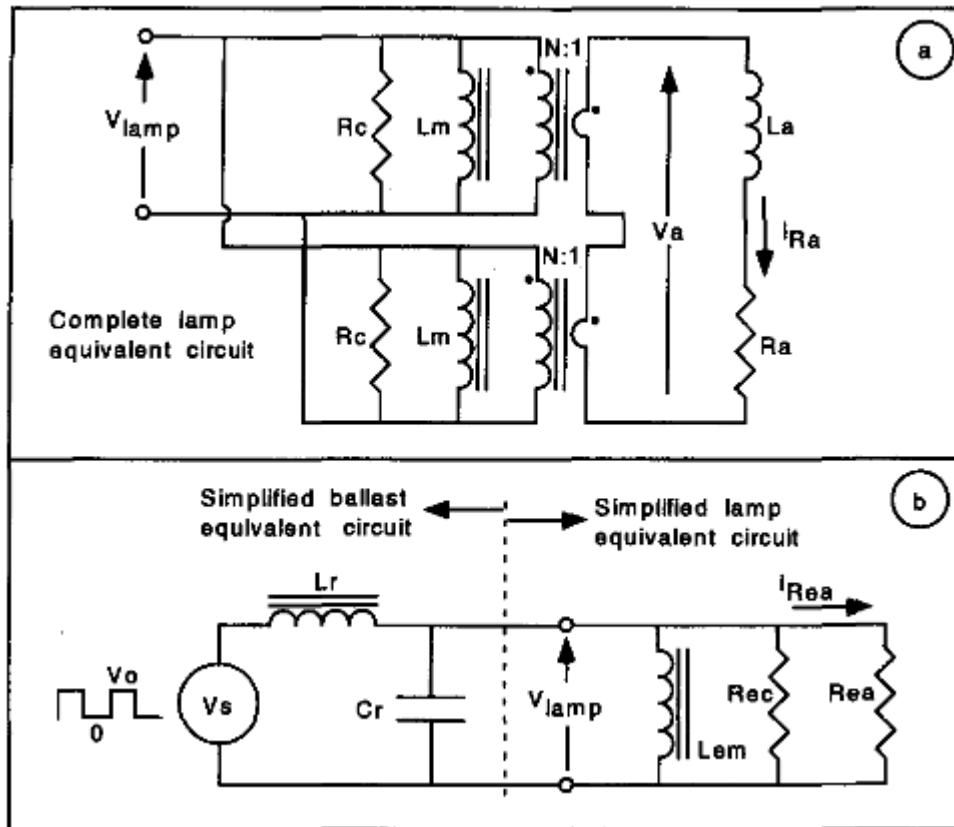
Οι πρώτοι εμπορικά διαθέσιμοι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής λειτουργούσαν σε συχνότητες 2.65 MHz ή 13.65 MHz έτσι ώστε να είναι σύμφωνοι με τις επιτρεπτές τιμές για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων. Τα τελευταία έτη οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής οι οποίοι εισάγονται στην αγορά έχουν συχνότητα λειτουργίας 200-250 kHz ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν ήδη μελέτες και πειραματικές υλοποιήσεις λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής με συχνότητα λειτουργίας 60 kHz. [25] [31] [11] [32]

Τα ηλεκτρονικά ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής διαθέτουν και κύκλωμα ελέγχου το οποίο ελέγχει τη συχνότητα και το ρεύμα το οποίο παρέχεται στο πηνίο επαγωγής έτσι ώστε να διασφαλίζεται η σταθερή λειτουργία του λαμπτήρα. Εκτός αυτού, το ηλεκτρονικό ballast διαθέτει κύκλωμα το οποίο παράγει έναν υψηλό «παλμό εκκίνησης» έτσι ώστε να επιτευχθεί η αρχική διέγερση των ατόμων του υδραργύρου και να εκκινήσει ο λαμπτήρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής κατά την εκκίνησή τους δεν αποδίδουν το 100% της εξόδου τους, καθώς χρειάζεται ένα μικρό χρονικό διάστημα για τη θέρμανση του αμαγάλματος που περιέχει τον υδράργυρο και την απελευθέρωση των ατόμων υδραργύρου μετά την εκκίνηση του λαμπτήρα. Κατά συνέπεια, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής κατά την εκκίνησή τους αποδίδουν 75-85% της φωτεινότητάς τους και εντός ενός με δύο λεπτών φθάνουν στην κανονική απόδοσή τους. [7] [33] [34] [35] [36]



Εικόνα 1-89:Μπλοκ διάγραμμα των βασικών λειτουργιών ηλεκτρονικού συστήματος ballast λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής [13]

Ο αυστηρός έλεγχος της συχνότητας και τους ρεύματος από το ηλεκτρονικό ballast και η χρήση κυκλωμάτων ελεγχόμενα από μικροεπεξεργαστή επιτρέπουν στα ηλεκτρονικά ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής να έχουν απόδοση 95 - 98% και να εμφανίζουν απώλειες ενέργειας της τάξεως του 2 έως 5%. [24] [37] [34]

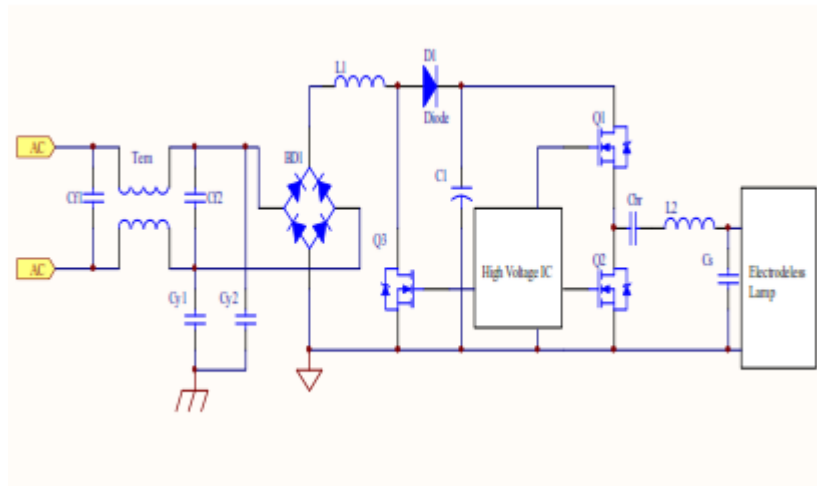


Εικόνα 1-90: Ισοδύναμο κύκλωμα λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής και κυκλώματος ballast [34]

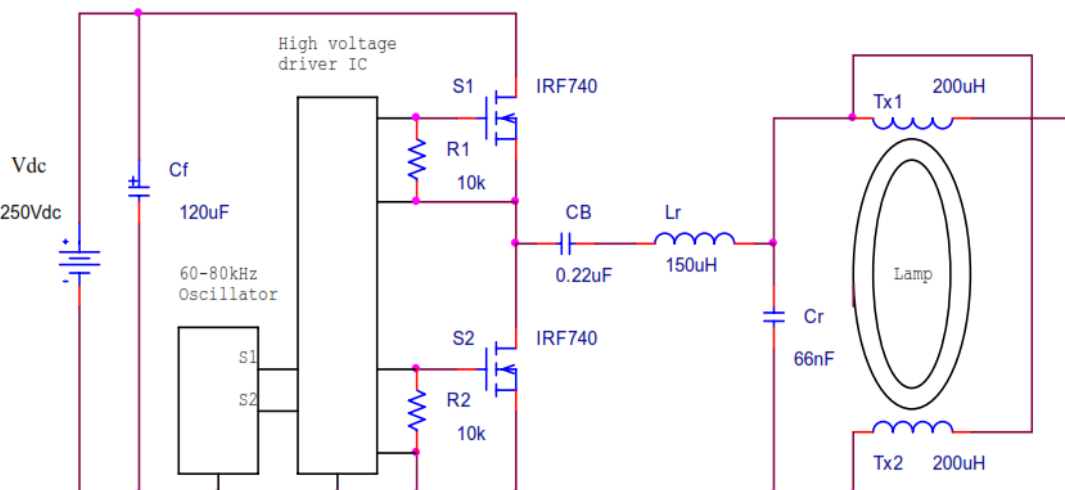
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρονικά ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής αποτέλεσαν τον κυριότερο λόγο της παρέλευσης 100 ετών για την επιτυχή εμπορική διάθεση των λαμπτήρων αυτών. Τα κυριότερα προβλήματα τα οποία παρουσιάζονταν για την εμπορική εκμετάλλευση της τεχνολογίας αυτής ήταν το υψηλό κόστος και η χαμηλή απόδοση και αξιοπιστία των ηλεκτρονικών ballast τα οποία ήταν απαραίτητα για την οδήγηση του λαμπτήρα. Τα εμπόδια αυτά ξεπεράστηκαν με την ανάπτυξη του τομέα της μικροηλεκτρονικής και από το 1990 και έπειτα κατέστη δυνατή να παραγωγή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ballast υψηλής αξιοπιστίας και μεγάλης απόδοσης, ενώ το κόστος τους είναι διαρκώς μειούμενο με την πάροδο των ετών και την ανάπτυξη της τεχνολογίας. [25] [34]



Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει στην επιτυχή υλοποίηση λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής οι οποίοι έχουν συχνότητα λειτουργίας 60 kHz. Παραδείγματα ηλεκτρονικών ballast τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τις υλοποιήσεις αυτές δίδονται στα παρακάτω σχήματα. [29] [32]



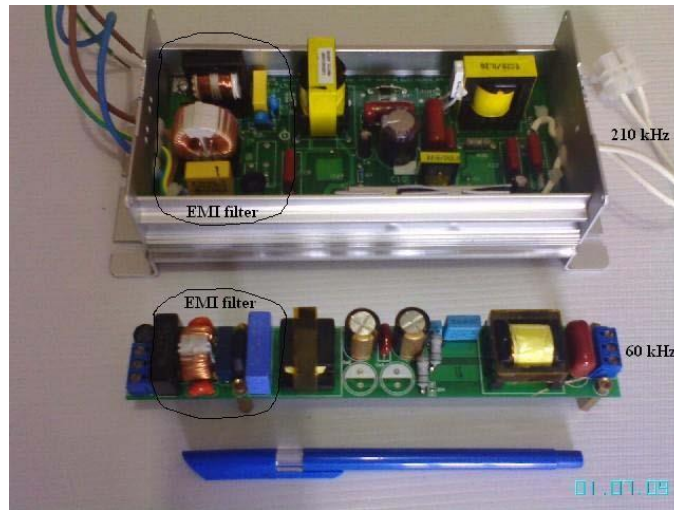
Εικόνα 1-91: Κύκλωμα ηλεκτρονικού ballast λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής 60 kHz εναλλασσόμενου ρεύματος [32]



Εικόνα 1-92: Κύκλωμα ηλεκτρονικού ballast λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής 60 kHz συνεχούς ρεύματος [29]

Το πλεονέκτημα της υλοποίησης αυτής είναι το γεγονός ότι υπάρχει μικρότερος κίνδυνος ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών με άμεσο αποτέλεσμα ο σχεδιασμός του φίλτρου ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών να είναι ευκολότερος έτσι ώστε να

ακολουθούνται τα πρότυπα και οι κανόνες ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών για χρήση σε κλειστούς χώρους.

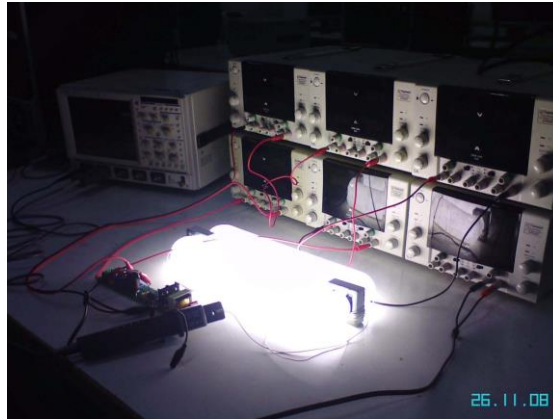


*Εικόνα 1-93: Ηλεκτρονικά ballast λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής 210 kHz και 60 kHz [32]*

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την υλοποίηση αυτή, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής παρουσίασαν μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με λαμπτήρες μαγνητικές επαγωγής με συχνότητα λειτουργίας 210 kHz, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα [32]:

<b>Efficacy Test</b>		
<i>Test item</i>	<b>60KHz</b>	<b>210KHz</b>
Input power (W)	41	41
Ballast output(W)	36	35
Lamp lumen output(lm)	2602	2547
Ballast efficiency (%)	87.8	85.4
Lamp efficacy(lm/w)	72.3	72.8
Total efficacy(lm/w)	63.5	62.1

*Πίνακας 1-9: Σύγκριση απόδοσης λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητες λειτουργίας 60 kHz και 210 kHz [32]*



Εικόνα 1-94: Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 60 kHz σε λειτουργία [29]

#### 1.2.8.2.4 Χαρακτηριστικά Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

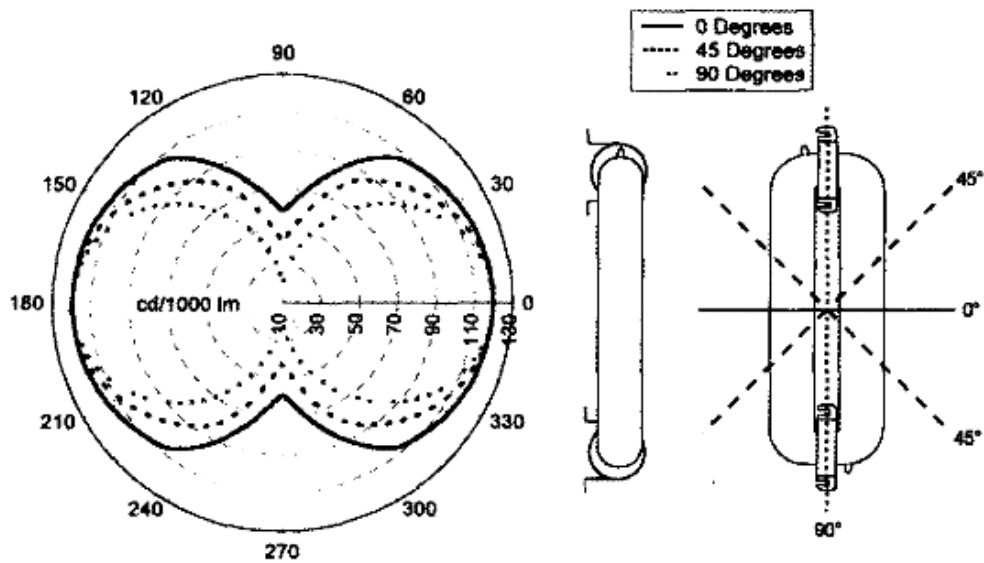
Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αποτελούν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες επιδόσεις από πλευράς αποδόσεων, καθώς, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα έχουν απόδοση 60-78 Lm/W ενώ οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα έχουν απόδοση 75-85 Lm/W. Ο δείκτης S/P για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι 2.20 (μπορεί να ποικίλει ελαφρώς ανάλογα με την υλοποίηση) με αποτέλεσμα οι προαναφερθείσες αποδόσεις αυξάνονται αισθητά αν ληφθεί υπόψιν η μεσοπική όραση με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα έχουν απόδοση 135-175.5 Lm/W και τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα έχουν απόδοση 168.7-184.5 Lm/W με βάση τη μεσοπική όραση. [25] [11] [24]

Η μέτρηση των φωτομετρικών μεγεθών των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής διαφέρει ανάλογα με την υλοποίηση. Επί παραδείγματι, σύμφωνα με μετρήσεις για 3 υλοποιήσεις λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητα λειτουργίας 250 kHz η οποία είναι η πλέον διαδεδομένη τη δεδομένη χρονική στιγμή λαμβάνονται οι τιμές του ακόλουθου πίνακα: [38]

Lamp Parameter:	350 mm lamp	250 mm lamp	250 mm lamp at higher power
Vessel tube OD	54 mm	54 mm	54 mm
Discharge path length	720 mm	520 mm	520 mm
Total core mass	320 g	320 g	320 g
Buffer gas	krypton	argon	argon
Buffer gas pressure	33 Pa	33 Pa	33 Pa
Lamp input power	140 W	95 W	140 W
Amalgam tip temperature	70 °C	65 °C	65 °C
Light output (100 h)	12,400 lm	8,200 lm	11,600 lm
Lamp efficacy	88.6 lm/W	86.3 lm/W	82.9 lm/W
Color temperature	3375 K	3309 K	3403 K
CRI	80.7	80.7	79.4

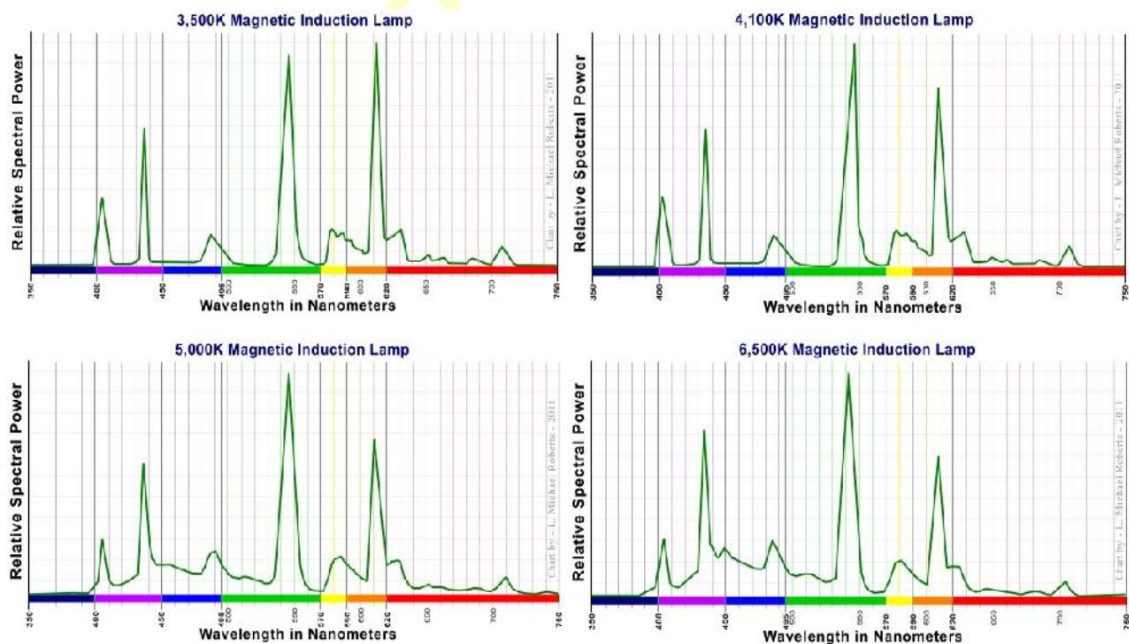
Πίνακας 1-10: Απόδοση λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητα λειτουργίας 250 kHz [38]

Για τους ίδιους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής η κατανομή έντασης φωτεινότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1-95: Κατανομή έντασης φωτεινότητας λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητα λειτουργίας 250 kHz [38]

Η φασματική κατανομή των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής εξαρτάται επίσης από την εκάστοτε υλοποίηση και τη θερμοκρασία χρώματος την οποία παράγουν. Τυπικές φασματικές κατανομές λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής δίδονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1-96: Τυπικές φασματικές κατανομές λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής [24]

Ο συντελεστής ισχύος των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής κυμαίνεται, ανάλογα με την υλοποίηση, από 0,9 έως 0,98, δίνοντάς τους ένα επιπλέον πλεονέκτημα στην εξοικονόμηση ενέργειας. [24] [39]

Όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα έχουν διάρκεια ζωής 60.000-75.000 ώρες και οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα παρουσιάζουν διάρκεια ζωής 85.000-100.000 ώρες, με έναν κύκλο λειτουργίας 3 ωρών, αν και αξίζει να αναφερθεί ότι εργαστηριακές δοκιμές άνω των 500.000 κύκλων λειτουργίας διάρκειας ενός δευτερολέπτου δεν έχουν επιφέρει βλάβη του λαμπτήρα ή του ηλεκτρονικού ballast. Η μεγάλη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής οφείλεται στο γεγονός ότι δεν διαθέτουν ηλεκτρόδια εντός του λαμπτήρα με αποτέλεσμα να μην περιορίζονται από την εξάντληση των υλικών των ηλεκτροδίων με την πάροδο του χρόνου και ο σωλήνας του λαμπτήρα να είναι αεροστεγώς σφραγισμένος χωρίς να υφίσταται ο κίνδυνος εισχώρησης ατμοσφαιρικού αέρα από σημεία εισόδου ηλεκτροδίων στον λαμπτήρα. [25] [11] [22] [31] [15] [26]

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αν και χρησιμοποιούν σε αρκετά σημεία την ίδια τεχνολογία με τους λαμπτήρες φθορισμού, δεν αντιμετωπίζουν τα ίδια προβλήματα σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Οι λαμπτήρες αυτοί μπορούν να λειτουργήσουν σε κατώτερες θερμοκρασίες από  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ανάλογα με τον κατασκευαστή, ενώ παράλληλα ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  διατηρούν το 85% της απόδοσης τους σε Lumen σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού. Η αντοχή σε αυτές τις ακραίες θερμοκρασίες οφείλεται στον σχεδιασμό και την τοποθέτηση του πηνίου στους λαμπτήρες. [40] [24]

Όσον αφορά τις υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής περιορίζονται από την αντοχή των γεννητριών υψηλών συχνοτήτων και μπορούν να λειτουργήσουν κανονικά σε θερμοκρασίες έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η λειτουργία τους σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  αν και είναι εφικτή, φέρει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του χρόνου ζωής τους και κατά συνέπεια χαμηλού συνολικού κόστους το οποίο τους χαρακτηρίζει. [40]

Για να καταστούν κατανοητά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής θα εξεταστούν τα δύο σημαντικότερα μοντέλα λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής τα οποία αποτελούν εμπορικές επιτυχίες.

Το πρώτο μοντέλο λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής το οποίο θα εξεταστεί είναι ο λαμπτήρας Philips Electrodeless QL 85W Half Coated. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του λαμπτήρα αυτού δίδονται στον παρακάτω πίνακα. [8]

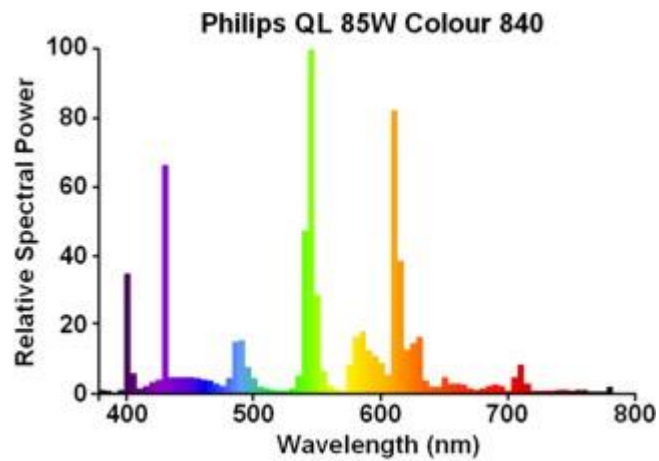
<b>Manufacturer:</b>	<b>NV Philips Gloeilampenfabrieken</b>	
<b>Lamp Power:</b>	85 Watts	
<b>Lamp Current:</b>		
<b>Lamp Voltage:</b>		
<b>Cap Type:</b>	First Generation QL style	
<b>Bulb Type:</b>	P-110	P-30 in eighths/inch
<b>Bulb Finish:</b>	Triphosphor 830	Soda-lime
<b>Electrodes:</b>	N/A	
<b>Arc Length:</b>	N/A	
<b>Atmosphere:</b>	Ar, Kr, Ne	Hg Amalgams
<b>Luminous Flux:</b>	N/A	
<b>Luminous Efficacy:</b>	N/A	
<b>Colour Temperature &amp; CRI:</b>	CCT: 300K	CRI: Ra 80+
<b>Chromaticity Co-ordinates:</b>	CCx:	CCy:
<b>Rated Lifetime:</b>	100,000 hours	to 50% lumen maintenance
<b>Warm-up &amp; Re-strike time:</b>	30 seconds	Instantaneous
<b>Burning Position:</b>	Universal	
<b>Overall Length:</b>	180.5mm	7 <sup>1</sup> / <sub>8</sub> inches
<b>Mass:</b>	160mm	200 grams
<b>Factory:</b>	Turnhout	Belgium
<b>Date of Manufacture:</b>	April 1992	92D
<b>Original / Present Value:</b>	No commercial value	

*Πίνακας 1-11: Χαρακτηριστικά λειτουργίας Philips Electrodeless QL 85W Half Coated [8]*



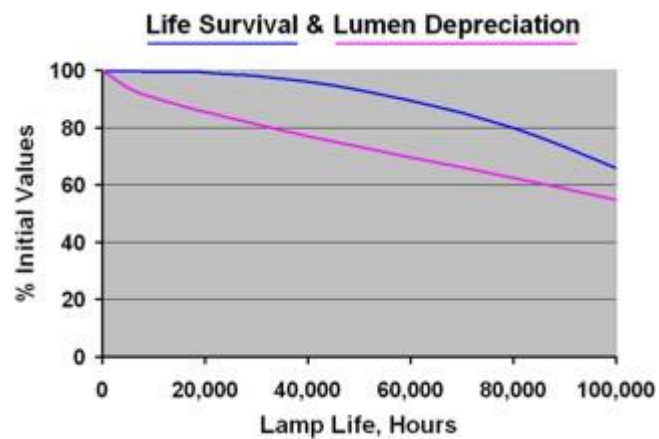
Εικόνα 1-97: Λαμπτήρας Philips Electrodeless QL 85W Half Coated [8]

Το φάσμα ακτινοβολίας του λαμπτήρα αυτού είναι το εξής:



Εικόνα 1-98: Φάσμα ακτινοβολίας Philips Electrodeless QL 85W Half Coated [8]

Ενώ ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του λαμπτήρα αυτού δίδεται από το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1-99: Χρόνος ζωής Philips Electrodeless QL 85W Half Coated [8]

Το δεύτερο μοντέλο λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής το οποίο θα εξεταστεί είναι ο λαμπτήρας Endura Electrodeless Induction Lamp. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του λαμπτήρα αυτού δίδονται στον παρακάτω πίνακα. [8]

<b>Manufacturer:</b>	<b>Osram Sylvania Inc.</b>	
<b>Lamp Power:</b>	100 Watts	
<b>System Current:</b>	0.48 Amps	
<b>System Voltage:</b>	180 to 264 Volts	
<b>Operating Frequency:</b>	250 Kilohertz	
<b>Cap:</b>	Special 3-pin plug	
<b>Bulb Finish:</b>	Lumilux 830 Triphosphor	
<b>Bulb Type:</b>	TR-54	
<b>Dimensions:</b>	313mm x 139mm x 72mm	
<b>Electrodes:</b>	None	
<b>Atmosphere:</b>	Argon + Neon + Kr85	
<b>Luminous Flux:</b>	8,000 lm (100 hours)	5,600 lm (60,000 hours)
<b>Luminous Efficacy:</b>	80 lm/W (100 hours)	56 lm/W (60,000 hours)
<b>Colour Temperature &amp; CRI:</b>	CCT: 3000K	CRI: Ra 80+
<b>Chromaticity Co-ordinates:</b>	CCx:	CCy:
<b>Burning Position:</b>	Any except with amalgam tip-off at highest point	
<b>Rated Life:</b>	60,000 hours (to 70% lumens, limited by ballast life)	
<b>Warm Up / Re-strike Time:</b>	30 secs to 90% lumens	Instantaneous
<b>Factory:</b>	Drummondville, Canada	
<b>Date of Manufacture:</b>	May 2002	
<b>Original / Present Value:</b>		

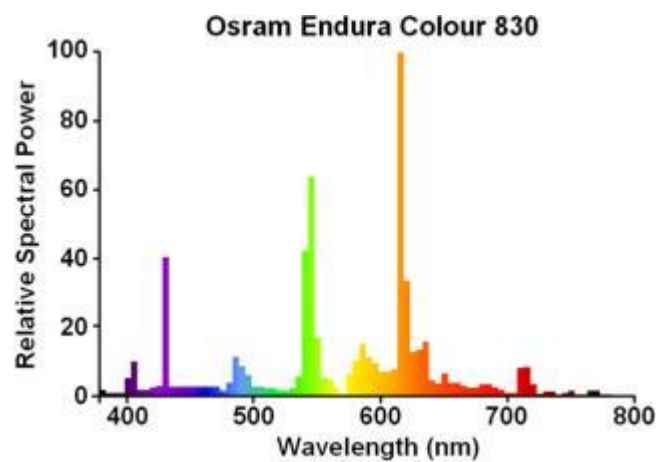
*Πίνακας 1-12: Χαρακτηριστικά λειτουργίας Endura Electrodeless Induction Lamp [8]*





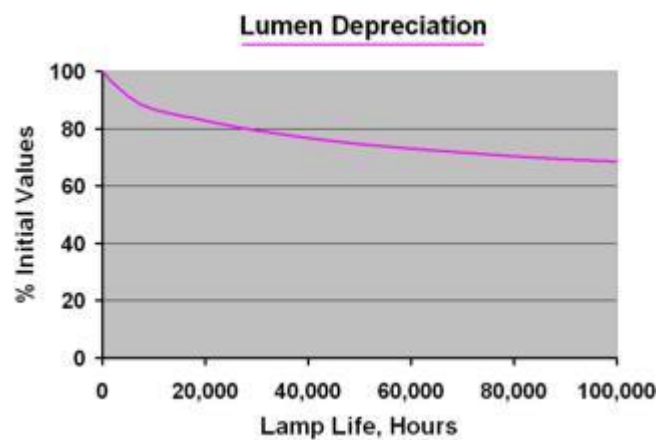
*Εικόνα 1-100: Λαμπτήρας Endura Electrodeless Induction Lamp [8]*

Το φάσμα ακτινοβολίας του λαμπτήρα αυτού είναι το εξής:



*Εικόνα 1-101: Φάσμα ακτινοβολίας Endura Electrodeless Induction Lamp [8]*

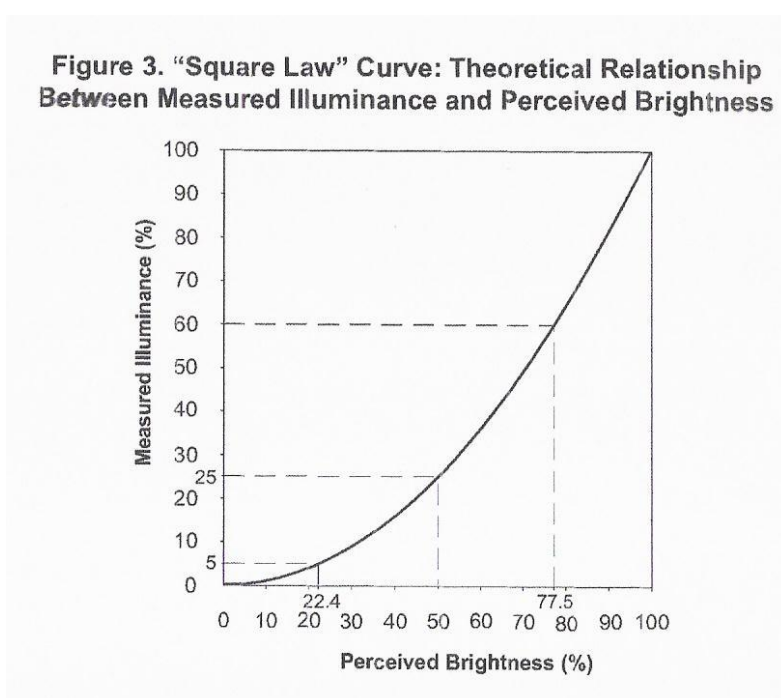
Ενώ ο αναμενόμενος χρόνος ζωής του λαμπτήρα αυτού δίδεται από το παρακάτω σχήμα:



*Εικόνα 1-102: Χρόνος ζωής Endura Electrodeless Induction Lamp [8]*

### 1.2.8.2.5 Dimming Λαμπτήρων Μαγνητικής Επαγωγής

Η ρύθμιση της φωτεινής ροής (dimming) μπορεί να περιγραφεί ως ποσοστό του μέγιστου παραγόμενου φωτός (κανονική λειτουργία), της μετρούμενης φωτεινής ροής ανά μονάδα επιφάνειας (δηλαδή της έντασης φωτισμού) και της έντασης φωτισμού που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Η ένταση φωτισμού που αντιλαμβανόμαστε, μπορεί να χαρακτηριστεί από την προσαρμοστικότητα του ανθρώπινου ματιού όταν εκτίθεται σε διαφορετικές ποσότητες φωτός. Για παράδειγμα, ένας χώρος με ρυθμισμένη φωτεινή ροή στο 25% του μέγιστου παραγόμενου φωτός μπορεί να τον αντιληφθούμε ως κατά το ήμισυ περίπου φωτεινό σε σύγκριση με τον ίδιο χώρο στο μέγιστο φωτισμό. [13]



*Εικόνα 1-103: Σχέση μεταξύ της μετρούμενης έντασης φωτισμού (κάθετος άξονας) και της αντιληφθείσας έντασης φωτισμού (οριζόντιος άξονας) [13]*

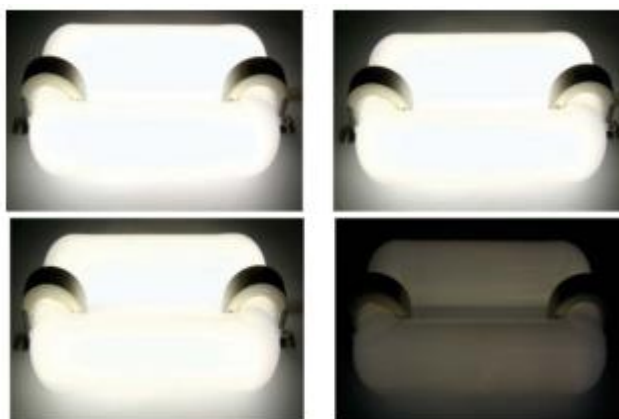
Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής είναι δυνατόν να παρέχουν δυνατότητες dimming με τη χρήση ballast ρυθμιζόμενης στάθμης φωτισμού (dimmable). Αυτά τα ballast ρυθμίζουν τη στάθμη φωτισμού στους λαμπτήρες αυξομειώνοντας το ρεύμα του λαμπτήρα. Υπάρχουν διαθέσιμα προϊόντα που ισχυρίζονται ότι μειώνουν αξιόπιστα τη στάθμη φωτισμού κατά 0.5-2.5% της πλήρους απόδοσης του φωτός. Επιτρέπουν τη ρύθμιση της στάθμης του φωτισμού και εξοικονομούν ενέργεια (επομένως και χρήματα) καθώς η καταναλισκόμενη ενέργεια ενός dimming ballast μειώνεται όσο μειώνουμε τη στάθμη φωτισμού. Επίσης αυξάνουν το εύρος της φωτεινής ροής που παράγεται από το σύστημα. Οι συσκευές ελέγχου αυτών

περιλαμβάνουν αυτόματα και χειροκίνητα dimmers, φωτοαισθητήρες για να μειώνουν το φωτισμό όταν υπάρχει το φως της ημέρας και συστήματα διαχείρισης ενέργειας που μειώνουν το φωτισμό κατά τη διάρκεια της νύχτας ή στις ώρες υψηλότερης ζήτησης.

Η δυνατότητα dimming των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη χρήση των εξής μεθόδων: [41] [36] [42] [43] [44]

#### Έλεγχος συχνότητας

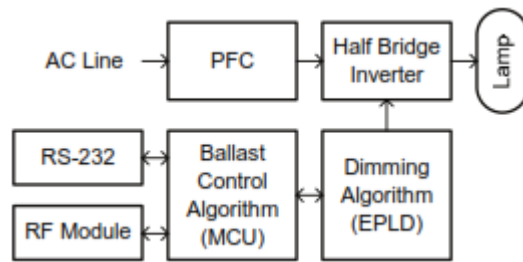
Ο έλεγχος της συχνότητας για την επίτευξη δυνατότητας dimming για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αποτελεί την πλέον διαδεδομένη εμπορικά μέθοδο, καθώς το απαιτούμενο ballast για την επίτευξη του παρουσιάζει μικρή πολυπλοκότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μικρή απόδοση για λαμπτήρες με σχετικά μικρή ισχύ και τα χαρακτηριστικά dimming τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι μη γραμμικά.



*Εικόνα 1-104: Παράδειγμα dimming λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής με έλεγχο συχνότητας [42]*

#### Έλεγχος κύκλου λειτουργίας

Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα dimming λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής με τη χρήση σταθερής συχνότητας και μεταβολή του κύκλου λειτουργίας (duty cycle – D) του ballast. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι η μεταβολή του κύκλου λειτουργίας προκαλεί το φαινόμενο της ηλεκτροφόρησης το οποίο έχει ως συνέπεια τη μείωση του χρόνου ζωής του λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής. Το μπλοκ διάγραμμα μιας υλοποίησης ballast το οποίο έχει τη δυνατότητα dimming με τη χρήση ελέγχου κύκλου λειτουργίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



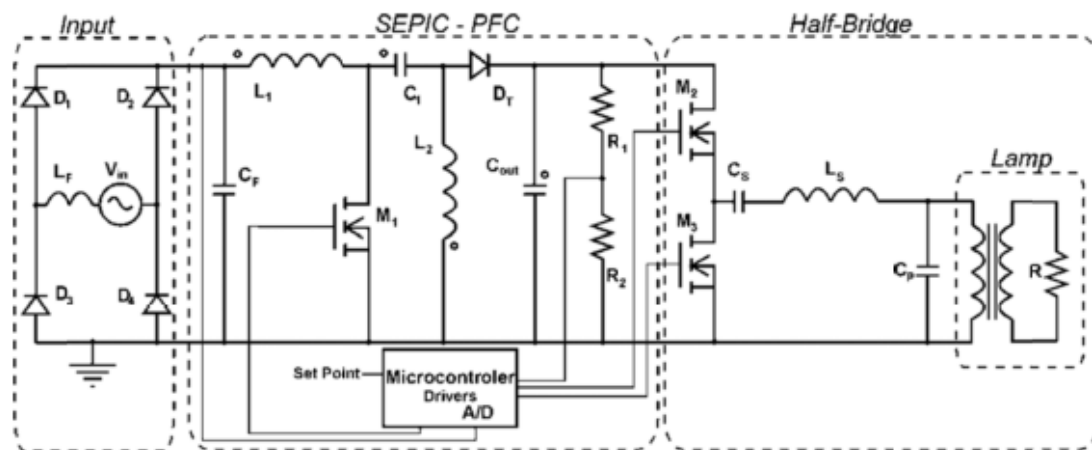
Εικόνα 1-105: Μπλοκ διάγραμμα ballast με δυνατότητα dimming με τη χρήση ελέγχου κύκλου λειτουργίας [43]

### Φίλτρο εξόδου

Με βάση τη μέθοδο αυτή, το dimming του λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής επιτυγχάνεται με τη μεταβολή των παραμέτρων στο φίλτρο εξόδου του ballast. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί μια αρκετά περίπλοκη κατασκευή για το ballast και για το λόγο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη.

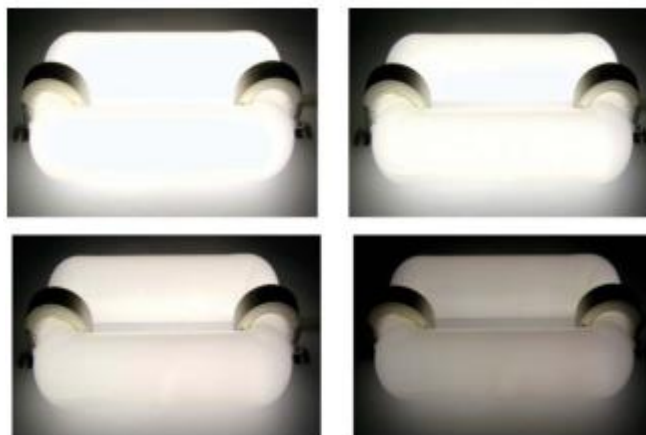
### Έλεγχος τάσης διαύλου

Ο έλεγχος της τάσης διαύλου (bus voltage - VBUS) παρέχει ένα μεγάλο εύρος στην δυνατή έξοδο του λαμπτήρα σε lumen και παρέχει υψηλή απόδοση. Τα χαρακτηριστικά του dimming που επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου αυτής είναι γραμμικά.



Εικόνα 1-106: Κύκλωμα ballast λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής με δυνατότητα ελέγχου τάσης διαύλου [44]

Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση ενός μετατροπέα SEPIC, ο οποίος είναι δυνατό να λειτουργήσει είτε για την ενίσχυση είτε για την μείωση είτε για την απομόνωση της εξόδου. Ο μετατροπέας SEPIC εγγυάται την διατήρηση του υψηλού συντελεστή ισχύος και καθορίζει την τάση εξόδου. [41] [36] [42] [43] [44]



*Εικόνα 1-107: Παράδειγμα dimming λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής με έλεγχο της τάσης διαύλου [43]*

#### *1.2.8.2.6 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές*

Δεδομένου ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής λειτουργούν σε συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται από διάφορες συσκευές για την επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές τις οποίες προκαλούσαν οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής ήταν ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των πρώτων λαμπτήρων αυτής της τεχνολογίας που αναπτύχθηκαν, ενώ αποτέλεσαν έναν από τους βασικούς λόγους για τους οποίους χρειάστηκαν 100 χρόνια για την εμπορική αξιοποίηση της τεχνολογία αυτής. [25]

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές προκαλούνται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία τα οποία παράγονται από τα πηνία και τα κυκλώματα τα οποία περιέχονται στο σύστημα φωτισμού. Για την μείωση των παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Interference - RFI) τα ηλεκτρονικά κυκλώματα τοποθετούνται σε ειδικές θήκες που παρεμποδίζουν τις παρεμβολές, αλλά δεν είναι δυνατό τοποθετηθεί και ο λαμπτήρας σε θήκη χωρίς να υπάρξει απώλεια φωτός. Για αυτό το λόγο οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αρχικά οφείλαν να λειτουργούν σε ραδιοσυχνότητες οι οποίες ανήκουν στα φάσματα ISM τα οποία έχουν καθοριστεί για χρήση εκτός των τηλεπικοινωνιών. Τα φάσματα αυτά (13.56, 27.12 και 40.68 MHz) έχουν πολύ μικρό επιτρεπτό εύρος (bandwidth) και η χρήση ελέγχου από το ballast καθίσταται απαραίτητη. Εν συνεχεία το 1990 ο οργανισμός International Electrotechnical Commission εξέδωσε το πρότυπο CISPR15 για τον έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από συσκευές φωτισμού και το πρότυπο αυτό έχει καθιερώθηκε ως κανονισμός από πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένου και της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το πρότυπο

αυτό, κατά την έκδοσή του, έθεσε χαλαρές απαιτήσεις για τη λειτουργία των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής στο εύρος συχνοτήτων 2.2 - 3 MHz και η αύξηση του μεγέθους του εύρους φάσματος οδήγησε στη μείωση της πολυπλοκότητας και τους κόστους που απαιτούνταν για την κατασκευή των ballast. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμπορική διάθεση λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής οι οποίοι λειτουργούσαν στα 2.65 MHz. [25] [26] [38] [28]

Πλέον οι περισσότεροι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο έχουν συχνότητα λειτουργίας 150-250 kHz, ενώ όπως αναφέρθηκε έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής με συχνότητα λειτουργίας 60 kHz. Η μείωση της συχνότητας λειτουργίας των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής καθιστά τη μείωση των παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων πιο εύκολη και πλέον το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση μεταλλικών θηκών για τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα. [26] [38] [28]

Tubular-type Induction Lamp(250 kHz) : LW Broadcasting		Unit	
Input	Frequency	252	kHz
	Magnetic field strength	39.42	dBμA/m
	Measuring distance	3	m
	$E_{asymptote,40}$	147	dBμV/m
	Max. acceptable interference level	26	dBμV/m
	Victim receiver bandwidth	9000	Hz
Output Results	$d_{transition}$	74989.42	m
	Bandwidth ratio	0.00	dB
	Maximal direction	coaxial	
	Magnetic dipole moment	0.015859	Am <sup>2</sup>
	Effective radiated power	-144.09	dBkW
		-84.09	dBm
		0.003903	nW
	Interference distance (Broadband)	36	m
	Interference distance range	Inside the near field range	
	Interference distance (single freq.)	36	m
Interference distance range	Inside the near field range		

*Πίνακας 1-13: Παράδειγμα μετρήσεων αποστάσεων ασφαλείας από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές για λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής 250 kHz [28]*

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αποστάσεις ασφαλείας από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα είναι μικρότερες σε σχέση με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα έχουν ομοιόμορφα κατανομημένη ακτινοβολία σε σχέση με τους

λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα οι οποίοι περιέχουν επαγωγέα σε σχήμα ράβδου και παρουσιάζουν ισχυρότερη ακτινοβολία στον άξονα αυτό. [28]

Οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής νεότερης τεχνολογίας οι οποίοι είναι εμπορικά διαθέσιμοι φέρουν πιστοποίηση FCC και δεν προκαλούν μεγαλύτερες παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Interference - RFI) από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή ή έναν φούρνο μικροκυμάτων σε λειτουργία. [28]

# 2

## **Σκοπός της διπλωματικής εργασίας**

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των ποικίλων εμπορικά διαθέσιμων και διαδεδομένων τύπων λαμπτήρων και συστημάτων φωτισμού έπειτα και από τη διείσδυση στην αγορά των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής.

Για το σκοπό αυτό έγινε εκτενής μελέτη της βιβλιογραφίας για τους λαμπτήρες πυρακτώσεως (συμβατικούς και αλογόνου), τους λαμπτήρες φθορισμού, τους συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού, τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής και χαμηλής πίεσης, τους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου, τους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων και τους λαμπτήρες LED. Τα κυριότερα στοιχεία των λαμπτήρων αυτών αναφέρθηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων θα πραγματοποιηθεί σύγκρισή τους όσον αφορά τα εξής χαρακτηριστικά:

Απόδοση: Η έννοια της απόδοσης μιας φωτεινής πηγής είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας αξιολόγησης της, καθώς εκφράζει την ποσότητα των παραγόμενων lumen ανά καταναλισκόμενο W.

Φασματική κατανομή: Η φασματική κατανομή της εξόδου ενός λαμπτήρα είναι η μέτρηση της ποσότητας φωτός για κάθε μήκος κύματος την οποία παράγει.

Δείκτης αναλογίας της σκοτοπικής/φωτοπικής ακτινοβολίας: Ο συντελεστής S/P είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για τον καθορισμό της απόδοσης φωτός μιας φωτεινής πηγής η οποία γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο μάτι και καθορίζει την απόδοση την οποία αντιλαμβάνεται ο ανθρώπινος οφθαλμός.

Διάρκεια ζωής: Η διάρκεια ζωής του εκάστοτε λαμπτήρα επηρεάζει άμεσα το κόστος συντήρησης και κατά συνέπεια το κόστος φωτισμού το οποίο χαρακτηρίζει το εκάστοτε σύστημα φωτισμού

Συντελεστής ισχύος και ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος του συστήματος (THD): Οι συσκευές με χαμηλό συντελεστή ισχύος αυξάνουν τις απώλειες στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν ως αποτέλεσμα



αυξημένο ενεργειακό κόστος για τη λειτουργία της συσκευής. Επίσης η ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος του συστήματος είναι δυνατό να επηρεάσει τις απώλειες ενέργειας και επομένως το ενεργειακό κόστος για τον φωτισμό ενός χώρου.

Κόστος φωτισμού: Το κόστος φωτισμού αποτελεί πιθανότατα τον κυριότερα παράγοντα επιλογής ενός λαμπτήρα για τον φωτισμό ενός χώρου και η τεχνοοικονομική ανάλυση κρίνεται απαραίτητη κατά την επιλογή του τύπου λαμπτήρα ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για τον φωτισμό ενός χώρου.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Με δεδομένη την διαρκή ανάγκη σε παγκόσμιο επίπεδο για την αντιμετώπιση του φαινομένου της παγκόσμιας θέρμανσης και της κλιματικής αλλαγής καθώς και με δεδομένη την επιθυμία για τη λιγότερη δυνατή επιβάρυνση του περιβάλλοντος οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι οποίες συνδέονται με τη χρήση ενός τύπου λαμπτήρα θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την επιλογή του τύπου λαμπτήρα ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για τον φωτισμό ενός χώρου.

Αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος: Κατά την επιλογή ενός λαμπτήρα για τον φωτισμό ενός χώρου κρίνεται απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν και οι θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος στις οποίες θα κληθεί να λειτουργήσει ο λαμπτήρας, καθώς ο εκάστοτε τύπος λαμπτήρα παρουσιάζει συγκεκριμένη αντοχή σε αυτές. Πιθανή υπέρβαση κάποιων τιμών θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος είναι δυνατό να μεταβάλει άμεσα και ουσιαστικά τις επιδόσεις και τη λειτουργία του λαμπτήρα.

Τα ανωτέρω σημεία σύγκρισης κρίνεται απαραίτητο να εξεταστούν κατά την επιλογή ενός λαμπτήρα για τον φωτισμό ενός χώρου και αποτελούν τα στοιχεία διαφοροποίησης των ωφελειών που προκύπτουν από τη χρήση των εξεταζόμενων λαμπτήρων.

# 3

## *Σύγκριση Συστημάτων Φωτισμού*

### *3.1 Απόδοση*

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας η έννοια της απόδοσης μιας φωτεινής πηγής είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας αξιολόγησης της, καθώς εκφράζει την ποσότητα των παραγόμενων lumen ανά καταναλισκόμενο W. Η μονάδα μέτρησης της απόδοσης μιας φωτεινής πηγής είναι  $lm/W$ . Είναι εμφανές ότι κατά την σύγκριση των εξεταζόμενων τύπων συστημάτων φωτισμού, η απόδοσή τους είναι ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες.

Η απόδοση ενός εξεταζόμενου τύπου λαμπτήρα είναι δυνατόν να ποικίλει ανάλογα με την υλοποίηση του εκάστοτε κατασκευαστή και για αυτό το λόγο για κάθε εξεταζόμενο τύπο λαμπτήρα θα αναφερθεί το εύρος στο οποίο είναι δυνατόν να κυμαίνεται η απόδοσή του.

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας [8] [11] [24] [45] [39] [25] [30] [15] [31] [9] [12] [10] [16] [22] και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι συμβατικοί λαμπτήρες πυρακτώσεως παρουσιάζουν απόδοση η οποία κυμαίνεται στο εύρος τιμών 10-35  $lm/W$ .

Οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 και T-8 έχουν απόδοση 40-85  $lm/W$  ενώ η απόδοση των συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού είναι στα επίπεδα 50-80  $lm/W$ .

Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων παρουσιάζουν απόδοση 50-110  $lm/W$ , οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης έχουν απόδοση 50-140  $lm/W$  και οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης έχουν απόδοση 100-180  $lm/W$ .

Όσον αφορά τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα έχουν απόδοση 60-78  $lm/W$  ενώ οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα έχουν απόδοση 75-85  $lm/W$ .

Τέλος, όσον αφορά τα συστήματα φωτισμού LED, η απόδοσή τους έχει μεγάλο εύρος τιμών ανάλογα με την εκάστοτε υλοποίηση. Είναι χαρακτηριστικό ότι εμπορικά

διαθέσιμα είναι συστήματα φωτισμού LED τα οποία παρουσιάζουν απόδοση από 17 Lm/W έως και 200 Lm/W.

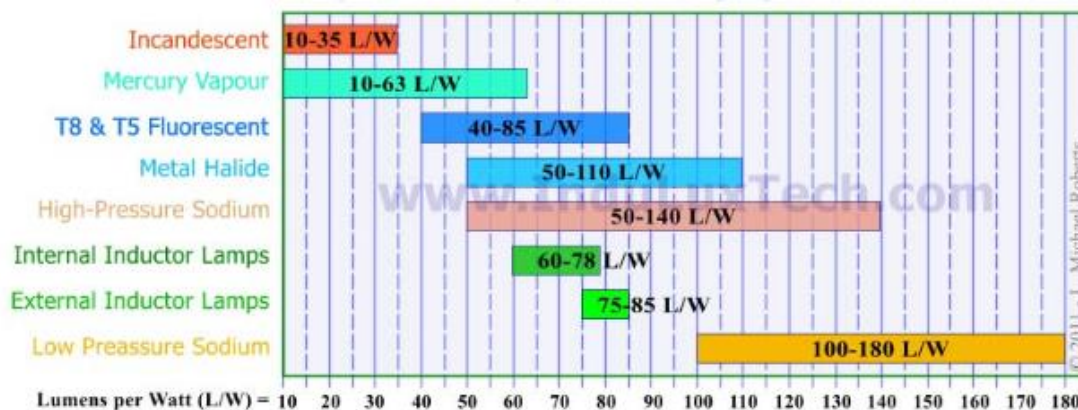
Αξίζει να σημειωθεί ότι ειδικά στην περίπτωση των συστημάτων φωτισμού LED οι υψηλές αυτές αποδόσεις επιτυγχάνονται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και σε εργαστηριακό περιβάλλον με την μέση απόδοση των εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων φωτισμού LED να είναι 46 Lm/W σύμφωνα με το United States Department of Energy [11] (με εύρος απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες 17 – 79 Lm/W).

Οι αποδόσεις των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων όπως αυτές προέκυψαν από τη μελέτη της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα: [8] [11] [24] [45] [39] [25] [30] [15] [31] [9] [12] [10] [16] [22]

Τύπος Λαμπτήρα	Απόδοση
Λαμπτήρες Πυρακτώσεως	10-35 Lm/W
Λαμπτήρες Ατμών Υδραργύρου	10-63 Lm/W
Συμπαγείς Λαμπτήρες Φθορισμού	50-80 Lm/W
Λαμπτήρες Φθορισμού	40-100 Lm/W
Λαμπτήρες Μεταλλικών Αλογονιδίων	50-110 Lm/W
Λαμπτήρες Νατρίου Υψηλής Πίεσης	50-140 Lm/W
LED	Απόδοση σε πραγματικές συνθήκες: 17-79 Lm/W
	Απόδοση με βάση τους κατασκευαστές: 40-150 Lm/W
Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής Εσωτερικού Επαγωγέα	60-78 Lm/W
Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής Εξωτερικού Επαγωγέα	75-85 Lm/W
Λαμπτήρες Νατρίου Χαμηλής Πίεσης	100-180 Lm/W

*Πίνακας 3-1: Αποδόσεις εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων*

Οι αποδόσεις των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων παρίστανται και γραφικά στο παρακάτω σχήμα το οποίο συναντήθηκε στη βιβλιογραφία: [24]



Εικόνα 3-1: Αποδόσεις των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων [24]

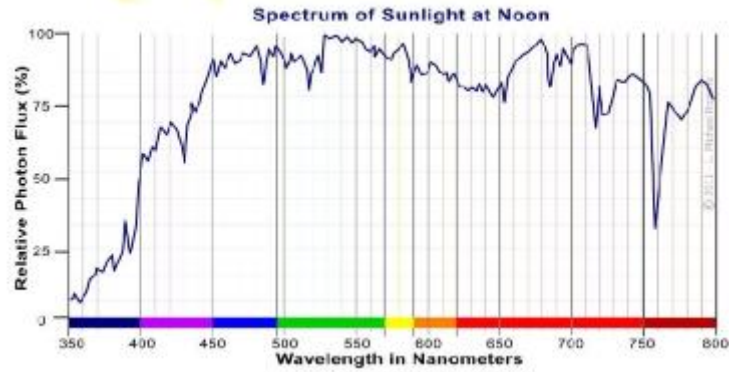
Αξίζει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο γράφημα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις σε κάποιες περιπτώσεις σε σχέση με τον πίνακα που δημιουργήθηκε ανωτέρω για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η διαφορά παρατηρείται στους λαμπτήρες φθορισμού όπου ύστερα από μελέτη της βιβλιογραφίας προέκυψε ότι υφίστανται λαμπτήρες φθορισμού τύπου T5 με απόδοση έως 100 Lm/W.

Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας θα λαμβάνεται υπόψιν ο πίνακας 3-1, ο οποίος μας επιτρέπει στην εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων καθώς κάνει χρήση την πλήρη μελέτη της βιβλιογραφίας.

### 3.2 Φασματική κατανομή

Η φασματική κατανομή της εξόδου ενός λαμπτήρα είναι η μέτρηση της ποσότητας φωτός για κάθε μήκος κύματος την οποία παράγει. Οι μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται με τη χρήση ειδικού οργάνου μπορούν να παρασταθούν γραφικά σε ένα διάγραμμα το οποίο αντικατοπτρίζει τις τιμές έντασης φωτός σε σχέση με το μήκος κύματος.

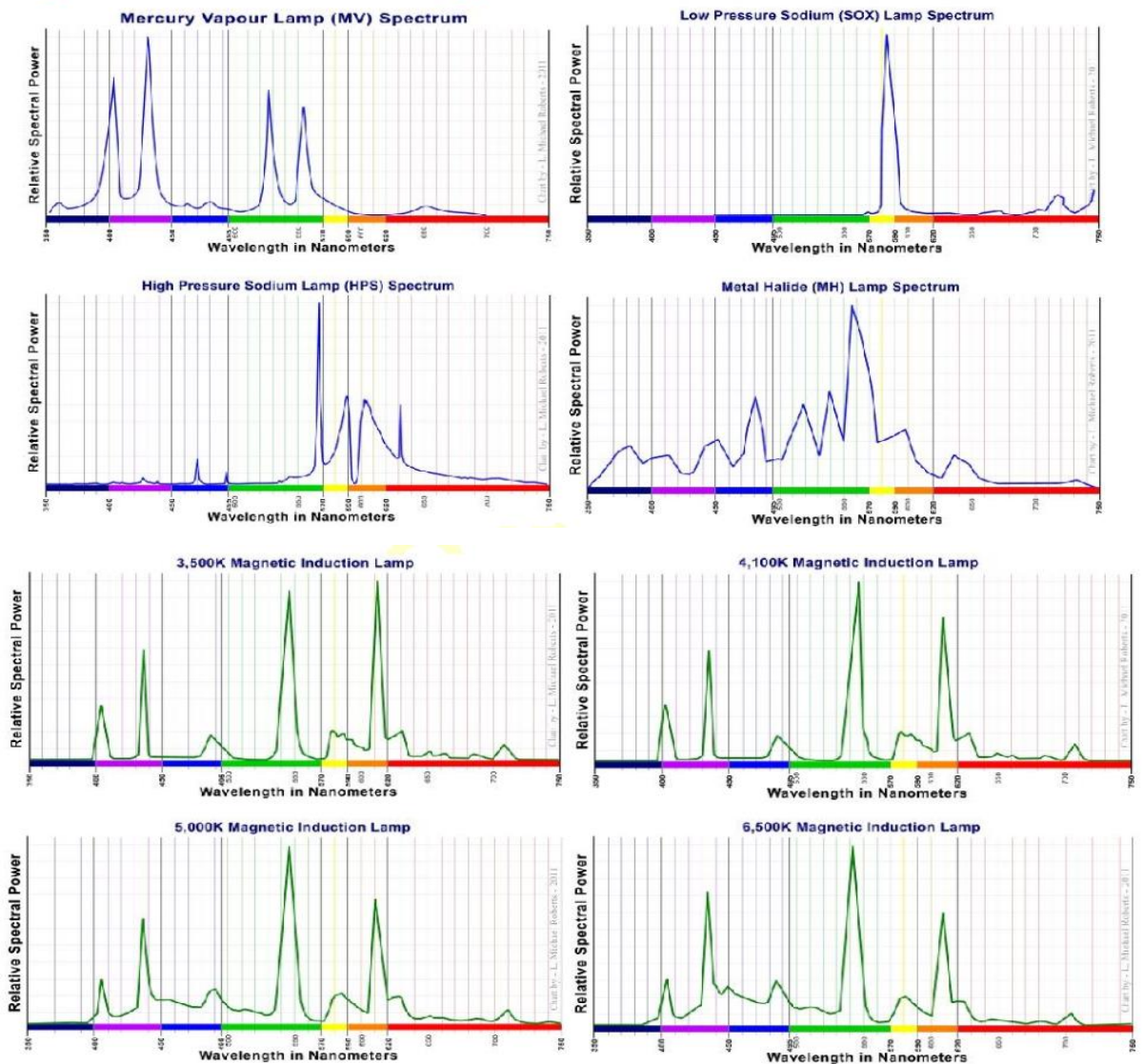
Η φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός αποτελεί το μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση των φασματικών κατανομών του φωτός το οποίο παράγουν οι διάφοροι τύποι λαμπτήρων. Αν και η φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός ποικίλει ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την γωνία του ηλίου και την ατμοσφαιρική μόλυνση, μια τυπική φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός μεσημβρινής ώρας με αίθριο καιρό είναι η εξής: [24]



Εικόνα 3-2: Τυπική φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός μεσημβρινής ώρας με αίθριο καιρό [24]

Παρακάτω παρατίθενται προς σύγκριση οι φασματικές κατανομές του φωτός το οποίο παράγουν οι εξεταζόμενοι τύποι λαμπτήρων: [11] [24]

**Typical Commercial/Industrial lamp types:**

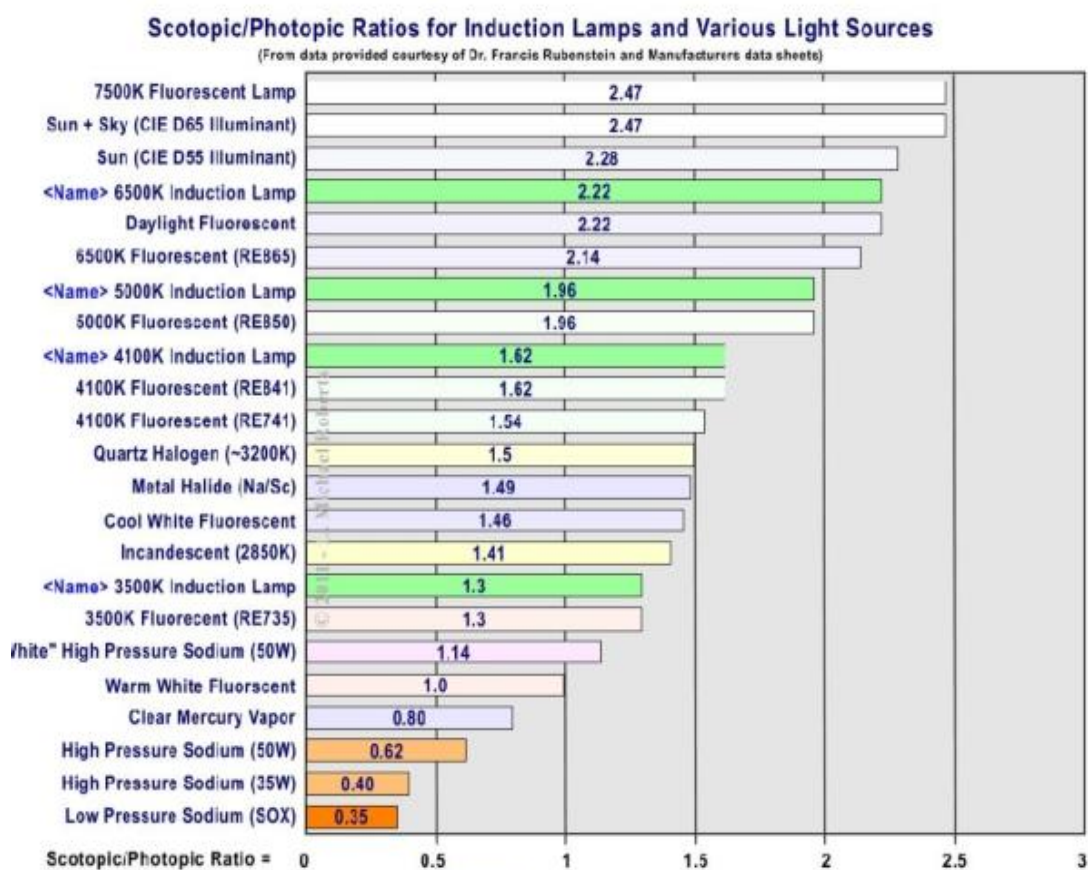


Εικόνα 3-3: Φασματικές κατανομές του φωτός για διάφορους τύπους λαμπτήρων [24]

### 3.3 Συντελεστής S/P

Όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, ο δείκτης αναλογίας της σκοτοπικής/φωτοπικής ακτινοβολίας μιας φωτεινής πηγής, είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής μιας πηγής φωτός ως προς την φωτοπική συνάρτηση ευαισθησίας  $V(\lambda)$ , προς την φωτεινή ροή ως προς την σκοτοπική συνάρτηση ευαισθησίας  $V'(\lambda)$ . Φωτεινές πηγές με μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας τους στα χαμηλά μήκη κύματος θα έχουν μεγαλύτερους δείκτες S/P.

Ο δείκτης S/P για τους ποικίλους τύπους των εξεταζόμενων λαμπτήρων παρατίθεται στο παρακάτω γράφημα: [24]



Εικόνα 3-4: Ο δείκτης S/P για ποικίλους τύπους λαμπτήρων [24]

Αξίζει, να σημειωθεί πως για να γίνει αντιληπτή καλύτερα η έννοια του δείκτη S/P, μπορούμε να την συνδέσουμε με την θερμοκρασία χρώματος μιας φωτεινής πηγής, όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο πιο υψηλός είναι ο δείκτης S/P. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία χρώματος, τόσο πιο αριστερά μετατοπισμένο είναι το φάσμα εκπομπής του, δηλαδή προς το πεδίο της σκοτοπικής όρασης. Επομένως, οι λαμπτήρες χαμηλής πίεσης νατρίου, οι οποίοι είναι

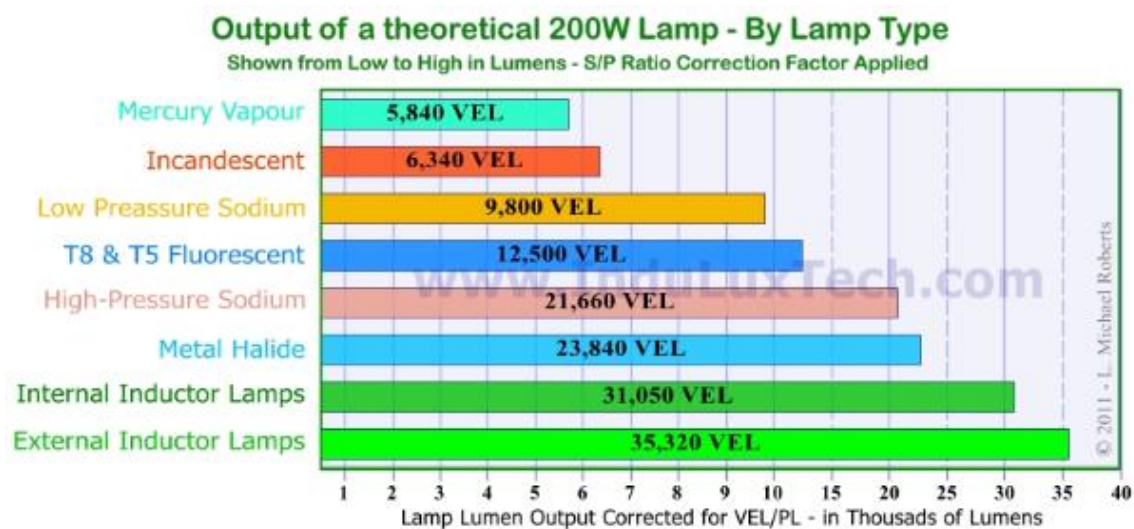
σχεδόν μονοχρωματικοί και παράγουν το περισσότερο φως σε μήκη κύματος κοντά στα 600 nm, παρουσιάζουν πολύ μικρό συντελεστή S/P. Αντίθετα, οι λαμπτήρες οι οποίοι παράγουν μεγάλες θερμοκρασίες χρώματος τείνουν να παράγουν περισσότερο χρώμα σε ιώδεις ακτινοβολίες με αποτέλεσμα να διεγείρουν περισσότερο τον οφθαλμό.

Το γεγονός αυτό έχει ως άμεση συνέπεια οι λαμπτήρες με το μεγαλύτερο συντελεστή S/P να είναι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, τα φωτιστικά συστήματα LED και συγκεκριμένοι τύποι λαμπτήρων φθορισμού. Όσον αφορά τα φωτιστικά συστήματα LED, λόγω της μεγάλης ποικιλίας την οποία παρουσιάζουν ως προς τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας τους ανάλογα με την εκάστοτε υλοποίηση, ο συντελεστής S/P παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές. Τα φωτιστικά συστήματα LED τα οποία εμφανίζουν μεγάλη απόδοση παρουσιάζουν συντελεστή S/P με τιμές 2.19-2.25, δηλαδή παρόμοιες με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής. Βέβαια τα φωτιστικά συστήματα LED με αυτό το χαρακτηριστικό έχουν μεγάλο κόστος αγοράς, σημαντικά μεγαλύτερο από τα οικονομικά φωτιστικά συστήματα LED τα οποία εμφανίζουν χαμηλότερους συντελεστές S/P.

Ο συντελεστής S/P είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για τον καθορισμό της απόδοσης φωτός μιας φωτεινής πηγής η οποία γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο μάτι. Η απόδοση των λαμπτήρων, όπως αυτή μετράται σε Lm/W, αναλύθηκε προηγουμένως, η απόδοση όμως αυτή προκύπτει από τις μετρήσεις οι οποίες γίνονται με εργαστηριακά όργανα και δεν αντιπροσωπεύει πλήρως την απόδοση την οποία αντιλαμβάνεται ο ανθρώπινος οφθαλμός. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο όρος VEL (Visually Effective Lumens), ο οποίος συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία και ως Pupil Lumens (PL), και ο οποίος προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του συντελεστή S/P με την φωτεινή ροή την οποία παράγει μια φωτεινή πηγή (lumens). Το φαινόμενο αυτό έχει ως συνέπεια ορισμένοι τύποι λαμπτήρων να φαίνονται λαμπρότεροι στο ανθρώπινο μάτι και να δίνουν καλύτερη ποιότητα φωτός, παρά το γεγονός ότι με βάση τις εργαστηριακές μετρήσεις έχουν την ίδια απόδοση φωτός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις για την απόδοση φωτισμού μιας πηγής γίνονται με βάση μόνο την φωτοπική όραση με αποτέλεσμα να αγνοούνται σημαντικές παράμετροι για την λειτουργία και την ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού, όπως η συσχέτιση φωτοπικής/σκοτοπικής όρασης και ο συντελεστής S/P. Επομένως, με βάση τα ανωτέρω, είναι δυνατό να αξιολογήσουμε την απόδοση ενός λαμπτήρα με βάση την απόδοση η οποία γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο οφθαλμό.

Όπως είναι εμφανές από τα ανωτέρω, η ιδεατή περίπτωση για την παροχή φωτός με υψηλό VEL είναι μια πηγή η οποία παράγει φως του οποίου η φασματική κατανομή προσεγγίζει την φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός. Με βάση αυτό, ο λαμπτήρας του οποίου το παραγόμενο φως προσεγγίζει καλύτερα την φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός είναι ο λαμπτήρας πλάσματος. Δεδομένου όμως ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα ούτως ώστε να καταστεί συμφέρουσα οικονομικά, για του λόγους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι λαμπτήρες οι οποίοι παράγουν την αμέσως καλύτερη φωτεινότητα VEL είναι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και ορισμένες υλοποιήσεις φωτιστικών συστημάτων LED.

Η απόδοση ενός λαμπτήρα με βάση την απόδοση η οποία γίνεται αντιληπτή από τον ανθρώπινο οφθαλμό συναντήθηκε και στη μελέτη της βιβλιογραφίας με τη μορφή του ακόλουθου διαγράμματος: [24]



Εικόνα 3-5: Αποδόσεις λαμπτήρων σε VEL [24]

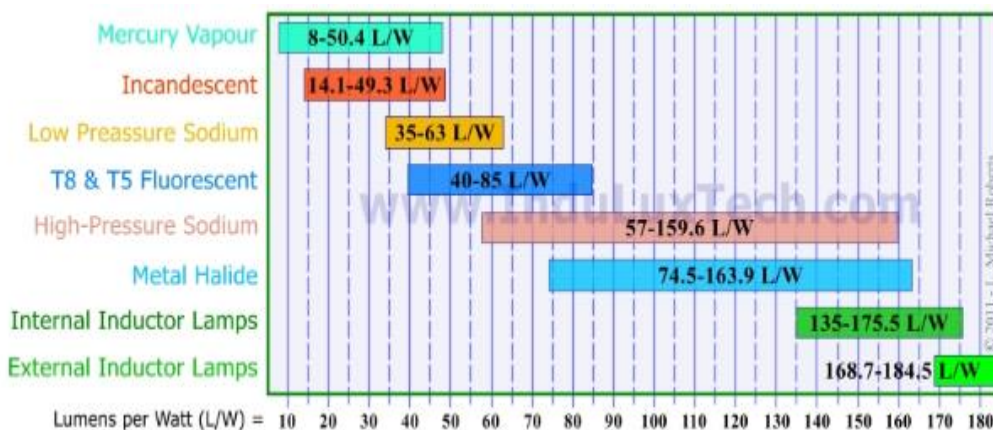
Κατά συνέπεια, με βάση τη μελέτη της [24] [45] [6] [2] και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η απόδοση των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων η οποία αναλύθηκε προηγουμένως μπορεί να μετασχηματιστεί με βάση τον συντελεστή S/P για να λάβει υπόψιν τη μεσοπική όραση όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:



Τύπος Λαμπτήρα	Απόδοση
Λαμπτήρες Ατμών Υδραργύρου	8-50,4 Lm/W
Λαμπτήρες Πυρακτώσεως	14,1-49,3 Lm/W
Λαμπτήρες Νατρίου Χαμηλής Πίεσης	35-63 Lm/W
Συμπαγείς Λαμπτήρες Φθορισμού	56,5-90,4 Lm/W
Λαμπτήρες Φθορισμού	40-100 Lm/W
Λαμπτήρες Μεταλλικών Αλογονιδίων	74,5-163,9 Lm/W
Λαμπτήρες Νατρίου Υψηλής Πίεσης	57-159,6 Lm/W
LED	Απόδοση σε πραγματικές συνθήκες:
	37,4-173,8 Lm/W
	Απόδοση με βάση τους κατασκευαστές:
	88-330 Lm/W
Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής Εσωτερικού Επαγωγέα	135-175,5 Lm/W
Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής Εξωτερικού Επαγωγέα	168,7-184,5 Lm/W

Πίνακας 3-2: Αποδόσεις λαμπτήρων προσαρμοσμένες στη μεσοπική όραση

Η απόδοση των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων η οποία αναλύθηκε προηγουμένως συναντήθηκε και στη μελέτη της βιβλιογραφίας με τη μορφή του ακόλουθου διαγράμματος: [24]



Εικόνα 3-6: Αποδόσεις λαμπτήρων προσαρμοσμένες στη μεσοπική όραση [24]

Η σημαντική πτώση της απόδοσης των λαμπτήρων νατρίου χαμηλής πίεσης η οποία παρατηρείται, οφείλεται στο γεγονός ότι οι λαμπτήρες αυτοί παράγουν σχεδόν αποκλειστικά κίτρινο φως και, όντας σχεδόν μονοχρωματικοί, αποτυγχάνουν να παρέχουν μεγάλη ποσότητα φωτός χρήσιμη στον ανθρώπινο οφθαλμό.

Όπως παρατηρείται, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής ορισμένες υλοποιήσεις φωτιστικών συστημάτων LED παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόδοση αν ληφθεί

υπόψιν ο συντελεστής S/P. Το συμπέρασμα αυτό άλλωστε ήταν και αναμενόμενο, καθώς οι τύποι λαμπτήρων αυτοί παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές για τον συντελεστή S/P ενώ και η απόδοση τους πριν την προσαρμογή στη μεσοπική όραση κρινόταν ικανοποιητική. Είναι σημαντικό ωστόσο το γεγονός ότι τα φωτιστικά συστήματα LED τα οποία εμφανίζουν μεγάλες αποδόσεις εκμεταλλευόμενα τον υψηλό συντελεστή S/P έχουν και μεγάλο αρχικό κόστος για την αγορά τους με συνέπεια το κόστος φωτισμού για αυτά τα συστήματα να αυξάνεται λόγω του υψηλού κόστους αγοράς και συντήρησης που προκύπτει, όπως θα εξετάσουμε και παρακάτω.

### **3.4 Διάρκεια Ζωής**

Ένα σημαντικό στοιχείο το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τη σύγκριση των εξεταζόμενων συστημάτων φωτισμού και κατά την επιλογή του βέλτιστου συστήματος για τον φωτισμό ενός χώρου είναι η διάρκεια ζωής του εκάστοτε λαμπτήρα. Το στοιχείο αυτό επηρεάζει άμεσα το κόστος συντήρησης και κατά συνέπεια το κόστος φωτισμού το οποίο χαρακτηρίζει το εκάστοτε σύστημα φωτισμού.

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας [8] [11] [14] [7] [24] [45] [22] [39] [46] [9] και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τη μικρότερη διάρκεια ζωής παρουσιάζουν οι λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι είναι δυνατό να λειτουργήσουν για διάστημα 750-1000 ώρες. Ακολουθούν οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων και οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού οι οποίοι έχουν διάρκεια ζωής 7.500-10.000 ώρες. Οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου σωλήνα, περιλαμβάνοντας τις περιπτώσεις των λαμπτήρων τύπου T-5 και T-8, παρουσιάζουν διάρκεια ζωής 15.000-20.000 ώρες ενώ οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης έχουν διάρκεια ζωής 15.000-25.000 ώρες. Η διάρκεια ζωής των συστημάτων φωτισμού LED ανέρχεται σε 45.000-55.000 ώρες. Τα συστήματα φωτισμού με τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής είναι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, καθώς οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα έχουν διάρκεια ζωής 60.000-75.000 ώρες και οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα παρουσιάζουν διάρκεια ζωής 85.000-100.000 ώρες. Το πλεονέκτημα αυτό των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, όπως έχει προαναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οφείλεται στο γεγονός ότι δεν διαθέτουν ηλεκτρόδια εντός του λαμπτήρα με αποτέλεσμα να μην περιορίζονται από την εξάντληση των υλικών των ηλεκτροδίων με την πάροδο του χρόνου και να ο σωλήνας του λαμπτήρα να είναι αεροστεγώς

σφραγισμένος χωρίς να υφίσταται ο κίνδυνος εισχώρησης ατμοσφαιρικού αέρα από σημεία εισόδου ηλεκτροδίων στον λαμπτήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι η εμπορική εκμετάλλευση των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής είναι σχετικά πρόσφατη, και ο χρόνος ζωής των πρώτων εμπορικά διαθέσιμων λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής εξαντλείται τα τελευταία έτη, επομένως θα μπορούσαν να προκύψουν ερωτήματα για την ορθότητα της εκτίμησης του χρόνου ζωής τους, τα έως τώρα δεδομένα από τη λειτουργία των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής στην πράξη, η τεκμηρίωση των λόγων φθοράς των λαμπτήρων φθορισμού και η εξάλειψη τους από την τεχνολογία των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής, αλλά και τη τεκμηρίωση η οποία προκύπτει από τη μελέτη της βιβλιογραφίας [26] [25] [24] [33] συνηγορούν στα νούμερα τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω.

Οι χρόνοι ζωής των λαμπτήρων είναι δυνατόν να διαφέρουν ανάλογα με την υλοποίηση του εκάστοτε κατασκευαστή και για αυτό το λόγο η διάρκεια ζωής αναφέρεται με ένα εύρος ωρών λειτουργίας για κάθε εξεταζόμενο τύπο λαμπτήρα. Η διάρκεια ζωής των εξεταζόμενων συστημάτων φωτισμού παρατίθενται και γραφικά στο παρακάτω σχήμα το οποίο κατασκευάστηκε για αυτό το σκοπό: [8] [11] [14] [7] [24] [45] [22] [39] [46] [9]

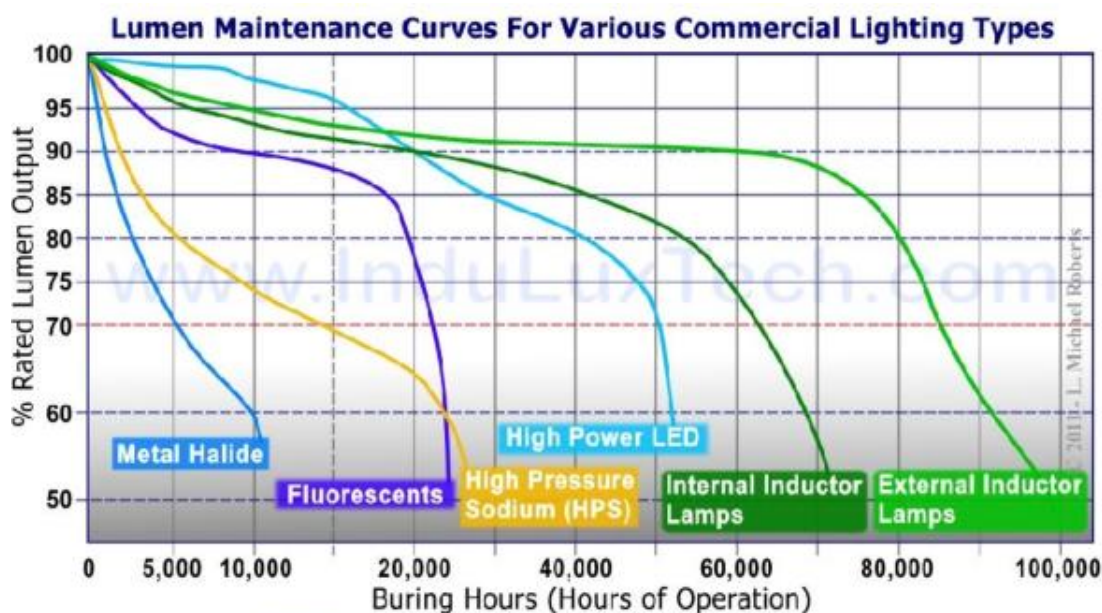


*Εικόνα 3-7: Τυπική διάρκεια ζωής λαμπτήρων*

Ένα σημαντικό στοιχείο επίσης για την αξιολόγηση του χρόνου ζωής του εκάστοτε συστήματος φωτισμού είναι η διατήρηση της φωτεινής ροής λαμπτήρα (Lumen maintenance) με την πάροδο του χρόνου. Με την πάροδο των ετών και την

συσσώρευση ωρών λειτουργίας, τόσο η φωτεινή ροή την οποία παράγουν οι λαμπτήρες, όσο και η ενεργειακή τους απόδοση φθίνει. Η αιτία του φαινομένου αυτού ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του λαμπτήρα με χαρακτηριστικά παραδείγματα την εξάντληση χημικών στοιχείων τα οποία περικλείονται στον λαμπτήρα και είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του, την απορρόφηση μορίων αερίου από τα τοιχώματα των λαμπτήρων και τις αλλαγές στην εσωτερική πίεση του λαμπτήρα.

Στο σημείο κατά το οποίο η απόδοση φωτεινής ροής ενός λαμπτήρα καθίσταται μικρότερη του 70% της αρχικής απόδοσής του συνιστάται αντικατάσταση του λαμπτήρα. Η σύσταση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, παρότι μια πτώση έως 15% της απόδοσης της φωτεινής ροής του λαμπτήρα δεν είναι αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι, περαιτέρω πτώση γίνεται αισθητή. Αυτή η σύσταση ενισχύεται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η διατήρηση ενός ελαχίστου επιπέδου φωτισμού για την διετέλεση των εργασιών που γίνονται στο χώρο στον οποίο χρησιμοποιείται το σύστημα φωτισμού. Η διατήρηση της φωτεινής ροής λαμπτήρα για τους εξεταζόμενους τύπους λαμπτήρων φαίνεται στο παρακάτω γράφημα με την βοήθεια καμπυλών διατήρησης της φωτεινής ροής λαμπτήρα: [24],[50]



Εικόνα 3-8: Η διατήρηση της φωτεινής ροής διαφόρων τύπων λαμπτήρων [24],[50]

Από το γράφημα αυτό παρατηρείται ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εξωτερικού επαγωγέα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, έχοντας τη δυνατότητα λειτουργίας 85.000 ωρών έως ότου η απόδοση φωτεινής ροής τους φθάσει στο 70% της αρχικής τους απόδοσης με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εσωτερικού επαγωγέα να ακολουθούν. Εν συνεχεία ακολουθούν να συστήματα

φωτισμού LED τα οποία έχουν διάρκεια χρήσιμης ζωής 50.000 ώρες ενώ οι λαμπτήρες με τη μικρότερη διάρκεια χρήσιμης ζωής είναι οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων οι οποίοι έπειτα από 5.000 ώρες λειτουργίας έχουν απωλέσει το 30% της αρχικής απόδοσης φωτεινής ροής τους.

Άξιο αναφοράς είναι και το γεγονός ότι ενώ τα συστήματα φωτισμού LED παρουσιάζουν σημαντική πτώση της απόδοσής τους μετά τις 50.000 ώρες, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζουν απόδοση φωτεινής ροής η οποία διατηρείται στο 60% της αρχικής τους απόδοσης έπειτα από 90.000 ώρες λειτουργίας.

Όπως είναι εμφανές, η διάρκεια ζωής των λαμπτήρων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει άμεσα το κόστος συντήρησης των συστημάτων φωτισμού. Όσο πιο σύντομα ένας λαμπτήρας φθάσει σε σημείο να αποδίδει στο 70% της αρχικής του απόδοσης, τόσο πιο σύντομα θα καταστεί αναγκαία η αντικατάστασή του με το κόστος αντικατάστασης ενός λαμπτήρα να είναι υψηλό, ιδιαίτερα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου είναι δυνατό να απαιτείται μετακίνηση εξοπλισμού ή και χρήση βοηθητικού εξοπλισμού, όπως ανυψωτικά μηχανήματα, για την αντικατάσταση ενός λαμπτήρα. Επίσης σημαντικό στοιχείο για την αντικατάσταση των συστημάτων φωτισμού LED είναι το γεγονός ότι δεν είναι δυνατή η αντικατάσταση μεμονωμένων λυχνιών, καθώς το ισχυρότερο στοιχείο LED σε παραγωγή τη δεδομένη χρονική στιγμή έχει ισχύ 25W και για τη δημιουργία ενός συστήματος φωτισμού LED ισχύος 200W απαιτείται συστοιχία στοιχείων LED. Το σύστημα απαγωγής θερμότητας της συστοιχίας αυτής και η εξάρτησή του από την κατάλληλη επαφή του με το υπόλοιπο σύστημα καθιστά αδύνατη την αντικατάσταση μεμονωμένων στοιχείων του συστήματος φωτισμού με αποτέλεσμα κατά το τέλος του χρόνου ζωής των συστημάτων φωτισμού LED να απαιτείται πλήρης αντικατάσταση όλου του συστήματος φωτισμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προαναφερθείσες διάρκειες ζωής των λαμπτήρων καθώς και οι ρυθμοί μείωσης της απόδοσής τους με την πάροδο του χρόνου αφενός ποικίλουν ανάλογα με την υλοποίηση του εκάστοτε κατασκευαστή, αφετέρου αναφέρονται σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας και είναι δυνατόν να επηρεαστούν σημαντικά και να μεταβληθούν ανάλογα με τις θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος στις οποίες θα κληθούν να λειτουργήσουν, όπως θα εξεταστεί αναλυτικά και παρακάτω.

### 3.5 Συντελεστής Ισχύος και THD

Ο συντελεστής ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι το πηλίκο της ενεργούς ισχύος προς την φαινόμενη ισχύ. Ο συντελεστής ισχύος, χωρίς την ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών, ορίζεται από την σχέση:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\phi_1)}{V_1 \cdot I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos(\phi_1)$$

Η γωνία  $\phi_1$  συμβολίζει την διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος. Σε ιδανικές περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν αρμονικές συνιστώσες μεγαλύτερης τάξης ο πρώτος όρος ισούται με μονάδα και το μόνο στοιχείο που επηρεάζει τον προσδιορισμό του συντελεστή είναι το είδος του φορτίου που καθορίζεται από την γωνία.

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι περιλαμβάνουν μόνο στοιχεία αντίστασης έχουν συντελεστή ισχύος 1. Αντιθέτως, τα υπόλοιπα εξεταζόμενα συστήματα φωτισμού περιλαμβάνουν μετασχηματιστές και πυκνωτές και κατά συνέπεια θα έχουν επίδραση στον συντελεστή ισχύος τους λόγω των στοιχείων αυτών. Μικρές ποσότητες ενέργειας οι οποίες αποθηκεύονται στο φορτίο και επιστρέφουν στην πηγή καθώς και μη γραμμικά φορτία τα οποία διαταράσσουν την κυματομορφή του ρεύματος έχουν ως αποτέλεσμα οι συσκευές οι οποίες περιέχουν πηνία, πυκνωτές ή μετασχηματιστές να έχουν ενεργή ισχύ μικρότερη από την φαινόμενη ισχύ. Οι συσκευές με χαμηλό συντελεστή ισχύος αυξάνουν τις απώλειες στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένο ενεργειακό κόστος για τη λειτουργία της συσκευής. Αυτό συμβαίνει διότι οι συσκευές αυτές απαιτούν την παροχή υψηλότερης φαινόμενης ισχύος από το δίκτυο για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών σε ενεργή ισχύ. Με βάση τα παραπάνω το ιδανικό είναι ο συντελεστής ισχύος της εκάστοτε συσκευής να τείνει στη μονάδα.

Οι συντελεστές ισχύος των εξεταζόμενων συστημάτων φωτισμού παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, όπου περιλαμβάνονται και οι συντελεστές ισχύος άλλων οικιακών συσκευών ως μέτρο σύγκρισης: [39] [17] [34] [9]

Συντελεστές Ισχύος Τυπικών Ηλεκτρικών Συσκευών	
Τύπος Συσκευής	Συντελεστής Ισχύος
Λαμπτήρας Πυρακτώσεως	1
Λαμπτήρας Φθορισμού	0,6-0,85
Συμπαγής Λαμπτήρας Φθορισμού	0,4-0,6
LED	0,43-0,7
Λαμπτήρας Μαγνητικής Επαγωγής	0,9-0,98
Τηλεόραση CRT)	0,62
Τηλεόραση (LCD)	0,59
Τηλεόραση (projection)	0,64
Τηλεόραση/VCR	0,59
Ενισχυτής	0,66

Πίνακας 3-3: Συντελεστές Ισχύος Τυπικών Ηλεκτρικών Συσκευών

Όπως προκύπτει από τον πίνακα αυτό, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι έχουν συντελεστή ισχύος ίσο με 1 δεν προκαλούν τις απώλειες ενέργειας λόγω του συντελεστή ισχύος τους, ενώ εξαιρετικές επιδόσεις στον τομέα αυτό έχουν και οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής με συντελεστή ισχύος στο εύρος 0,90-0,98. Τα υπόλοιπα εξεταζόμενα συστήματα φωτισμού παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερο συντελεστή ισχύος κυρίως λόγω των μετασχηματιστών “πυρήνα και πηνίου” τους οποίους περιλαμβάνουν στα ballast.

Εκτός του συντελεστή ισχύος κατά την αξιολόγηση ενός συστήματος φωτισμού θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος του συστήματος (THD). Για διατάξεις όπως τα ηλεκτρονικά ισχύος και ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα ballast, τα επιμέρους διακοπτικά στοιχεία έχουν την τάση να δημιουργούν ανώτερες αρμονικές. Με αυτό τον τρόπο εμφανίζονται φαινόμενα συντονισμού και υπερφόρτωσης των καλωδίων που πρακτικά υλοποιούνται με την κατανάλωση άεργου ισχύος. Παρατηρείται επομένως μια πτώση του συντελεστή ισχύος. Ο όρος  $I_1/I$  μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικότερα με τη χρήση του λεγόμενου συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης ή ισοδύναμα THD. Η σχέση του συντελεστή ισχύος ορίζεται ως:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cdot \cos(\phi_1)$$

Ο όρος THD μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$THD = \frac{\sqrt{F^2 - F_1^2}}{F_1} = \frac{\sqrt{F_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} F_n^2}}{F_1}$$

Ποιοτικά ο αριθμητής αναφέρεται στην ενεργό τιμή του σήματος χωρίς την επίδραση της θεμελιώδους συνιστώσας ενώ αντίθετα ο παρονομαστής είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους. Η  $F_0$  προφανώς αποτελεί την dc συνιστώσα.

Τα συνιστάμενα όρια της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης είναι  $THD < 5\%$  και της ολικής αρμονικής παραμόρφωση του ρεύματος είναι  $THD < 32\%$ . Η υπέρβαση των ορίων αυτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών ενέργειας και επομένως την αύξηση του ενεργειακού κόστους για τον φωτισμό ενός χώρου. Η ολική αρμονική παραμόρφωση είναι δυνατόν να βελτιωθεί με τη χρήση πρόσθετων στοιχείων στο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός συστήματος φωτισμού και παρατηρείται μεγάλο εύρος τιμών ανάλογα με τις υλοποιήσεις των κατασκευαστών για τα εκάστοτε συστήματα φωτισμού και οι λαμπτήρες πυρακτώσεως μαζί με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζουν συνολικά μικρές τιμές ολικής αρμονικής παραμόρφωσης, ενώ οι λοιποί εξεταζόμενοι τύποι λαμπτήρων υστερούν σημαντικά σε αυτόν τον τομέα.

Τυπικά τα ballast που περιλαμβάνουν μετασχηματιστές τύπου “πυρήνα και πηνίου” επιφέρουν 10 έως 20% πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την ονομαστική κατανάλωση ενέργειας του λαμπτήρα ενώ τα ηλεκτρονικά ballast επιφέρουν 4 έως 9% πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την ονομαστική κατανάλωση ενέργειας του λαμπτήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τα ballast των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής η πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε 2 έως 5%.

Τα στοιχεία τα οποία αναφερθήκαν στο υποκεφάλαιο αυτό, προέκυψαν από τη μελέτη της βιβλιογραφίας [39] [17] [34] [9]



### 3.6 Ανάλυση Κόστους Φωτισμού

Το κόστος φωτισμού ενός χώρου εξαρτάται από την ισχύ του λαμπτήρα, την ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος, τον συντελεστή ισχύος του συστήματος φωτισμού, τον δείκτη χρωματικής απόδοσης, την ενεργειακή απόδοση του λαμπτήρα, την απόδοση φωτεινής ροής του λαμπτήρα, το χρόνο ζωής του λαμπτήρα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί το σύστημα φωτισμού. Επομένως για να καθορίσουμε το οικονομικότερο σύστημα για τον φωτισμό ενός χώρου θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλες οι ανωτέρω παράμετροι. Όπως είναι προφανές η ανάλυση κόστους για τον φωτισμό θα πρέπει να γίνεται ανά περίπτωση ανάλογα με τις ανάγκες φωτισμού και τις παραμέτρους που υπάρχουν.

Για την σύγκριση των εξεταζόμενων συστημάτων φωτισμού ως προς το κόστος το οποίο προκύπτει από τη χρήση τους για το φωτισμό ενός χώρου αρχικά θα εξετάσουμε μια ενδεικτική περίπτωση η οποία συναντήθηκε στη βιβλιογραφία [39] και στην οποία χρειάζεται να φωτίσουμε έναν χώρο με φωτεινή ροή 1700 lumen για 23 έτη. Για τις ανάγκες του συγκεκριμένου παραδείγματος θα θεωρήσουμε ότι οι λαμπτήρες λειτουργούν σε βέλτιστες για αυτούς συνθήκες και αποδίδουν με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών. Η ενεργειακή απόδοση και η απόδοση φωτεινής ροής ανά τύπο συστήματος φωτισμού φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος Λαμπτήρα	Ισχύς	Efficiency (%)	Απόδοση (Lm/W)	Μετατροπή (W x Lm/W)	Έξοδος (Lumens)
Λαμπτήρας Πυρακτώσεως	100	1,9-2,6	17 (12-20)	100 x 17	1700
Λαμπτήρας Φθορισμού	18	9-15	94 (70-100)	18 x 94	1692
Συμπαγής Λαμπτήρας Φθορισμού (CFL)	23	8-11	74 (50-80)	23 x 74	1702
LED	15	20-22	113 (80-150)	15 x 113	1700
Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής (EEFL)	21	9-14	81 (80-82)	21 x 81	1701

Πίνακας 3-4: Ενεργειακή απόδοση και απόδοση φωτεινής ροής ανά τύπο συστήματος φωτισμού [39]

Εν συνεχεία, συνυπολογίζοντας το κόστος λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος φωτισμού και το κόστος αρχικής αγοράς αλλά και αντικατάστασης των λαμπτήρων οι οποίοι θα απαιτηθούν για τον φωτισμό του χώρου για 23 έτη προκύπτει ο παρακάτω πίνακας: [39]

Παράμετροι	Συμπαγής			Λαμπτήρας Φθορισμού	Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής (EEFL)
	Λαμπτήρας Πυρακτώσεως	Λαμπτήρας Φθορισμού (CFL)	LED		
Απαιτούμενη ισχύς λαμπτήρα για 1700 lm	100	23	15	18	21
Χρόνος ζωής λαμπτήρα (χιλιάδες ώρες)	1	10	50	20	100
Απαιτούμενες kWh για 100 kWh	10.000	2.300	1.500	1.800	2.100
Ενεργειακό Κόστος (€) για 100 kWh	432	99,36	64,8	77,76	90,72
Τιμή πώλησης λαμπτήρα (ανά μονάδα)(€)	0,72	7,92	36	11,52	43,2
Χρησιμοποιούμενοι Λαμπτήρες σε 100.000 ώρες	100	10	2	5	1
Κόστος λαμπτήρων για χρονική περίοδο 23 ετών	72	79,2	72	57,6	43,2
Συνολικό Κόστος για χρονική περίοδο 23 ετών	504	178,56	136,8	135,36	133,92
Μέσο Κόστος φωτισμού (€/h)	0,504	0,17856	0,1368	0,13536	0,13392
Κατάταξη με βάση το κόστος	5ος	4ος	3ος	2ος	1ος

Πίνακας 3-5: Κόστος φωτισμού ανά τύπο συστήματος φωτισμού [39]

Από τον πίνακα αυτό προκύπτει ότι οικονομικότεροι είναι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, ακολουθούμενοι από τους λαμπτήρες φωτισμού και εν συνεχεία από τα συστήματα φωτισμού LED. Οι διαφορές του κόστους που προκύπτει από την χρήση αυτών των τύπων λαμπτήρων είναι εξαιρετικά μικρή, ενώ εντύπωση προκαλεί το μεγάλο κόστος λειτουργίας το οποίο έχουν οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού. Το αρχικό κόστος εξοπλισμού τη στιγμή συγγραφής της παρούσας εργασίας έχει μειωθεί αισθητά σε σχέση με τις τιμές οι οποίες αναφέρθηκαν στο παράδειγμα αυτό, αλλά η μείωση αυτή ισχύει τόσο για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής όσο και για τα συστήματα φωτισμού LED και το αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής δεν αλλοιώνεται σημαντικά. Επομένως το συγκριτικό πλεονέκτημα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής και των συστημάτων φωτισμού LED έχει αυξηθεί σε σχέση με τους υπόλοιπους εξεταζόμενους τύπους λαμπτήρων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, ενώ είναι οικονομικότεροι μακροπρόθεσμα σε σύγκριση με του υπόλοιπους εξεταζόμενους τύπους λαμπτήρων, έχουν το μεγαλύτερο αρχικό κόστος αγοράς με αποτέλεσμα να είναι πιο διαδεδομένοι σε ισχυρές οικονομικά χώρες, ενώ το υψηλό αρχικό κόστος τους αποτελεί αρνητικό παράγοντα ειδικά τη δεδομένη χρονική στιγμή σε χώρες που διανύουν περίοδο οικονομικής κρίσης καθώς οι καταναλωτές δεν είναι πρόθυμοι να προβούν σε μια επένδυση η οποία μακροπρόθεσμα θα τους εξοικονομήσει χρήματα αλλά έχει υψηλό αρχικό κόστος.

Στο παράδειγμα που εξετάστηκε έγινε η θεώρηση ότι οι λαμπτήρες λειτουργούν με βάση τις επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά τα οποία δίδουν οι κατασκευαστές τους σε ιδεατές συνθήκες. Ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει το γεγονός ότι τα συστήματα φωτισμού LED έχουν βέλτιστη απόδοση φωτεινής ροής σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ το αρχικό κόστος αγοράς των συστημάτων φωτισμού LED είναι επίσης αρκετά υψηλό. Εκτός αυτού το προηγούμενο παράδειγμα ήταν βασισμένο στην απόδοση φωτεινής ροής των λαμπτήρων όπως αυτή μετράται από εργαστηριακά όργανα και όχι το ανθρώπινο μάτι, επομένως δεν συνυπολογίστηκε η μεσοπική λαμπρότητα και ο δείκτης S/P. Επομένως, παρουσιάζει ενδιαφέρον η σύγκριση του κόστους φωτισμού των συστημάτων φωτισμού LED με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής με βάση και αυτές τις παραμέτρους.

Για το λόγο αυτό θα αξίζει να αναφερθεί εδώ ένα παράδειγμα, το οποίο συναντήθηκε στη βιβλιογραφία [45], και στο οποίο συγκρίνονται δυο συστήματα φωτισμού

εξωτερικών χώρων, τα οποία βασίζονται σε LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αντίστοιχα, με ισχύ 100 Watt.

Σύγκριση Ενεργειακής Απόδοσης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής		
Τύπος Συστήματος Φωτισμού	100W LED	Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 100W
Μοντέλο	XGB49	GTF-GCL-100
Ονομαστική Ισχύς (Watts)	100 W	100 W
Ισχύς Ballast (Watts)	18 W	3 W
Συνολική Πραγματική Ισχύς (Watts)	118 W	103 W
Απόδοση Λαμπτήρα (Lm/W)	71,4 Lm/W	78 Lm/W
Φωτεινή ροή (lumens)	7.140 Lumen	7.800 Lumen
Απόδοση Συστήματος	55 Lm/W	75,7 Lm/W
Πραγματική φωτεινή ροή συστήματος (lumens)	6.490 Lumen	7.797 Lumen
Colour Rendering Index (CRI)	75	82
Θερμοκρασία χρώματος (Kelvin)	6.500 K	6.500 K
Συντελεστής S/P	2,25	2,25
Έξοδος συστήματος σε VEL	14.602 VEL	17.543 VEL
Διαφορά παραγόμενου φωτός	0% (βάση)	17%
Εξοικονόμηση ενέργειας (Watts / %)	0W / 0% (βάση)	15W / 12.7 %
Ενεργειακό κόστος ανά 100 ώρες λειτουργίας	0,8496 €	0,7416 €
Ενεργειακό Κόστος ανά έτος	74,4 €	65 €

*Πίνακας 3-6: Σύγκριση Ενεργειακής Απόδοσης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής [45]*

Από τον πίνακα προκύπτει ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής έχουν χαμηλότερο ενεργειακό κόστος ενώ παρουσιάζουν και μεγαλύτερη απόδοση μεσοπικής λαμπρότητας. Το σύστημα φωτισμού το οποίο χρησιμοποιεί λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής παράγει 17% περισσότερο (αντιλαμβανόμενο από το ανθρώπινο μάτι) ορατό φως καταναλώνοντας 12,7% λιγότερη ενέργεια. Εάν μάλιστα επιλέξουμε λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής μικρότερος ισχύος έτσι ώστε να εξισορροπήσουμε την αποδιδόμενη μεσοπική λαμπρότητα, η διαφορά στο ενεργειακό κόστος αυξάνεται σημαντικά. [45]

Σύγκριση Ενεργειακής Απόδοσης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής		
Τύπος Συστήματος Φωτισμού	100W LED	Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 80W
Μοντέλο	XGB49	GTF-GCL-80
Ονομαστική Ισχύς (Watts)	100 W	80 W
Ισχύς Ballast (Watts)	18 W	2 W
Συνολική Πραγματική Ισχύς (Watts)	118 W	82 W
Απόδοση Λαμπτήρα (Lm/W)	71,4 Lm/W	77,5 Lm/W
Φωτεινή ροή (lumens)	7.140 Lumen	8.250 Lumen
Απόδοση Συστήματος	55 Lm/W	75,6 Lm/W
Πραγματική φωτεινή ροή συστήματος (lumens)	6.490 Lumen	6.199 Lumen
Colour Rendering Index (CRI)	75	82
Θερμοκρασία χρώματος (Kelvin)	6.500 K	6.500 K
Συντελεστής S/P	2,25	2,25
Έξοδος συστήματος σε VEL	14.602 VEL	13.948 VEL
Διαφορά παραγόμενου φωτός	0% (βάση)	-4,5%
Εξοικονόμηση ενέργειας (Watts / %)	0W / 0% (βάση)	36W / 30,5 %
Ενεργειακό κόστος ανά 100 ώρες λειτουργίας	0,8496 €	0,59 €
Ενεργειακό Κόστος ανά έτος	74,4 €	51,7 €

*Πίνακας 3-7: Σύγκριση Ενεργειακής Απόδοσης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής για ίδια Lumen [45]*

Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιώντας λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής 80 Watt, ο λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής παράγει 4,5% λιγότερο φως καταναλώνει 30,5% λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με το σύστημα φωτισμού LED.

Για να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος το οποίο προκύπτει από την χρήση του εκάστοτε συστήματος φωτισμού θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος αγοράς και αντικατάστασης του εκάστοτε συστήματος καθώς και η διάρκεια ζωής του. Οι τιμές αυτές παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα: [45]

Σύγκριση Κόστους συντήρησης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής		
Τύπος Συστήματος Φωτισμού	100W LED	Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 100W
Μοντέλο	XGB49	GTF-GCL-100
Ονομαστική Ισχύς (Watts)	100 W	100 W
Χρόνος ζωής κατασκευαστή (ώρες)	55.000 ώρες	95.000 ώρες
Χρόνος ζωής πριν την αντικατάσταση (απόδοση Lumen στο 70% της ονομαστικής - ώρες)	50.000 ώρες	85.000 ώρες
Περίοδος ανάλυσης κόστους	8 έτη (70.080 ώρες σε συνεχή λειτουργία)	
Αριθμός νέων λαμπτήρων που θα απαιτηθούν για την εξεταζόμενη περίοδο λειτουργίας	1	0
Απαιτούμενο κόστος για αντικατάσταση συστήματος LED	691,10 €	-
Απαιτούμενο κόστος για αντικατάσταση λαμπτήρα μαγνητικής επαγωγής	-	122,36 €
Κόστος εργασίας αντικατάστασης	21,6 €	0 €
Συνολικό κόστος συντήρησης για περίοδο 8 ετών	712,7 €	0 €

*Πίνακας 3-8: Σύγκριση Κόστους συντήρησης – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής [45]*

Συνυπολογίζοντας όλα τα ανωτέρω στοιχεία είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος φωτισμού το οποίο προκύπτει από την χρήση των συγκρινόμενων συστημάτων φωτισμού. Ο υπολογισμός του κόστους αυτού περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα: [45]

Σύγκριση συνολικού κόστους – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής			
Τύπος Συστήματος Φωτισμού	100W LED	Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 100W	Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 80W
Μοντέλο	XGB49	GTF-GCL-100	GTF-GCL-80
Ονομαστική Ισχύς (Watts)	100 W	100 W	80 W
Χρόνος ζωής κατασκευαστή (ώρες)	55.000 ώρες	95.000 ώρες	95.000 ώρες
Περίοδος ανάλυσης συνολικού κόστους	8 έτη (70.080 ώρες σε συνεχή λειτουργία)		
Απόδοση Λαμπτήρα			
Απόδοση Συστήματος	55 Lm/W	75,7 Lm/W	75,6 Lm/W
Πραγματική φωτεινή ροή συστήματος (lumens)	6.490 Lumen	7.797 Lumen	6.199 Lumen
Colour Rendering Index (CRI)	75	82	82
Συντελεστής S/P	2,25	2,25	2,25
Έξοδος συστήματος σε VEL	14.602 VEL	17.543 VEL	13.948 VEL
Διαφορά παραγόμενου φωτός	0% (βάση)	17%	-4,5%
Κατανάλωση ενέργειας και ενεργειακό κόστος			
Συνολική Πραγματική Ισχύς (Watts)	118 W	103 W	82 W
Κατανάλωση ενέργειας (kWh)	0,118 kWh	0,103 kWh	0,082 kWh

Απαιτούμενη ενέργεια για λειτουργία 8 ετών (70.080 ώρες σε συνεχή λειτουργία)	8.269,44 kWh	7.218,24 kWh	5.746,56 kWh
Κόστος απαιτούμενης ενέργειας για λειτουργία 8 ετών (τιμή 0,072 € / kWh)	595,4 €	519,71 €	413,75 €
Εξοικονόμηση ενέργειας (Watts / %)	0W / 0% (βάση)	15W / 12.7 %	36W / 30,5 %
<b>Συνολικό Κόστος Φωτισμού</b>			
Αρχικό Κόστος εξοπλισμού	691,11 €	279,95 €	257 €
Κόστος εγκατάστασης	21,6 €	21,6 €	21,6 €
Κόστος συντήρησης για περίοδο 8 ετών	691,11 €	0 €	0 €
Ενεργειακό κόστος για περίοδο 8 ετών	595,4 €	519,71 €	413,75 €
Συνολικό Κόστος Φωτισμού για περίοδο 8 ετών	1.286,51 €	721,27 €	598,79 €

*Πίνακας 3-9: Σύγκριση συνολικού κόστους – LED και λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής [45]*

Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από την ανωτέρω μελέτη περίπτωσης είναι ότι τη δεδομένη χρονική στιγμή οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αποτελούν το σύστημα φωτισμού με το μικρότερο συνολικό κόστος για τον φωτισμό ενός χώρου. Το αρχικό κόστος εξοπλισμού τη στιγμή συγγραφής της παρούσας εργασίας έχει μειωθεί αισθητά σε σχέση με τις τιμές οι οποίες αναφέρθηκαν στο παράδειγμα αυτό, αλλά η μείωση αυτή ισχύει τόσο για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής όσο και για τα συστήματα φωτισμού LED, με μεγαλύτερη μείωση τιμών να έχουν υποστεί τα συστήματα φωτισμού LED, και το αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής με βάση τις τιμές της αγοράς κατά τον χρόνο συγγραφής της διπλωματικής εργασίας αποδίδει μικρότερο κόστος φωτισμού για τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, αλλά με τη



διαφορά να είναι πολύ μικρή. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής, όπως έχει προαναφερθεί, έχουν καλύτερη απόδοση μεσοπικής λαμπρότητας και η απόδοσή τους επηρεάζεται λιγότερο από τις συνθήκες του περιβάλλοντος σε σχέση με τους λαμπτήρες φθορισμού, επομένως αν συνυπολογίσουμε και αυτές τις παραμέτρους οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η μικρή διαφορά συνολικού κόστους η οποία παρατηρήθηκε στο γενικό παράδειγμα ανάμεσα σε αυτούς τους τύπους λαμπτήρων θα πρέπει να αυξηθεί, καθιστώντας τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής αρκετά οικονομικότερους.

### ***3.7 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις***

Με την πάροδο του χρόνου, οι καταναλωτές αλλά και οι επιχειρήσεις αποκτούν όλο και μεγαλύτερη οικολογική συνείδηση και προσπαθούν να εφαρμόζουν φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες, καθώς το φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης και της κλιματικής αλλαγής έχουν ευαισθητοποιήσει περιβαλλοντικά την παγκόσμια συνείδηση.

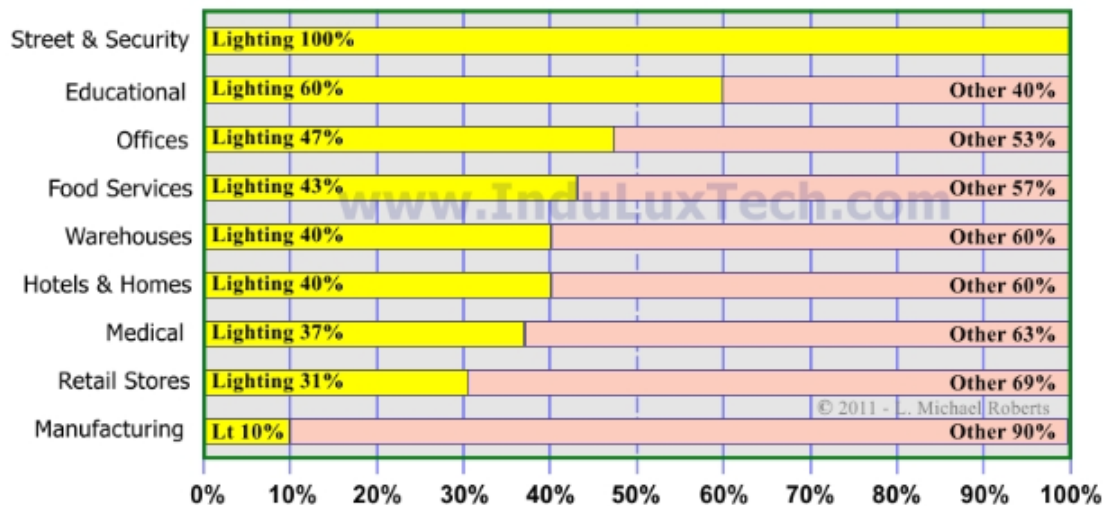
Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τις οποίες μπορεί να επιφέρει η επιλογή ενός συστήματος φωτισμού σε σύγκριση με τις εναλλακτικές προς αυτό διαθέσιμες τεχνολογίες μπορούν κατηγοριοποιηθούν στους τομείς της κατανάλωσης ενέργειας, με έμμεσο αποτέλεσμα την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα η οποία είναι απαραίτητη για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας, η χρήση υδραργύρου και η χρήση πρώτων υλών για την κατασκευή του συστήματος φωτισμού και η δυνατότητα ανακύκλωσης αυτών.

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας [11] [8] [47] [45] [7] [25] [9] [12] και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναλύονται παρακάτω οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης ενός συστήματος φωτισμού.

#### ***3.7.1 Εξοικονόμηση ενέργειας – Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>***

Η συνολική ποσότητα ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται για φωτισμό αποτελεί το 13-15% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας παγκοσμίως. Είναι χαρακτηριστικό ότι για την Ευρώπη και την Αμερική η ενέργεια η οποία καταναλώνεται για τον φωτισμό χώρων σε εγκαταστάσεις αποτελεί το 47% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας των εγκαταστάσεων αυτών, ενώ για τον τομέα της βαριάς βιομηχανίας το ποσοστό αυτό ανέρχεται σε 10%. [47]

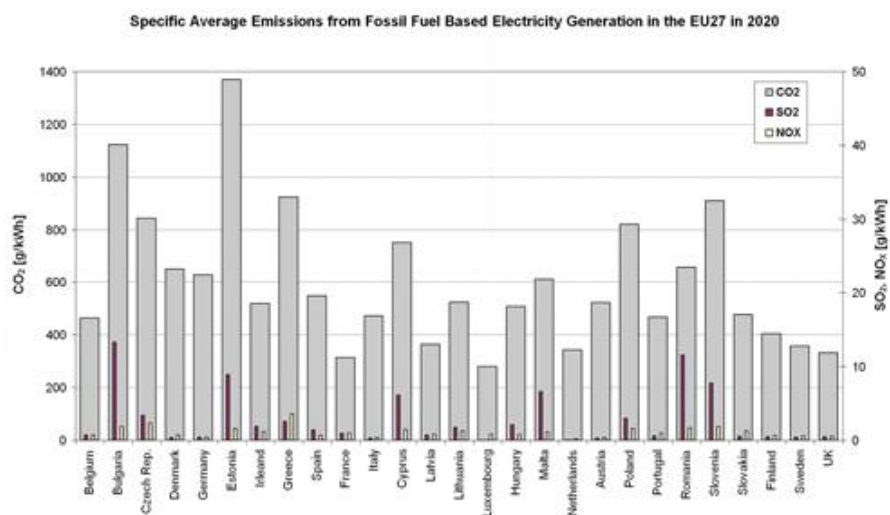
### Lighting Vs. Other Energy Consumption by Sector



Εικόνα 3-9: Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα [47]

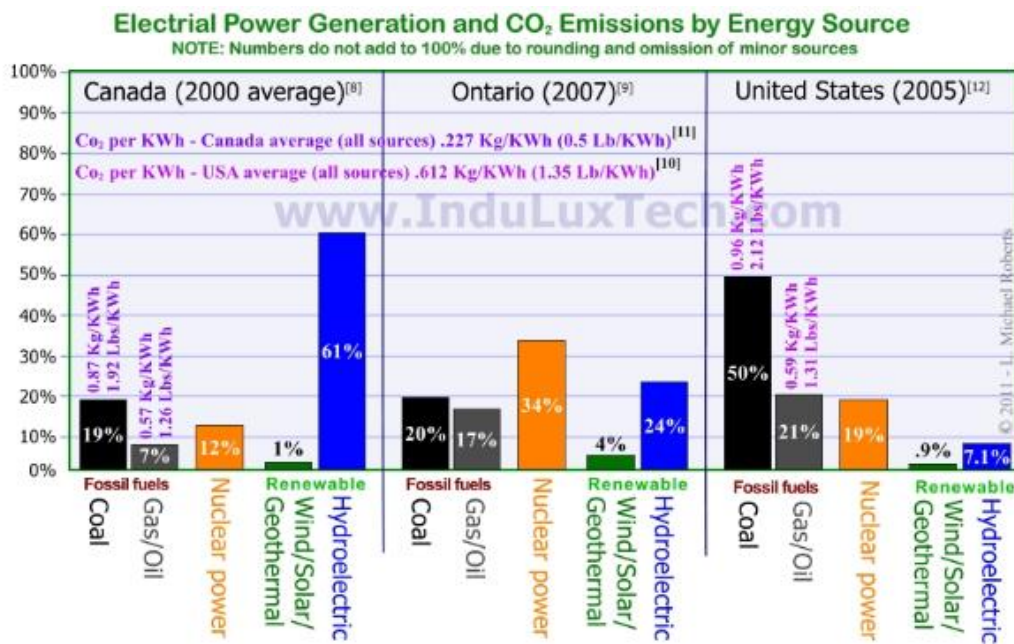
Το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως προέρχεται από την χρήση ορυκτών καυσίμων, κυρίως άνθρακα και φυσικού αερίου, με αποτέλεσμα να απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον και συντελούν στην διόγκωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορες χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα: [48]



Εικόνα 3-10: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορες χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης [48]

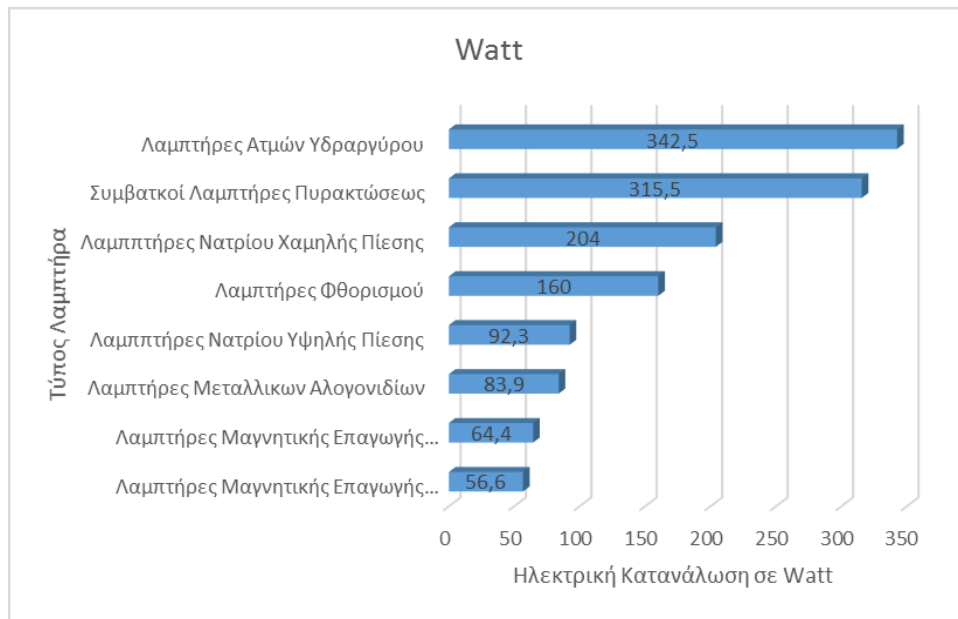
Οι αντίστοιχες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τις ΗΠΑ και τον Καναδά προκύπτουν από το παρακάτω διάγραμμα: [47]



Εικόνα 3-11: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για ΗΠΑ και Καναδά [47]

Είναι επομένως εμφανές ότι η μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για τον φωτισμό χώρων δημιουργεί θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς έμμεσα συνεισφέρει στην μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες προκαλούνται από την παραγωγή ενέργειας.

Για την σύγκριση των εξεταζόμενων τύπων συστημάτων φωτισμού ως προς τις έμμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα τις οποίες προκαλούν θα πρέπει να εξεταστεί η ενέργεια την οποία καταναλώνει το εκάστοτε σύστημα για την φωταγωγή ενός χώρου. Από την ένταση φωτεινής ροής την οποία παράγουν τα συστήματα φωτισμού, λαμβάνοντας υπόψιν και τον συντελεστή S/P, προκύπτει το παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα το οποίο εξετάζει την ενέργεια την οποία καταναλώνουν οι διάφοροι τύποι λαμπτήρων για την παραγωγή 1000 Lumens: [11] [8] [47] [45] [7] [25] [9] [12]



Εικόνα 3-12 Ηλεκτρική κατανάλωση διαφόρων τύπων λαμπτήρων

Για να γίνει περαιτέρω κατανοητή η έμμεση επίπτωση την οποία έχει η επιλογή του τύπου λαμπτήρα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εξετάζεται στον παρακάτω πίνακα, ως παράδειγμα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες προκύπτουν από τη χρήση δυο διαφορετικών τύπων λαμπτήρα. [47]

Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO <sub>2</sub>		
Τύπος λαμπτήρα	Λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων	Λαμπτήρας μαγνητικής επαγωγής 120 W
Μοντέλο λαμπτήρα	M250	120R
Συνολική ισχύς	275 W	122,4 W
Απόδοση	61,8 Lm/W	80 Lm/W
Συντελεστής S/P	1,49	2,22
VEL	23.020 lumens	21.600 lumens
Εξοικονόμηση ενέργειας	0 W – 0% (βάση αναφοράς)	152,6 W – 55,5%
Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά 100 ώρες λειτουργίας	11,83 Kg	5,26 Kg
Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά έτος για συνεχή λειτουργία	1.035,9 Kg	461,1 Kg
Οι εκπομπές CO <sub>2</sub> υπολογίσθηκαν με βάση μια μέση τιμή 0,43 Kg/kWh		

Πίνακας 3-10: Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO<sub>2</sub> [47]

Όπως προκύπτει οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, και επομένως προκαλούν έμμεσα εκπομπή μικρότερης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα, με τους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων να ακολουθούν. Τα συστήματα φωτισμού LED τα οποία δεν περιλαμβάνονται στο ανωτέρω διάγραμμα, ποικίλουν ως προς την κατανάλωση ενέργειας την οποία θα έχουν για την παραγωγή 1000 Lumens, καθώς ανάλογα με την υλοποίηση του κατασκευαστή η απόδοσή τους ποικίλει, με τα αποδοτικότερα συστήματα φωτισμού LED να έχουν ελαφρώς υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος σε σχέση με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και να προκαλούν την εκπομπή ελαφρώς μεγαλύτερης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα.

### **3.7.2 Χρήση Υδραργύρου**

Ο υδράργυρος είναι μια τοξική και μη διασπώμενη ουσία η οποία χρησιμοποιείται από την πλειονότητα των τύπων φωτιστικών συστημάτων σήμερα. Είναι χαρακτηριστικό ότι η ποσότητα υδραργύρου η οποία περιέχεται σε έναν συνηθισμένο λαμπτήρα φθορισμού, η οποία είναι περίπου 20 mg, είναι δυνατό να μολύνει και να καταστήσει μη πόσιμα 20.000 λίτρα νερού.

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και τα συστήματα φωτισμού LED δεν χρησιμοποιούν υδράργυρο για τη λειτουργία τους, καθιστώντας τα ακίνδυνα ως προς αυτό τον τομέα, ενώ τα υπόλοιπα εξεταζόμενα συστήματα φωτισμού στηρίζουν τη λειτουργία της στη χρήση υδραργύρου. Κατά την αξιολόγηση των λαμπτήρων ως προς την επιβάρυνση που επιφέρουν στο περιβάλλον με τη χρήση υδραργύρου θα πρέπει να εξεταστεί ο τύπος υδραργύρου (σε στερεά ή υγρή μορφή) που χρησιμοποιείται η ποσότητα υδραργύρου που απαιτείται για τη λειτουργία του λαμπτήρα και ο χρόνος ζωής του λαμπτήρα ο οποίος μεταβάλλει την ποσότητα υδραργύρου που χρησιμοποιείται ανά ώρα λειτουργίας του λαμπτήρα.

Το μεγαλύτερο κίνδυνο για το περιβάλλον αποτελεί ο υδράργυρος σε υγρή μορφή, ο οποίος περικλείεται στους λαμπτήρες φθορισμού. Η μορφή αυτή υδραργύρου σε περίπτωση θραύσης του λαμπτήρα και απελευθέρωσης του υδραργύρου είναι να δυνατόν να μολύνει τοξικά το χώρο απελευθέρωσής του σε βαθμό που να απαιτείται αποκλεισμός του χώρου για ένα χρονικό διάστημα το οποίο εξαρτάται από την ποσότητα του υδραργύρου που απελευθερώθηκε στο περιβάλλον.

Ενδεικτικές τιμές ποσότητας υδραργύρου που περιέχουν οι εκάστοτε τύποι λαμπτήρων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα: [47]

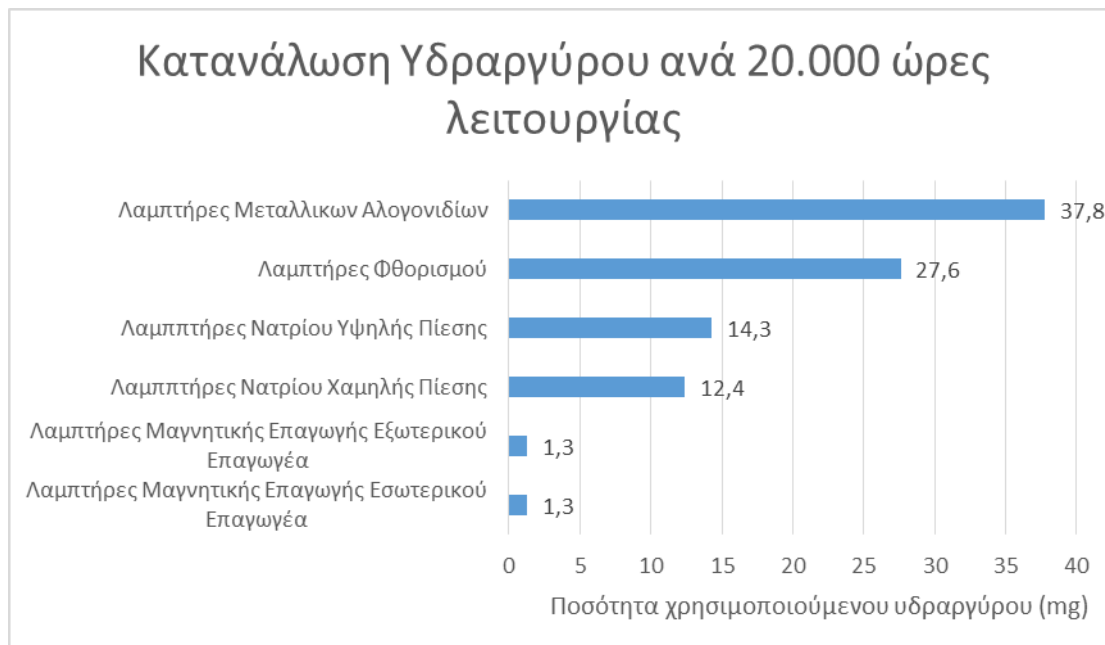
Χρήση υδραργύρου εμπορικά διαθέσιμων λαμπτήρων					
Τύπος Λαμπτήρα	Λαμπτήρας Νατρίου Χαμηλής Πίεσης (SOX)	Λαμπτήρας Νατρίου Υψηλής Πίεσης (HPS)	Λαμπτήρας Μεταλλικών Αλογονιδίων	Λαμπτήρας Φθορισμού 48"	Λαμπτήρας Μαγνητικής Επαγωγής
Μέση Κατανάλωση Υδραργύρου (mg)	GE LPS: 6-8	Osram HPS: 13-20	GE: 11-30	Sylvania : 40-43	6,4 mg
	Phillips LPS:12-16	Sylvania HPS: 12-15	Phillips: 12-15	Phillips low Hg: 10-12	
Κατανάλωση Υδραργύρου σε 20.000 ώρες λειτουργίας	12,4 mg Hg	14,3 mg Hg	37,8 mg Hg	27,6 mg Hg	1,3 mg Hg
<p>Η μέση κατανάλωση προκύπτει από την ποσότητα υδραργύρου που περιέχεται στον λαμπτήρα και τη μέση διάρκεια ζωής. Τα ανωτέρω νούμερα προκύπτουν από τις προδιαγραφές των κατασκευαστών</p>					

*Πίνακας 3-11: Χρήση υδραργύρου εμπορικά διαθέσιμων λαμπτήρων [47]*

Οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής και χαμηλής πίεσης, οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού και οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής χρησιμοποιούν υδράργυρο σε στερεά μορφή ο οποίος προσμιγνύεται με άλλα μεταλλικά στοιχεία, δημιουργώντας ένα μείγμα το οποίο ονομάζουμε αμάγαμα. Η στερεά αυτή μορφή υδραργύρου αποτελεί μικρότερο περιβαλλοντικό κίνδυνο, καθώς έπειτα από την θραύση ενός λαμπτήρα είναι δυνατό να τη μαζέψουμε με τη χρήση γαντιών και να τη διαχειριστούμε κατάλληλα χωρίς να υπάρξει ανάγκη αποκλεισμού του χώρου. Επίσης κατά τη διαδικασία ανακύκλωσης, το αμάγαμα είναι δυνατό να αφαιρεθεί από τον λαμπτήρα με σκοπό να ανακυκλωθούν τα υπόλοιπα υλικά. Η ποσότητα υδραργύρου στον εκάστοτε λαμπτήρα ανάλογα με τον τύπο του λαμπτήρα αλλά και τον κατασκευαστή του.

Όπως είναι εμφανές από τον πίνακα 3-11 ο τύπος λαμπτήρα ο οποίος φιλικότερος προς το περιβάλλον ως προς τη χρήση υδραργύρου είναι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής καθώς διαθέτουν την μικρότερη ποσότητα υδραργύρου αλλά και τη

χαμηλότερη χρήση υδραργύρου ανά ώρα λειτουργίας. Στο παρακάτω διάγραμμα παρατίθεται η κατανάλωση υδραργύρου ανά 20.000 ώρες λειτουργίας για τους εξεταζόμενους τύπους λαμπτήρων με βάση τα όσα προκύπτουν από τη μελέτη της βιβλιογραφίας: [11] [8] [47] [45] [7] [25] [9] [12]



Εικόνα 3-13: Κατανάλωση Υδραργύρου ανά 20.000 ώρες λειτουργίας

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα φωτισμού LED κάνουν χρήση μολύβδου και αρσενικού κατά την κατασκευή των ημιαγωγών οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία τους, αλλά οι τελικές ποσότητες των στοιχείων αυτών που περιλαμβάνονται στα συστήματα φωτισμού LED είναι ελάχιστες και δεν αποτελούν περιβαλλοντικό κίνδυνο.

### 3.7.3 Ανακύκλωση

Από πλευράς χρήσης πρώτων υλών μπορεί να θεωρηθεί ότι οι λαμπτήρες με μεγαλύτερο χρόνο ζωής είναι φιλικότεροι προς το περιβάλλον λόγω της απαίτησης μικρότερης ποσότητας πρώτων υλών για τον φωτισμό ενός χώρου για μια μεγάλη χρονική περίοδο καθώς θα χρειαστεί λιγότερες φορές να αντικατασταθεί ο λαμπτήρας. Με βάση αυτό την μικρότερη απαίτηση πρώτων υλών για τον φωτισμό ενός χώρου για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα έχουν οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής οι οποίοι όπως εξετάστηκε προηγουμένως έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Όσον αφορά τη δυνατότητα ανακύκλωσης των χρησιμοποιημένων συστημάτων φωτισμού, μειονέκτημα εμφανίζουν τα συστήματα φωτισμού LED τα οποία

περιέχουν μεγάλες ποσότητες πλαστικού το οποίο ανακυκλώνεται πιο δύσκολα συγκριτικά με το γυαλί και το μέταλλο από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι υπόλοιποι εξεταζόμενοι λαμπτήρες. Επίσης μειονέκτημα ως προς την ανακύκλωσή τους εμφανίζουν και οι λαμπτήρες φθορισμού οι οποίοι περιέχουν υδράργυρο σε υγρή μορφή ο οποίος είναι δύσκολο να αφαιρεθεί για να καταστεί δυνατή η ανακύκλωση των υπολοίπων πρώτων υλών. Οι λοιποί εξεταζόμενοι τύποι λαμπτήρων είναι εύκολο να ανακυκλωθούν, καθώς το αμάγαμα μπορεί να αφαιρεθεί και το γυαλί και το μέταλλο από τα οποία είναι κατασκευασμένοι αποτελούν ανακυκλώσιμα υλικά.

### **3.8 Αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος**

Τα περισσότερα είδη λαμπτήρων και συστήματα φωτισμού έχουν σχεδιαστεί για την άριστη λειτουργία τους σε περιβάλλον με θερμοκρασία 25°C. Όπως είναι εμφανές, στην πράξη οι ιδεατές αυτές θερμοκρασιακές συνθήκες σπάνια συναντώνται, και οι θερμοκρασίες στις οποίες είναι δυνατόν να λειτουργήσει και να είναι αποδοτικό ένα σύστημα φωτισμού είναι μια βασική παράμετρος επιλογής του κατάλληλου συστήματος φωτισμού, ειδικότερα σε συστήματα φωτισμού εξωτερικών χώρων οι οποίοι είναι πιθανόν να είναι εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες. Ανάλογα με την τεχνολογία την οποία χρησιμοποιούν κάποιοι λαμπτήρες είναι πιθανό να αποδίδουν καλύτερα σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ άλλοι τύποι λαμπτήρων να εμφανίζουν αυτό το πλεονέκτημα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης, με εξαίρεση τους λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι δεν διαθέτουν ηλεκτρονικά κυκλώματα, σε υψηλές θερμοκρασίες υπάρχει το ενδεχόμενο ο λαμπτήρας να λειτουργεί ικανοποιητικά αλλά να παρουσιαστεί πρόβλημα με το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου, το ballast, και για αυτό το λόγο γίνεται συχνά χρήση ειδικών θηκών στέγασης των ballast με σκοπό την απαγωγή θερμότητας. Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας [40] [8] [25] [11] [14] [19] και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναλύεται παρακάτω η αντοχή των εξεταζόμενων τύπων λαμπτήρων σε ακραίες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος.

#### Λαμπτήρες Πυρακτώσεως

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως αποτελούν το παλαιότερο σύστημα φωτισμού και παρουσιάζουν την μικρότερη



ενεργειακή απόδοση καθώς και το μικρότερο χρόνο ζωής από τις συγκρινόμενες τεχνολογίες, αλλά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες.

Σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες δεν παρατηρείται μείωση στην απόδοση των λαμπτήρων πυρακτώσεως και η λειτουργία τους εκκινείται ακαριαία χωρίς τη μεσολάβηση διαστήματος προθέρμανσης. Το μοναδικό μειονέκτημα σε αυτές τις θερμοκρασίες είναι η πιθανότητα το γυαλί της λυχνίας να καταστεί πιο εύθραυστο και εύάλωτο σε δονήσεις.

Σε υψηλές θερμοκρασίες η αντοχή των λαμπτήρων πυρακτώσεως περιορίζεται από τη θερμότητα την οποία μπορεί να αντέξει η βάση της λυχνίας. Σε θερμοκρασίες έως 65 °C η απόδοση των λαμπτήρων αυτών δεν επηρεάζεται, ενώ θεωρητικά η απόδοση των λαμπτήρων θα πρέπει να μένει αναλλοίωτη σε θερμοκρασίες έως 300 °C.

#### Λαμπτήρες Φθορισμού

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι λαμπτήρες φθορισμού αποτελούν το μοναδικό σύστημα φωτισμού του οποίου η απόδοση σε Lumen επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και παρατηρείται μείωση της απόδοσης αυτής όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος παρεκκλίνει από την τιμή για την οποία οι λαμπτήρες αυτοί έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν. Οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-5 έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος 35 °C ενώ οι λαμπτήρες φθορισμού τύπου T-8 έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος 25 °C. Οι κατασκευαστές λαμπτήρων φθορισμού μάλιστα δημοσιεύουν στοιχεία για τα προϊόντα τους τα οποία δείχνουν την απόδοσή τους σε Lumen για διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της παραγωγής θερμότητας από το ballast, συνήθως οι πραγματικές θερμοκρασίες λειτουργίας είναι υψηλότερες από τις εκάστοτε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Επίσης παρά το γεγονός ότι οι λαμπτήρες φθορισμού εκκινούν κανονικά σε θερμά περιβάλλοντα, σε ψυχρό εξωτερικό περιβάλλον είναι σύνηθες το φαινόμενο να αδυνατούν να εκκινήσουν λόγω αυξημένων αναγκών ενέργειας εκκίνησης. Για αυτό το λόγο κάποιοι κατασκευαστές λαμπτήρων φθορισμού παρέχουν ειδικά ballast για εκκίνηση σε θερμοκρασίες έως -29 °C.

#### Λαμπτήρες Μαγνητικής Επαγωγής

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής

αν και χρησιμοποιούν σε αρκετά σημεία την ίδια τεχνολογία με τους λαμπτήρες φθορισμού, δεν αντιμετωπίζουν τα ίδια προβλήματα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι λαμπτήρες αυτοί μπορούν να λειτουργήσουν σε κατώτερες θερμοκρασίες από  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ανάλογα με τον κατασκευαστή, ενώ παράλληλα ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  διατηρούν το 85% της απόδοσης τους σε Lumen σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού. Η αντοχή σε αυτές τις ακραίες θερμοκρασίες οφείλεται στον σχεδιασμό και την τοποθέτηση του πηνίου στους λαμπτήρες.

Όσον αφορά τις υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής περιορίζονται από την αντοχή των γεννητριών υψηλών συχνοτήτων και μπορούν να λειτουργήσουν κανονικά σε θερμοκρασίες έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η λειτουργία τους σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  αν και είναι εφικτή, φέρει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του χρόνου ζωής τους και κατά συνέπεια χαμηλού συνολικού κόστους το οποίο τους χαρακτηρίζει.

#### Λαμπτήρες Νατρίου Υψηλής Πίεσης

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης (HPS) εκκινούν κανονικά σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ενώ εφόσον τεθούν σε λειτουργία παράγουν αρκετή θερμότητα για την απρόσκοπτη λειτουργία τους και σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης διαφέρουν ανάλογα με την ισχύ την οποία χρησιμοποιεί το σύστημα φωτισμού. Συστήματα τα οποία καταναλώνουν χαμηλή ισχύ (Watt) μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ενώ συστήματα τα οποία καταναλώνουν μεγάλη ισχύ έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Σημαντική παράμετρος για την αντοχή των λαμπτήρων αυτών σε υψηλές θερμοκρασίες αποτελεί το γεγονός ότι το κύκλωμα ελέγχου, το ballast, δεν μπορεί να απέχει μεγάλη απόσταση από τον λαμπτήρα, καθώς πρέπει να είναι τοποθετημένο σε απόσταση μικρότερη του ενός μέτρου, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες να αυξάνονται. Αξιοσημείωτο πάντως είναι το γεγονός ότι οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης δεν παρουσιάζουν μεταβολή στην απόδοσή τους με την μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, καθώς παράγουν το ίδιο φως σε μετρήσεις με θερμοκρασίες περιβάλλοντος  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

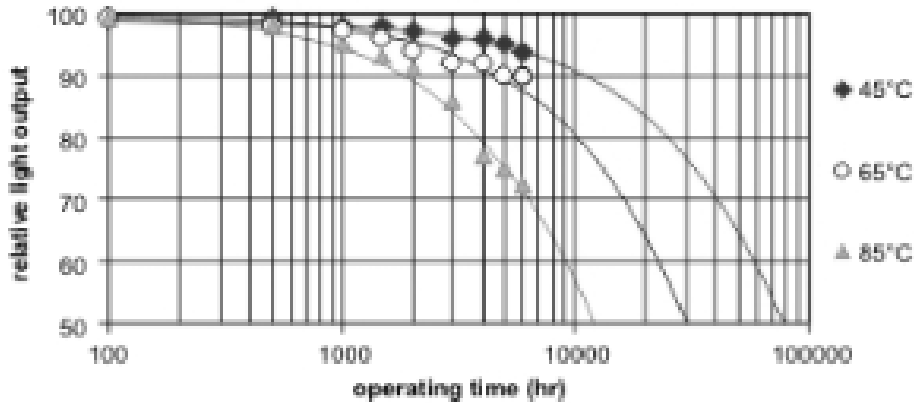
#### Λαμπτήρες Μεταλλικών Αλογονιδίων

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας, οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων έχουν τη δυνατότητα να εκκινήσουν αξιόπιστα σε χαμηλές θερμοκρασίες έως  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , χωρίς να παρουσιάζουν μεταβολή στην απόδοσή τους. Επίσης, εφόσον τεθούν σε λειτουργία παράγουν αρκετή θερμότητα για την απρόσκοπτη λειτουργία τους και σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ο περιορισμός στον οποίο υπόκεινται οι λαμπτήρες αυτοί είναι ότι απαιτούν αρκετό χρόνο για την επανεκκίνησή τους, ο οποίος μπορεί να φθάσει έως 15 λεπτά, καθώς είναι απαραίτητο να ψυχρανθούν πριν επανεκκινήσουν.

Όσον αφορά τις ακραίες υψηλές θερμοκρασίες οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων ακολουθούν τους περιορισμούς τους οποίους τους επιβάλλουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου τα οποία χρησιμοποιούν και μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες έως  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Συστήματα φωτισμού LED

Με βάση τη μελέτη της βιβλιογραφίας και όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα συστήματα φωτισμού LED αποδίδουν αποδοτικότερα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αποδίδοντας μάλιστα περισσότερα Lumen/Watt σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες δωματίου. Σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος καθίσταται δύσκολο να διατηρηθεί χαμηλά η θερμοκρασία του κυκλώματος με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης αλλά και του χρόνου ζωής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρότι τα συστήματα φωτισμού LED παράγουν ελάχιστη υπέρυθη ακτινοβολία σε σχέση με τους συμβατικούς λαμπτήρες, η ισχύς η οποία καταναλώνεται μετατρέπεται σε θερμότητα σε ποσοστό 60-90% λόγω της λειτουργίας του κυκλώματος. Τα συστήματα φωτισμού LED είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν σε θερμοκρασίες έως  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  και η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος θα επιφέρει την μείωση του χρόνου ζωής τους ενώ θερμοκρασία περιβάλλοντος πέραν των  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  θα επιφέρει βλάβη του συστήματος. Άλλωστε η διαχείριση της θερμότητας η οποία αναπτύσσεται στο κύκλωμα των συστημάτων φωτισμού LED αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση των σχεδιαστών τους. Η επίδραση της θερμότητας στα κυκλώματα των συστημάτων φωτισμού LED φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα: [40]



Εικόνα 3-14: Επίδραση της θερμότητας στα κυκλώματα των συστημάτων φωτισμού LED [40]

Σε αντίθεση με τις υψηλές θερμοκρασίες, τα συστήματα φωτισμού LED έχουν άριστη λειτουργία σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (-50 °C και κάτω). Το μοναδικό μειονέκτημα παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου η πηγή φωτός εκτεθεί σε χιόνι ή πάγο, καθώς σε αντίθεση με τα υπόλοιπα συστήματα φωτισμού η πηγή φωτός παράγει πολύ μικρή θερμότητα με αποτέλεσμα να αδυνατεί να συνεισφέρει στο λιώσιμο του πάγου και να διατρέχει τον κίνδυνο το παραγόμενο φως να μην είναι ορατό.

#### Συγκριτικός Πίνακας

Σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν, με εξαίρεση τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, τα υπόλοιπα συστήματα φωτισμού αντιμετωπίζουν προβλήματα με τις ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό καθώς οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος σε διάφορες περιοχές του πλανήτη κυμαίνονται από -60 °C έως 50 °C ανά περιόδους. Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι το μοναδικό σύστημα φωτισμού το οποίο αντιμετωπίζει σημαντικό πρόβλημα σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψιν και πιθανά προβλήματα όπως ο κίνδυνος πάγου για τα συστήματα φωτισμού LED. Επίσης όσον αφορά τις ακραίες υψηλές θερμοκρασίες τα περισσότερα συστήματα φωτισμού ακολουθούν τους περιορισμούς τους οποίους τους επιβάλλουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου τα οποία χρησιμοποιούν. Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας ο οποίος περιλαμβάνει τα όρια θερμοκρασιών περιβάλλοντος στα οποία είναι δυνατό να λειτουργήσει το εκάστοτε σύστημα φωτισμού: [40] [8] [25] [11] [14] [19]

Αποδεκτές Θερμοκρασίες Περιβάλλοντος			
Πηγή Φωτισμού	Ελάχιστη Θερμοκρασία Περιβάλλοντος για Εκκίνηση	Ελάχιστη Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	Υψιστη Θερμοκρασία Περιβάλλοντος
Λαμπτήρας Πυρακτώσεως	Κανένα εμφανές όριο	Κανένα εμφανές όριο	Περιορισμός από τα υλικά κατασκευής
LED	-50 °C	-50 °C	30 – 40 °C
Λαμπτήρας Φθορισμού T-5	0 °C έως -20 °C	-20 °C	40 – 65 °C
Λαμπτήρας Φθορισμού T-8	0 °C έως -20 °C	-20 °C	40 – 65 °C
Λαμπτήρας Μαγνητικής Επαγωγής	-40 °C	-40 °C	40 – 65 °C
Λαμπτήρας Μεταλλικών Αλογονιδίων	-35 °C	Κανένα εμφανές όριο	40 – 65 °C
Λαμπτήρας Νατρίου Υψηλής Πίεσης	-40 °C	Κανένα εμφανές όριο	40 – 65 °C

Πίνακας 3-12: Αποδεκτές θερμοκρασίες περιβάλλοντος για κάθε τύπο λαμπτήρα

### 3.9 Συμπεράσματα

Με βάση τα ανωτέρω, καθίσταται σαφές ότι η αξιολόγηση και η επιλογή ενός τύπου λαμπτήρα για τον φωτισμό ενός χώρου εξαρτάται άμεσα από διάφορες παραμέτρους οι οποίες απορρέουν από τον χώρο ο οποίος εξετάζεται.

Με βάση τα γενικά χαρακτηριστικά τους οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και τα συστήματα φωτισμού LED υπερτερούν έναντι των υπολοίπων τύπων λαμπτήρων οι οποίοι εξετάστηκαν τόσο για το φωτισμό εσωτερικών όσο και για το φωτισμό εξωτερικών χώρων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής και των συστημάτων φωτισμού LED είναι το χαμηλό κόστος φωτισμού το οποίο προσφέρουν. Τα δυο αυτά συστήματα φωτισμού παρουσιάζουν σχετικά μικρές

διαφορές ως προς το συνολικό κόστος φωτισμού το οποίο προσφέρουν, διαφορές οι οποίες υπόκεινται και συνεχής μεταβολές καθώς και οι δυο τεχνολογίες εξελίσσονται διαρκώς και οι τιμές και οι αποδόσεις τους είναι τομείς διαρκούς βελτίωσης. Αυτό άλλωστε είναι και αναμενόμενο, καθώς και οι δυο τεχνολογίες σχετικά πρόσφατα απέκτησαν ευρύ καταναλωτικό κοινό. Μια γενική παρατήρηση τη δεδομένη χρονική στιγμή είναι ότι τα συστήματα φωτισμού LED εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος φωτισμού και πλεονεκτούν έναντι των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής σε χαμηλές θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος, αλλά με την απουσία κινδύνου πάγου, όπου εμφανίζουν μεγάλη απόδοση. Αντίθετα σε κανονικές και μεγάλες θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής τη δεδομένη χρονική στιγμή πλεονεκτούν, καθώς τα συστήματα φωτισμού LED εμφανίζουν αποδόσεις οι οποίες απέχουν αισθητά από τις αποδόσεις που δίνουν οι κατασκευαστές τους.

Με δεδομένα τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των λαμπτήρων μαγνητικής επαγωγής και των συστημάτων φωτισμού LED, σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η επιλογή αυτών των τεχνολογιών για οποιονδήποτε λόγο, επί παραδείγματι σε περίπτωση που το υψηλό αρχικό κόστος αγοράς των τεχνολογιών αυτών αποτελεί παράγοντα που καθιστά την επιλογή τους ανέφικτη, οι λαμπτήρες φθορισμού εμφανίζονται να πλεονεκτούν έναντι των υπολοίπων όσον αφορά τον φωτισμό εσωτερικού χώρου καθώς παρουσιάζουν χαμηλότερο κόστος φωτισμού. Αντίθετα όσον αφορά τον φωτισμό εξωτερικού χώρου, πάντα με δεδομένο ότι οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και τα συστήματα φωτισμού LED υπερτερούν και συγκρίνοντας τους υπόλοιπους τύπους λαμπτήρων, οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης αποτελούν την καλύτερη επιλογή. Η επιλογή αυτή γίνεται βάση του συνολικού κόστους φωτισμού, της ποιότητας αποδιδόμενου χρώματος και με δεδομένο ότι οι λαμπτήρες φθορισμού αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα σε θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος και η απόδοση και ο χρόνος ζωής τους μειώνονται αισθητά.

Τέλος οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζουν με την ολική αρμονική παραμόρφωση υπερτερούν μόνο των λαμπτήρων πυρακτώσεως για εσωτερικούς χώρους και είναι πιθανό να προτιμηθούν λόγω του μικτού μεγέθους τους και της σχετικά χαμηλής τιμής τους για να αντικαταστήσουν τους λαμπτήρες πυρακτώσεως σε εσωτερικούς χώρους.

Εν κατακλείδι, τη δεδομένη χρονική στιγμή, οι λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής εμφανίζουν συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση τους υπόλοιπους εξεταζόμενους

τύπους λαμπτήρων λόγω της υψηλής διάρκειας ζωής τους, του καλής ποιότητας φωτισμού τον οποίο παρέχουν και ο οποίος γίνεται αντιληπτός από το ανθρώπινο μάτι, της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης η οποία προκύπτει από την απόδοσή τους, τον συντελεστή ισχύος τους και της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης που παρουσιάζουν και κατά συνέπεια του χαμηλού κόστους φωτισμού τον οποίο προσφέρουν. Τα συστήματα φωτισμού LED συναγωνίζονται τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και σε περιπτώσεις χαμηλών θερμοκρασιών αποκτούν συγκριτικό πλεονέκτημα έναντί τους. Τα υπόλοιπα συστήματα φωτισμού τα οποία εξετάστηκαν παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα σε σχέση με τους λαμπτήρες μαγνητικής επαγωγής και τα συστήματα φωτισμού LED και αποτελούν εναλλακτικές λύσεις οι οποίες καθίστανται προτιμητέες μόνο υπό προϋποθέσεις.

# 4

## *Βιβλιογραφία*

- [1] P. Lutkevich, D. McLean και J. Cheung, FHWA Lighting Handbook, New Jersey: Parsons Brinckerhoff, 2012.
- [2] Δ. Π. Νικολάου, Η Εφαρμογή Των Led Στον Φωτισμό Δρόμων Και Οι Προοπτικές Εξοικονόμησης Ενέργειας, Αθήνα: ΕΜΠ, 2014.
- [3] Θ. Κοδέλλας, Μεταβολη Των Ηλεκτρικων Και Φωτοτεχνικων Μεγεθων Κατα Την Ρυθμιση Της Φωτεινης Ροης Σε Λαμπτηρες Φθορισμου, Αθήνα: ΕΜΠ, 2004.
- [4] Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE, 1995.
- [5] Φ. Τοπαλής, Φωτοτεχνία , Βασικές Αρχές Φωτοτεχνίας και Μελέτες Φωτισμού, Αθήνα: ΕΜΠ, 1994.
- [6] Π. Μπαρτσακουλιας, Μεταβολες Στις Προδιαγραφες Και Τα Οικονομοτεχνικα Στοιχεια Εγκαταστασεων Οδικου Φωτισμου Που Προκυπτουν Απο Την Υιοθετηση Της Μεσοπικης Θεωρησης, Αθήνα: ΕΜΠ, 2006.
- [7] L. M. Roberts, «How magnetic induction lamps work,» Web, 2011.
- [8] «Museum of electric lamp technology,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.lamptech.co.uk/>.
- [9] Ι. Χατζάκης, Οικονομοτεχνική αξιολόγηση της σκοπιμότητας αντικατάστασης των λαμπτήρων πυράκτωσης από συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρονική έναυση, Αθήνα: ΕΜΠ, 2004.
- [10] Λ. Χαραλαμπίδης, Εξοικονόμηση Ενέργειας Στο Φωτισμό Κτιρίων: Πιλοτική Εφαρμογή Σε Εμπορικό Κτίριο, Αθήνα: ΕΜΠ, 2007.
- [11] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki>.
- [12] Ε. Ταξείδης, Εξοικονόμηση Ενέργειας Σε Εγκαταστάσεις Φωτισμού Μεγάλων Χώρων, Αθήνα: ΕΜΠ, 2007.



- [13] Γ. Μπισμπικη, Μελετη Συστηματων Εναυσης Με Ρυθμιζομενη Σταθμη Φωτισμου (electronic Dimmable Ballast), Αθήνα: ΕΜΠ, 2012.
- [14] Ν. Χονδρακης, «Πειραματικη Διερευνηση Του Φαινομενου Της Εναυσης Των Λαμπτηρων Φθορισμου Και Επιδραση Των Παραμετρων Της Στη Διαρκεια Ζωης Τους,» ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.
- [15] «Osram,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://osram.com/> .
- [16] IESNA Illuminating Engineering Society of North America, The IESNA lighting handbook : reference and application, New York: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 2000.
- [17] National Lighting Product Information Program, «Electronic ballasts,» *Specifier Reports*, 2000.
- [18] Σ. Παπαναστασίου, Πολυκριτηριακή Μέθοδος Αξιολόγησης Σεναρίων Εγκαταστάσεων Φωτισμού Στο Νέο Κτίριο Ηλεκτρολόγων Ε. μ. Πολυτεχνείου, Αθήνα: ΕΜΠ, 2014.
- [19] Σ. Γιαγιάννος, Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτιστικού Δρόμων Και Εξωτερικών Χώρων Με Led: εφαρμογή Στις Πλατείες Κέντρου Του Εμπ, Αθήνα: ΕΜΠ, 2013.
- [20] A. E. F. Taylor, Illumination Fundamentals, Rensselaer: Lighting Research Center, 2000.
- [21] Γ. Αμπαρτζής, Φωτισμός Δρόμων Και Εξωτερικών Χώρων Με Led Τροφοδοτούμενα Από Φωτοβολταϊκά Λεπτού Υμενίου, Αθήνα: ΕΜΠ, 2009.
- [22] «Edison Tech Center,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.edisontechcenter.org/>.
- [23] C. DiLouie, «Electrodeless Lighting,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ecmag.com/section/lighting/electrodeless-lighting>.
- [24] L. M. Roberts, «The Science Behind Adattsi Magnetic Induction Lighting,» 2012.
- [25] D. Wharmby, «Electrodeless lamps for lighting: a review.,» *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings*, τόμ. 140, αρ. 6, pp. 465-473, 1993.
- [26] V. A. Godyak, «Bright idea, radio-frequency light sources.,» *Industry Applications Magazine*, pp. 42-49, 2002.
- [27] «A Historical Review of Induction Lighting,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ecmweb.com/lighting-amp-control/historical-review-induction-lighting>.
- [28] J.-D. Mok, S.-B. Jeon και S.-K. Park, «A consideration on the electrodeless

fluorescent lamp and its radio interference characteristics.,» σε *ICT Convergence*, 2011.

- [29] C.-S. Lin και W.-S. Chen, «60 kHz electronic ballast for electrodeless fluorescent lamp,» σε *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2009.
- [30] «Induction lighting and electrodeless lamps,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://inductionlighting.blogspot.gr/>.
- [31] Philips, «Philips QL Induction,» 2007.
- [32] C.-S. Lin, «Low power 60 kHz electrodeless fluorescent lamp for indoor use,» σε *IPEC Conference Proceedings*, 2010.
- [33] N. B. Chagas, M. F. D. Silva, M. E. Schlittler, J. Fraytag, R. N. D. Prado και F. E. Bisogno, «Electrodeless fluorescent lamps model operated at high frequency,» σε *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011.
- [34] J. N. Lester και B. M. Alexandrovich, «Ballasting Electrodeless Fluorescent Lamps,» *Journal of the Illuminating Engineering Society*, pp. 89-99, 2000.
- [35] M. F. da Silva, N. B. Chagas, M. E. Schlittler, J. Fraytag, T. B. Marchesan, F. E. Bisogno, J. Alonso και R. N. d. Prado, «Electric equivalent model for induction electrodeless fluorescent lamps.,» *Power Electronics, IEEE Transactions*, pp. 3603-3613.
- [36] K. Cho, W. Oh, J. Yeon, D. Kim και H. Kim, «Electronic ballast of the electrodeless lamp for the group lighting system.,» *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, pp. 293-296, 2009.
- [37] L. R. Nerone, «A Novel Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamps,» *Conference Record of the 2000 IEEE*, τόμ. 5, pp. 3330-3337, 2000.
- [38] J. W. Shaffer και V. A. Godyak, « The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamps,» *Journal of the Illuminating Engineering Society*, pp. 142-148, 1999.
- [39] N. Khan και N. Abas, «Comparative study of energy saving light sources,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews 15* , p. 296–309, 2011.
- [40] M. Cole, K. Martin, M. Walton και M. Throckmorton, «Lighting in extreme temperature environments: The highs and the lows,» σε *PCIC Europe 2010 Conference Record*, 2010.
- [41] H. Kido, S. Makimura και S. Masumoto, «A Study of Electronic Ballast for Electrodeless Fluorescent Lamps with Dimming Capabilities,» σε *Industry Applications Conference*, Chicago, 2001.

- [42] T.-E. Jang, H.-J. Kim και H. Kim, «Dimming control characteristics of electrodeless fluorescent lamps.,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 93-100, 2009.
- [43] H. Kim, X.-C. Ma, H. Xu και H.-J. Kim, «A dimmable electronic ballast for wired or wireless remote control of electrodeless fluorescent lamp group lighting systems,» σε *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008.
- [44] M. F. da Silva, N. B. Chagas, M. E. Schlittler, J. Fraytag, T. B. Marchesan, F. E. Bisogno, J. Alonso και R. N. d. Prado, «High power factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp,» σε *International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion* , 2010.
- [45] L. M. Roberts, «Magnetic induction lights vs LED lights,» 2014.
- [46] C. Wencheng, H. Zheng, G. Liping, L. Yandan και C. Dahua, «Performance of induction lamps and HPS lamps in road tunnel lighting,» *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 , p. 139–144, 2008.
- [47] L. M. Roberts, «Environmental Aspects of Magnetic Induction Lamps,» *American Green Technology*, 2011.
- [48] «wind energy the facts,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.wind-energy-the-facts.org/>.
- [49] ON Semiconductor, Linear and Switching Voltage Regulator , Denver: ON Semiconductor, 2002.
- [50] J. Liu, *Lighting Controller for Dirty Environments*, Department of Electrical and Computer Engineering at the University of Auckland , 2012.